

В.Г. СЫЧЕВ



**СОВРЕМЕННОЕ
СОСТОЯНИЕ
ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ
И ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ
ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

**Российская академия наук
Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
им. Д.Н. Прянишникова (ФГБНУ «ВНИИ агрохимии»)**

В.Г. СЫЧЕВ

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ
И ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ
ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Москва
2019

УДК 631.8
ББК 40.4
С95

Р е ц е н з е н т ы :

доктор биологических наук, профессор, академик РАН А.Х. Шеуджен
(Кубанский государственный аграрный университет),
доктор сельскохозяйственных наук О.А. Подколзин
(ФГБУ ЦАС «Краснодарский»)

С95 Сычев В.Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. – М.: РАН, 2019. – 328 с.: ил.

ISBN 978-5-907036-01-7

Обобщение данных почвенных и агрохимических изысканий прошлых лет показало, что исследования подобного характера проводились нечасто и носили единичный характер. В данной монографии показана концепция изменения динамики плодородия почв в агроэкосистемах во времени. Обсуждается стратегия оптимального использования питательных веществ в будущем. В рамках интегрированного управления питанием растений предлагаются методы повышения эффективности использования питательных веществ и снижения их потерь. Представлены данные о содержании питательных веществ в зерновых культурах, а также о затратах минеральных удобрений и их окупаемости урожаем на разных типах почв, что дает возможность уточнить нормативы выноса, затрат и окупаемости минеральных удобрений урожаем зерновых культур в различных природно-сельскохозяйственных зонах.

Книга предназначена для научных работников, преподавателей, а также аспирантов и студентов высших и средних сельскохозяйственных заведений.

УДК 631.8
ББК 40.4

ISBN 978-5-907036-01-7

© В.Г. Сычев, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗ ПОТРЕБНОСТИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ В МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЯХ К 2030 Г.	8
Прогноз потребности сельского хозяйства России в минеральных удобрениях	12
СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ТЕОРИИ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ	19
АГРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОДОРОДИЯ ПАХОТНЫХ ПОЧВ	23
Гумусное состояние почв	23
Оптимальное содержание гумуса в почвах сельскохозяйственного назначения.....	30
Агрохимическая оценка кислотного состояния почв	34
Взаимосвязь реакции среды с физико-химическими свойствами почв	41
Отношение растений к кислотности почв.....	44
Очередность известкования и определение оптимальных доз извести	48
ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВ АЗОТОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЯХ	55
Действие азотных удобрений на урожай зерновых культур	60
Влияние природных и антропогенных факторов на действие азотных удобрений.....	74
Методы прогноза обеспеченности полевых культур азотом и дозы внесения азотных удобрений	78
Зональные особенности влияния доз азотных удобрений на содержание белка в зерне пшеницы	81
ФОСФАТНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЯХ	91
Характеристика пахотных почв основных природно-сельскохозяйственных зон и федеральных округов по содержанию подвижного фосфора	94
Градации обеспеченности содержания подвижных форм фосфора в почве ...	103
Эффективность фосфорных удобрений в зависимости от обеспеченности почв подвижными фосфатами.....	108
Влияние реакции почвенной среды на эффективность фосфорных удобрений	118
Оптимальный фосфатный уровень в почве для рационального использования минеральных удобрений	120
Окупаемость фосфорных удобрений в зависимости от реакции почвенной среды и обеспеченности почв подвижными фосфатами	126
Последствие фосфорных удобрений	138
ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВ КАЛИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЯХ	148
Характеристика пахотных почв основных природно-сельскохозяйственных зон и провинций по содержанию подвижного калия.....	158
Оптимальное содержание калия в почве.....	162

Эффективность калийных удобрений в зависимости от обеспеченности почв калием	164
БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ	176
Статьи баланса элементов питания	177
Современное состояние баланса питательных веществ в земледелии России	191
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА–УДОБРЕНИЕ–РАСТЕНИЕ»	195
Построение математических моделей продукционного процесса	196
Динамические модели	198
Экспертные системы и экспертно-описательные модели	200
Концептуальные модели	201
Моделирование оптимальных параметров свойств почв	204
Модель прогноза урожая сельскохозяйственных культур	210
Модель прогноза эффективности применения азотных удобрений	214
Модель прогноза эффективности применения фосфорных удобрений	220
Модель прогноза применения калийных удобрений	231
АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ	235
Показатели сельскохозяйственной оценки климата	235
Погодные условия и плодородие почв	240
Влияние агроклиматических факторов на особенности применения удобрений	244
Влияние агрометеорологических условий на урожайность сельскохозяйственных культур	250
Адаптация сельскохозяйственных исследований к изменению климата	259
Исследование эмиссии и стоков парниковых газов в полевых опытах Геосети	264
Прогноз изменения агроклиматических условий Европейской территории России к 2030 г.	266
Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур в агроландшафтах на основе базы данных Геосети опытов с удобрениями ...	274
АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ	279
Особенности органического земледелия в России	288
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	294
ПРИЛОЖЕНИЯ	296
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	306

ВВЕДЕНИЕ

Мировые тенденции развития агропромышленного комплекса в первой четверти XXI в. определяются, прежде всего, продолжающимся увеличением народонаселения планеты, сокращением площади пашни в расчете на одного жителя земли, ресурсным потенциалом стран и регионов. Эти объективно существующие факторы ставят на первое место в мировом сообществе решение продовольственной проблемы.

Сельское хозяйство является самой важной и одновременно самой проблемной отраслью народного хозяйства. Это предполагает определенную систему государственного регулирования и государственной поддержки отрасли. В Госпрограмме развития сельского хозяйства до 2030 г. поставлены задачи повышения эффективности использования в сельском хозяйстве земельных ресурсов, регулирования плодородия почв сельскохозяйственных угодий до оптимального уровня в каждой конкретной зоне. Оптимальное плодородие почв сельскохозяйственных угодий является естественным условием интенсификации земледелия, способствует росту урожайности сельскохозяйственных культур, увеличивает ценность земли и имеет важное природоохранное значение.

К сожалению, мы очень далеки от такой оптимизации. В России обвальное сокращение объемов химизации привело к быстрому нарастанию деградации почв, резкому снижению их плодородия. Это одна из причин, по которой за последние годы уже выведены из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров земли. Несмотря на общемировые тенденции в России в последнее время сложилась преимущественно экстенсивная форма земледелия. При этом большая часть урожая формируется за счет почвенного плодородия без компенсации выносимых с урожаем элементов питания, что приводит к отрицательному балансу питательных веществ, величина которого варьируется от 20 до 150 кг с гектара в разных регионах страны. Ежегодный вынос питательных веществ из почвы в 3–4 раза превышает их возврат с минеральными и органическими удобрениями.

То, что в России производится 22,5 млн т минеральных удобрений в действующем веществе и лишь 2,5–3,0 млн т используется в собственном сельском хозяйстве, является парадоксальным явлением. И причина не в том, что аграрии не хотят или не умеют работать. Лимитирующим фактором являются высокие цены минеральных удобрений на внутреннем рынке.

На фоне введенного эмбарго на поставки сельхозпродукции из большинства зарубежных стран был осуществлен ряд мероприятий, направленных на улучшение положения аграриев страны. Эти мероприятия включали в себя улучшение условий обеспечения сельхозпроизводителей необходи-

мыми видами и объемами минеральных удобрений, в связи с чем заявленная сельхозпроизводителями потребность в 2016 г. на уровне 3222 тыс. т, по данным Российской ассоциации производителей удобрений, была удовлетворена в полном объеме.

При высокой стоимости минеральных удобрений необходимым критерием целесообразности их применения должна стать рентабельность. Поэтому научно обоснованный выбор доз основных элементов питания растений ориентируется не только на повышение урожайности и качества урожая, на высокую окупаемость удобрений урожаем, но и на получение максимальной прибыли с каждого гектара. При этом необходимо усовершенствовать все звенья технологической цепочки применения удобрений, и одним из важнейших является оптимизация доз удобрений. В агрохимической науке сложилось несколько методов расчета доз удобрений. Их эффективность зависит от объективности имеющейся исходной информации о конкретных почвенно-климатических условиях и культурах.

Результаты опытов, проводимых в различных регионах страны географической сетью, опытов с удобрениями, бесспорно, свидетельствуют о необходимости совершенствования применяемых методов расчета доз удобрений и поиска новых. По мере прохождения опыта, иногда требуется корректировка исследуемых вариантов. Возникает необходимость модификации длительных экспериментов, которая базируется на поиске оптимального соотношения доз удобрений, складывающегося баланса элементов питания и коэффициентов использования элементов питания.

Накопленный Географической сетью и агрохимслужбой экспериментальный материал обеспечивает возможность принятия объективного решения при выборе дозы удобрений и сочетания в ней азота, фосфора и калия на основе влияния почвенных, климатических, погодных и антропогенных факторов на урожайность сельскохозяйственных культур. Нынешние относительно высокие урожаи зерновых при благоприятных погодных условиях последних лет дают надежду на то, что в ближайшие годы в связи с переходом на цифровые технологии существенно изменятся условия потребления минеральных удобрений. При этом обоснование объемов и ассортимента минеральных удобрений является важнейшей задачей обеспечения агротехнологий. В повышении эффективности минеральных удобрений весьма важно определение видов, форм и соотношений элементов питания. Рекомендуемый ассортимент не должен ограничиваться азотными, фосфорными и калийными удобрениями. Необходимо учитывать потребность в магниевых, борных и серосодержащих удобрениях. Разработка новых видов удобрений, в которых соединены традиционные удобрения с биоразлагающимися полимерами дает возможность пролонгированного действия удобрений на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Повышению окупаемости удобрений способствует также научно обоснованный выбор перспективных сортов возделываемых культур с высокой отзывчивостью на минеральные удобрения. Ошибка в выборе сорта – интенсивного вместо пластичного (или толерантного) – может резко снизить результативность агротехнологий. Практика показывает, что потенциал сорта реализуется на 60%, следовательно, сортовые особенности растений перестают быть

лимитирующим фактором. Необходимы более совершенные агротехнологии их возделывания, учитывающие почвенное плодородие и минеральное питание сортов.

Настало время перехода к новым агротехнологиям, дифференцированным применительно к разным почвам с указанием уровня интенсификации.

Освоение интенсивных агротехнологий на лучших землях потребует 7 млн т минеральных удобрений, что позволит довести сбор зерна до 130–145 млн т. При этом окупаемость удобрений зерном возрастет до 9 кг зерна на 1 кг действующего вещества. Это будет соответствовать сегодняшнему мировому уровню.

Игнорирование современных агротехнологий обуславливает отставание нашего сельскохозяйственного производства от большинства мировых товаропроизводителей.

В последнее время все чаще можно слышать весьма некомпетентные призывы к сокращению и даже отказу от минеральных удобрений из-за так называемых экологических проблем. На фоне гипертрофированного общественного неприятия «химии» в стране пропагандируется экологическое земледелие по правилам Международной ассоциации органического сельского хозяйства (iFOAM).

С помощью минеральных и органических удобрений можно улучшить плодородие почвы, создать оптимальный баланс питательных веществ для получения высоких урожаев. Многолетний опыт в нашей стране и за рубежом свидетельствует о том, что рациональное применение минеральных удобрений является условием для перевода некоторой части земель на органическое земледелие. Западной Европе потребовалось более ста лет применения минеральных удобрений и известкования почв, чтобы сегодня развивать органическое земледелие. Многолетние опыты и практика ведения земледелия и возделывания сельскохозяйственных культур в природно-сельскохозяйственных зонах страны свидетельствует о том, что для получения высоких урожаев необходимо расширять круговорот питательных веществ, улучшать физико-химические и агрофизические свойства почв. Это возможно сделать только путем научно обоснованного применения минеральных и органических удобрений.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗ ПОТРЕБНОСТИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ В МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЯХ К 2030 Г.

Одним из условий сохранения плодородия почвы является регулярное применение минеральных и органических удобрений, которые компенсируют вынос питательных веществ с урожаем и поддерживают благоприятную структуру почвы. В 1909–1913 гг. в России естественное плодородие обеспечивало урожайность в среднем за год 6,9 ц/га.

Ретроспективный анализ показывает, что интенсификация сельскохозяйственного производства России развивалась со значительным опозданием по сравнению с западноевропейскими странами. В середине 1960-х гг. в СССР был открыт путь к широкой химизации сельского хозяйства и развернута активная работа по агрохимическому обеспечению земледелия. Были проведены многочисленные полевые опыты в хозяйствах по выявлению эффективности удобрений на почвах различных природных зон. В этом отношении исключительно важную роль сыграла Географическая сеть опытов с удобрениями, начало которой было положено Д.Н. Прянишниковым в 1941 г. В качестве связующего звена между наукой и производством по вопросам применения органических минеральных удобрений и других средств химизации в 1964 г. была создана Государственная агрохимическая служба.

Начиная с 1970-х гг., когда была создана промышленность по производству удобрений, сельское хозяйство РСФСР стало быстро повышать экстенсивные и интенсивные показатели. В последние советские годы вынос с урожаем достигал 124 кг с га, а вносили с удобрениями (в 1987 г.) только 106 кг. Растениеводство начинало подходить к равновесию. Падение применения минеральных удобрений началось уже с 1988 г.

В ходе реформы 1990-х гг. применение удобрений снизилось с 9,9 млн т в 1990 г. до 1,5 млн т в 1999 г. С 1990 по 1995 г. количество вносимых в почву удобрений снизилось в 5 раз, а затем до 2002 г. не превышало 19 кг на га, что соответствовало уровню 1970 г. (табл. 1).

После 1990 г. происходит резкий спад плодородия земель. Основной причиной явилось резкое снижение объемов применения органических и минеральных удобрений. Так, в 2000 г. сократилось применение (по отношению к 1990 г.): органических удобрений в 4 раза, азотных удобрений в 5 раз, фосфорных и калийных в 20 раз.

Таблица 1
Статистические показатели динамики производства и потребления
минеральных удобрений в РФ (Манжина, 2017)

Показатель	Годы								
	1991	1999	2000	2004	2005	2010	2014	2015	2016
Производство минеральных удобрений (в пересчете на 100% питательных веществ, тыс. т)	15100	11496	12213	15800	16625	17912	19600	19920	20500
Экспорт (в пересчете на 100% д.в.), тыс. т	4167,6	9197	6948	11291	11746	12310	14112	16000	16300
Доля экспорта в объеме производства, %	27,6	80,6	79,0	72,3	70,7	68,7	72,0	80,3	79,5
Внесение минеральных удобрений в России:									
всего, млн т (100% д.в.)	9,9	1,5	1,4	1,4	1,5	1,9	2,5	2,7	3,2
на 1 га, кг	88	17	19	23	25	38	40	42	49
в % от производства минеральных удобрений	65,56	13,05	11,46	8,86	9,02	10,61	12,75	13,55	15,61

Примером может служить Московская область. Так, если в период 1981–1990 гг. пахотные почвы получали на 1 га 11,5–12,5 т органических удобрений, 99–105 кг азота, 75–81 кг фосфора, 96–97 кг калия, 5,0–6,7 т извести, то к 1999 г. в почву вносилось 2,8 т органических удобрений, 20 кг азота, 4 кг фосфора, 5 кг калия, а известкование практически прекратилось (Курганова, 1999).

Российская Федерация по сравнению с другими странами мира обладает огромными природными ресурсами. На 2,2% численности мирового населения на Россию приходится 9% мировой площади продуктивной пашни, 2,6% пастбищ, 18% лесов, 20% мировых запасов пресной воды. Однако ныне этот огромный потенциал отечественным АПК используется не в полной мере.

В России в среднем эксплуатируется 69% ресурсов пахотных земель, в то время как в мире в среднем использование пашни составляет 80% (Дятловская, 2017).

С 1990 г. началось обвальное падение посевных площадей. В 1985 г. минеральные удобрения получили 71% всей площади посева в 1987 – 74%, в 1990 г. – 66%. В 1992 г. уже лишь 60%, в 1993 г. – 45%, в 1995 г. – 25%. В 2002 г. она составила 27% всех посевных площадей, в 2005 г. – 32%, в 2010 г. – 42%, 2013 г. – 46%, 2016 г. – 53,3%.

Площади пахотных земель в большинстве регионов снижались до 2007 г., затем наметился постепенный рост.

По итогам работы отрасли растениеводства за 2017 г. в 2016 г. площадь пашни составила 116,7 млн га. При этом есть регионы, где площади пашни сокращаются с 1990 г. до настоящего времени. К ним относятся Тверская, Архангельская, Ярославская области, Удмуртия, Бурятия и Забайкальский край. Лидирующее место по объему неиспользованной пашни занимает Волгоградская область, в которой 2,8 млн га не засеваются.

В 2017 г. получен рекордный урожай зерновых – 134,1 млн т с площади 47,1 млн га. Это подтверждает тот факт, что в настоящее время нет альтер-

нативы минеральным удобрениям. Данные Министерства сельского хозяйства России также подтверждают, что при низкой обеспеченности пашни минеральным питанием урожайность падает (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость производства зерновых единиц от внесения минеральных удобрений

Регионы с внесением минеральных удобрений более 60 кг/га			Регионы с внесением минеральных удобрений менее 7 кг/га		
Регионы	Внесение минеральных удобрений, кг/га	Производство з.е. на 1 га посевной площади, кг	Регионы	Внесение минеральных удобрений, кг/га	Производство з.е. на 1 га посевной площади, кг
Астраханская обл.	163	3,16	Республика Бурятия	7	0,78
Республика Северная Осетия-Алания	158	3,81	Тверская обл.	7	0,61
Калининградская обл.	130	2,78	Новосибирская обл.	5	1,21
Кабардино-Балкарская Республика	121	3,68	Республика Калмыкия	5	1,10
Липецкая обл.	100	2,95	Саратовская обл.	4	1,06
Курская обл.	99	3,17	Алтайский край	3	1,05
Краснодарский край	87	4,36	Кемеровская обл.	3	1,33
Орловская обл.	87	2,63	Челябинская обл.	3	0,77
Карачаево-Черкесская республика	70	3,02	Оренбургская обл.	2	0,71
Республика Адыгея	67,8	2,99	Забайкальский край	2	0,95
Воронежская обл.	63,5	2,46	Республика Алтай	0	0,81
Ставропольский край	62,7	2,9	Республика Тыва	0	0,72

В России производится достаточное количество минеральных удобрений, чтобы обеспечить собственные потребности и экспортировать их в другие страны. Несмотря на полное удовлетворение заявок сельскохозяйственных производителей в минеральных удобрениях (3,2 млн т) внесение последних осуществлялось на половине посевных площадей – 53,3%. Половина страны вообще не использует удобрения и получает урожайность 10–12 ц/га, хотя потенциал намного выше.

Однако следует отметить, что декларируемая потребность российских аграриев далека от потребностей. Исходя из одних источников, она составляет от 8500 тыс. т (Сычев, 2006; Алейнов, 2007), а по другим – до 17500 тыс. т (Савинская, 2003; Кудинова, 2012).

Несоответствие норм внесения различных видов удобрений с реальной потребностью возделываемых культур отрицательно сказывается на их эффективности (Манжина, 2017).

Внесение органических удобрений в ходе реформы также уменьшилось. Во второй половине 1980-х гг. в РСФСР в колхозах и совхозах ежегодно вносилось 457–465 млн т органических удобрений, около 3,6 т на га пашни. В то же время в Белоруссии вносилось 15–16 т навоза на гектар. К 1997 г. в связи с уменьшением поголовья сельскохозяйственных животных, внесение органических удобрений упало до 1 т на гектар (Гражданкин, Кара-Мурза, 2013).

Нужно подчеркнуть важное обстоятельство, которое обычно упускается из виду. Поголовье скота упало за годы реформы почти в 3 раза. Мы имеем сейчас крупного рогатого скота существенно меньше, чем в 1916 г. и даже чем в 1923 г. Резкое падение замедлилось лишь в 2005 г.

Ссылки на то, что в 1980-е гг. в США тоже произошло сокращение поголовья крупного рогатого скота, не состоятельны, так как природа этого процесса в РФ и США различна. В США в ходе модернизации животноводства был сделан упор на интенсивность производства и резко повышена продуктивность скота. В РФ в ходе реформы сокращение поголовья происходило параллельно с технологическим регрессом и снижением продуктивности.

В 2016 г. органические удобрения применяли на 9,3% площади посева. В подавляющем большинстве регионов Российской Федерации среднегодовые дозы органических удобрений не превышают 2 т/га, из них в 23 регионах вносят менее 0,5 т/га.

В 2016 г. доля органических удобрений в общем поступлении НРК с удобрениями составила: под зерновые культуры 25%, подсолнечник – 28%, овощные культуры – 17%, картофель – 20%, кукурузу на силос – 65%. В целом уровень применения органических удобрений в сельхозпредприятиях крайне низкий.

Согласно расчетам ВНИИАгрохимии, для оптимизации режима органического вещества в почвах необходимо вносить навоза в среднем по России 6–7 т/га, а с учетом чистых паров – 500 млн т в год. С учетом наметившейся тенденции к росту поголовья скота только к 2030 г. выход навоза в сельскохозяйственных организациях в физической массе может достигнуть 314 млн т (Еськов, Мерзлая и др., 2018).

В последние годы расширяется ассортимент органических удобрений благодаря производству таких видов, как компосты, причем не только из традиционных источников органического вещества – навоза, птичьего помета, торфа, но и других органических компонентов – древесных отходов (коры, стружки, опилок, лигнина и лигносульфонатов), осадков сточных вод, твердых бытовых отходов, отходов пищевой промышленности, некондиционного сена и силоса, растительной массы в виде листвы и т. д. (Мерзлая, Жигарева, 2018).

Однако даже при использовании всех ресурсов – навоза, компостов – в пахотных почвах России сохраняется дефицит органического вещества и элементов минерального питания.

Анализируя сложившуюся ситуацию с минеральными и органическими удобрениями возможно сделать следующее заключение:

- в соответствии с данными статистики, в России в среднем применяется примерно 45–47 кг на га минеральных удобрений по д.в. (Росстат, 2017), тогда как аналогичный показатель в Европе – 160–250 кг, в США – 180 кг, в Японии более 300 кг/га, в Канаде, признанном аналоге России по природно-климатическим условиям, – 85 кг/га;
- для пополнения запасов органических удобрений необходима разработка и совершенствование технологий по использованию сточных вод, соломы, торфа, бытовых отходов;
- из-за несбалансированности потребностей в удобрениях и реального обеспечения ими аграриев страны эффективность сельскохозяйственного производства находится ниже среднемирового уровня, при этом, как показывает опыт развитых стран, климатические особенности нашей страны не являются этому лимитирующей причиной.

Прогноз потребности сельского хозяйства России в минеральных удобрениях

Согласно долгосрочному прогнозу социально-экономического развития РФ на период до 2030 г. намечено значительно увеличить объем производства зерна. Этот прогноз разработан с учетом трех сценариев: инерционно-го, базового и оптимистического (Сычев, Ефремов и др., 2011).

Инерционный базируется на сохранении нынешней структуры АПК и сложившегося уровня использования ресурсно-производственного потенциала агропродовольственного комплекса.

Доведение посевных площадей сельскохозяйственных культур с нынешних 72–75 млн га до 80–85 млн га, получение 100 млн т зерна, 25–30 млн т кормов (в к.е. на пашне).

Базовый сценарий ориентирован на самообеспечение. К 2020 г. планируется выход на объемы производства растениеводческой и животноводческой продукции, которые достигались в России в 1985–1990 гг. (120–125 млн т зерна, 60 млн т к.е. на пашне).

Оптимистический сценарий – интенсивное развитие производства зерновых культур, наращивание экспорта с конкурентоспособной сельскохозяйственной продукцией, приносящего доходы, сопоставимые с доходами от экспорта продукции топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Целевыми индикаторами являются: посевные площади под зерновыми культурами не менее 50 млн га; доля посевных площадей, на которых продукция производится по инновационным ресурсосберегающим технологиям, – не менее 75%; урожайность зерновых культур – 20–50 ц/га; среднегодовой валовой сбор зерна – 145–155 млн т; экспорт зерна на уровне 40–60 млн т в год.

В случае реализации различных сценариев обеспечивается бездефицитный баланс азота, небольшое превышение поступления фосфора над выносом и небольшой отрицательный баланс калия – от –7 до –14 кг/га.

Результаты многочисленных полевых опытов, проведенных научно-исследовательскими институтами и агрохимической службой, а также опыт работы сельскохозяйственных предприятий свидетельствуют, что намеченных показателей можно добиться только за счет планомерной и целенаправленной работы по повышению плодородия почв путем применения удобрений и средств химической мелиорации. Снижение почвенной кислотности, повышение фосфатного и калийного уровней почв способствуют увеличению урожайности и усилению действия азотных удобрений. Анализ использования минеральных удобрений показывает, что в период интенсивной химизации (1965–1990 гг.) благодаря внесению удобрений в дозах, превышающих вынос питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур, резко повысилось плодородие почв России. Так, по данным первого цикла агрохимического обследования, на 1 января 1971 г. больше половины пахотных почв характеризовалось низким содержанием подвижного фосфора и около 16% – низкой обеспеченностью подвижным калием (табл. 3).

Таблица 3

Агрохимическая характеристика пахотных почв России, %

Содержание в почвах питательных веществ	Подвижный фосфор по состоянию на				Подвижный калий по состоянию на			
	01.01.1971 г.	01.01.1996 г.	01.01.2010 г.	01.01.2016 г.	01.01.1971 г.	01.01.1996 г.	01.01.2010 г.	01.01.2016 г.
низкое	52,0	22,0	23,0	22,0	16,0	9,0	9,0	8,0
среднее	32,0	33,0	37,0	38,0	23,0	21,0	21,0	18,0
выше среднего	16,0	45,0	41,0	40,0	61,0	70,0	69,0	74,0

Расчеты, выполненные по разработанным ВНИИА региональным нормативам окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур (Сычев, Завалин и др., 2011), свидетельствуют о том, что нормативная урожайность зерновых без применения удобрений с учетом агрохимических свойств почв в целом по стране по состоянию на 1 января 1971 г. могла составить 16,5 ц/га, а прибавка от азотных удобрений в зависимости от дозы – 3,7–4,4 ц/га, на 1 января 2010 г. урожайность зерновых составляла 18,2 ц/га, а прибавка – 4,2–4,8 ц/га (табл. 4).

Таблица 4

Нормативная прибавка урожая зерновых культур в среднем по России от азотных удобрений, ц/га

Период обследования	Урожай без удобрений	Доза азота, кг д.в./га			
		30	60	90	120
На 01.01.1971 г.	16,5	3,7	4,2	4,4	4,2
На 01.01.1996 г.	18,4	4,2	4,7	5,1	5,0
На 01.01.2010 г.	18,2	4,2	4,7	4,8	4,8
На 01.01.2016 г.	18,1	4,1	4,6	4,8	4,8

К 2017 г. эти показатели практически не изменились.

За 25 лет планомерного и систематического применения удобрений произошло снижение доли пашни с низким содержанием подвижного фосфора

до 22%, подвижного калия до 9%. Улучшение агрохимических свойств почв способствовало приросту нормативной продуктивности пашни без использования удобрений до 18,2 ц/га и увеличению прибавки от азота от 4,2 до 4,8 ц/га, или в среднем на 14%.

В 1990-х гг. применение удобрений резко сократилось и наметилась тенденция к снижению содержания питательных веществ в пахотных почвах России. В масштабе страны это не так заметно. Однако в отдельных регионах изменения существенны. В первую очередь это касается Нечерноземной зоны, где в отдельных ее регионах снижение степени обеспеченности почв питательными веществами весьма очевидно. Вследствие этого снизилась вероятность получения в этих регионах максимально возможных урожаев зерновых культур, ежегодный недобор урожая которых составляет 5,1–7,3 ц/га (табл. 5).

Таблица 5

Прогноз снижения урожайности озимой пшеницы без внесения удобрений в результате деградации почв по агрохимическим показателям

Область	Содержание в почве, мг/кг				Урожайность, ц/га		Снижение урожая	
	на 01.01.1996 г.		на 01.01.2010 г.		на 01.01.1996 г.	на 01.01.2010 г.	ц/га	%
	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O				
Брянская	189	142	185	105	36,7	31,3	5,4	17
Владимирская	150	131	145	103	36,7	31,3	5,4	17
Ивановская	132	127	113	96	33,0	28,2	4,8	17
Костромская	127	137	100	95	33,0	28,2	4,8	17
Орловская	110	137	94	108	37,0	30,2	6,8	23
Рязанская	108	124	98	112	38,6	34,2	4,4	13
Тверская	134	132	159	96	33,0	28,2	4,8	17

В целом по стране ежегодное снижение урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя находится в пределах 1 ц/га. Если положение не изменится, то недобор урожая будет возрастать.

Таким образом, для получения намеченной урожайности зерновых культур необходимо позаботиться прежде всего о сохранении и повышении плодородия почв. Следовательно, дозы удобрений должны рассчитываться на получение запланированного урожая, а где это требуется – на улучшение агрохимических свойств почв.

При инерционном сценарии развития речь идет только о сохранении достигнутого уровня почвенного плодородия. Это значит, что баланс фосфора должен быть уравновешенным, т.е. доза удобрений и вынос фосфора урожаями будут равными. Вынос калия не обязательно следует возвращать полностью. Для того чтобы сохранить содержание подвижного калия на прежнем уровне, достаточно компенсировать около 60% его выноса урожаями. Для этого требуется внести 30 кг/га K₂O. Чтобы достигнуть валового сбора зерна 100–105 млн т на площади 46,7 млн га, надо получить урожай 24,6 ц/га, который возможен при внесении под зерновые культуры в среднем по 30 кг/га азота фосфора и калия (табл. 6).

Таблица 6

**Дозы минеральных удобрений под зерновые культуры
в целом по России на 2030 г.**

Сценарий развития АПК	Планируемый урожай, ц/га	Доза удобрений, кг д.в./га				Окупаемость NPK, кг/кг
		азот	фосфор	калий	всего	
Инерционный	24,6	30	30	30	90	7,1
Базовый	26,8	60	45	45	150	6,3
Оптимистический	30,2	70	45	45	160	7,5
В том числе:						
– по интенсивной технологии	40,0	90	45	45	180	12,1
– по базовой технологии	26,4	60	45	45	150	6,0

Это позволит не только получить необходимый валовой сбор зерна в условиях агрохимического состояния почв на 1 января 2010 г., но и сохранить этот уровень.

Как уже отмечалось, базовый сценарий ориентирован на расширенное воспроизводство почвенного плодородия, поэтому в данном случае необходимо предусмотреть потребность в удобрениях на обеспечение планируемой урожайности зерновых культур и на улучшение агрохимических свойств пахотных почв России.

Обобщение результатов агрохимического обследования, проведенное по состоянию на 1 января 2010 г., свидетельствует, что 59,5% пахотных почв характеризуется недостаточной обеспеченностью подвижным фосфором и 31% подвижным калием. Кроме того, 35% пашни имеют повышенную кислотность, т.е. значительная площадь нуждается в агрохимическом окультуривании, тогда как намеченную урожайность 27 ц/га можно получить только на почвах, хорошо обеспеченных (выше среднего) подвижными формами фосфора и калия, а также с реакцией среды близкой к нейтральной и нейтральной.

Стратегия данного вопроса такова: на почвах с содержанием P_2O_5 выше среднего баланс этого питательного вещества должен складываться уравновешенно, а на почвах с низким и средним содержанием – с превышением внесения над выносом. Аналогично следует поступать по отношению к выносу калия на почвах, недостаточно обеспеченных подвижным калием, а на почвах с содержанием K_2O выше среднего уровня достаточно компенсировать вынос калия на 50%. Для этого средняя доза азота должна составлять 60 кг/га, фосфора и калия по 45 кг/га.

Согласно оптимистическому сценарию развития АПК, предполагается еще более интенсивное воспроизводство плодородия почв, для того чтобы получать среднегодовой валовой сбор зерна 145–150 млн т при урожайности около 30,0 ц/га. В решении этой проблемы важное место должно занять освоение интенсивных технологий возделывания зерновых культур, суть которых заключается в получении планируемой урожайности путем планомерного управления продукционным процессом, обеспечивающим оптимальное питание растений и их защиту от вредителей, болезней,

сорных растений и полегания стеблей. С повышением интенсификации производства должно не только повыситься применение минеральных удобрений и пестицидов, но и соблюдаться общая культура земледелия, включая чередование культур в севооборотах, обработку почвы, качество семенного материала и использование сортов интенсивного типа. Только все это в совокупности может дать намеченный результат. Такие технологии рассчитаны на получение 40–50 ц/га озимой и 35–40 ц/га яровой пшеницы с использованием сортов интенсивного типа только на высококультуренных почвах, которые характеризуются близкой к нейтральной и нейтральной реакцией среды, повышенным, высоким и очень высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия. В настоящее время таких площадей 28%, что составляет около 13 млн га. На этой площади можно получить урожай зерновых культур в среднем 40 ц/га, или 52 млн т зерна, а остальные 89 млн т необходимо собрать с площади 33,7 млн га, при этом урожайность зерновых культур должна составить 26,4 ц/га. Для этого надо внести под них по 60 кг/га азота и по 45 кг/га фосфора и калия, или всего 6,0 млн т NPK (табл. 7).

Таблица 7

**Потребность зерновых культур в минеральных удобрениях
в целом по России на 2030 г.**

Сценарий развития АПК	Валовой сбор, млн га	Потребность в удобрениях, млн т			
		азотные	фосфорные	калийные	всего
Инерционный	100–105	1,4	1,4	1,4	4,2
Базовый	120–125	2,8	2,1	2,1	7,0
Оптимистический	145–150	3,2	2,1	2,1	7,4

Примечание: посевная площадь 46,7 млн га.

Уровень интенсивности возделывания зерновых культур способствует, наряду с позитивным воздействием на их урожайность, повышению окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая за счет роста окультуренности почв и общей культуры земледелия (табл. 6).

Наряду с повышением урожайности зерновых, необходимо увеличить сбор кормовых культур, которые в настоящее время удобряют крайне недостаточно. Для получения 60 млн т кормов на пахотных почвах необходимо увеличить использование минеральных удобрений до надлежащего уровня. При этом надо учесть внесение удобрений под другие культуры – технические, картофель и овощи. В связи с этим, общая потребность в минеральных удобрениях еще больше возрастает, достигая при инерционном сценарии 6,9 млн т, при базовом – 11,7, при оптимистическом – 13,9 млн т (табл. 8).

Таблица 8

**Общая потребность в минеральных удобрениях земледелия России
на 2030 г., млн т**

Сценарий развития АПК	Азотные	Фосфорные	Калийные	Всего
Инерционный	2,3	2,3	2,3	6,9
Базовый	4,7	3,5	3,5	11,7
Оптимистический	5,3	4,3	4,3	13,9

Это позволит, согласно первому сценарию, не только получить намеченный урожай, но и приостановить процесс обеднения пахотных почв питательными веществами, поскольку баланс питательных веществ в земледелии страны должен значительно улучшиться. Возмещение выноса азота за счет поступления с минеральными и органическими удобрениями и из биологических источников составит 75% по сравнению с 36% в настоящее время. Внесение фосфора с удобрениями превысит вынос в 1,5 раза, что позволит несколько улучшить фосфатный режим почв. Ожидаемая компенсации выноса калия составит 55%, что будет способствовать стабилизации содержания подвижных форм этого элемента в пахотных почвах страны (табл. 9).

Таблица 9

**Прогноз баланса питательных веществ
в земледелии России в 2030 г., кг/га пашни**

Статья баланса	Азот	Фосфор	Калий	Всего
Инерционный сценарий				
Вынос урожаями	41,3	15,0	43,1	99,4
Поступление в почву, всего	32,5	22,4	23,9	78,8
В том числе с минеральными удобрениями	19,9	19,9	19,9	59,7
Баланс	-8,8	7,4	-19,2	-20,6
Базовый сценарий				
Вынос урожаями	46,8	16,3	46,9	110,0
Поступление в почву, всего	53,8	33,1	34,7	121,6
В том числе с минеральными удобрениями	40,7	30,3	30,3	101,3
Баланс	7,0	16,7	-12,2	11,6
Оптимистический сценарий				
Вынос урожаями	52,8	18,3	52,9	124,0
Поступление в почву, всего	60,3	40,3	41,2	141,8
В том числе с минеральными удобрениями	45,9	37,3	37,3	120,5
Баланс	7,5	22,0	-11,7	17,8

При базовом сценарии вынос фосфора будет возмещен внесением удобрений на двукратную величину. Это позволит ежегодно повышать содержание подвижного фосфора на почвах, недостаточно обеспеченных P_2O_5 , на 3–4 мг/кг, и через 10–12 лет появится возможность перевести эти площади в категорию повышено обеспеченных.

Внесение удобрений при оптимистическом сценарии даст возможность еще быстрее перевести почвы с низким и средним содержанием подвижного фосфора в более высокую категорию. Этого следует ожидать через 8–9 лет.

Небольшой дефицит калия (22–26%), ожидаемый при базовом и оптимистическом сценариях, будет способствовать существенному повышению калийного уровня почв. В первую очередь это касается дерново-подзолистых почв (18,5 млн га), на которых создание положительного баланса калия позволит трансформировать эти почвы в более плодородные.

Результаты многочисленных полевых опытов научно-исследовательских учреждений и данные сплошного агрохимического мониторинга земель

сельскохозяйственного назначения за 40-летний период показывают, что достигнуть производства 150 млн т зерна можно только с помощью целенаправленной работы по повышению плодородия почв. Для получения такого валового сбора в целом по России к 2030 г. необходимо вносить ежегодно под зерновые культуры не менее 7,4 млн т минеральных удобрений в действующем веществе, в том числе 3,2 млн т азотных, 2,1 фосфорных и 2,1 млн т калийных. Это не только позволит получить намеченные урожаи, но и будет способствовать повышению плодородия почвы по агрохимическим показателям.

В решении поставленных задач по увеличению производства сельскохозяйственной продукции и повышению плодородия почв, наряду с ростом применения удобрений, особое значение имеет высокая технологическая дисциплина возделывания культур. Предпочтение следует отдавать высокоурожайным сортам, удобрения должны применяться в комплексе со средствами защиты растений от вредителей, болезней и сорняков, посев осуществляться высококачественным семенным материалом, агротехнические работы выполняться в намеченные сроки. Все это необходимо реализовать с использованием современного технического оснащения.

СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ТЕОРИИ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ

Плодородие – объективное свойство почвы, которое определяет продуктивность земледелия. В.Р. Вильямс под плодородием понимал способность почвы удовлетворять потребность растений в воде и пище «беспрерывно и одновременно максимальными количествами» (1939).

В научной литературе имеется множество различных определений понятия плодородия почв его расширенного воспроизводства. В связи с этим нет необходимости давать новые определения или подробно разбирать уже существующие. Важно определить, из каких частей состоит понятие воспроизводство плодородия почвы и как восстановить или повысить его.

Современный уровень развития агрономических наук позволяет правильно понять все процессы, совершающиеся в почве, установить их природу, понять сущность формирования плодородия почвы, а это дает возможность применять методы, с помощью которых возможно улучшить его качество.

В зонах постоянного ведения земледелия не может быть уровня естественного плодородия почв, поскольку оно подвергается изменению, о чем свидетельствуют результаты многолетних исследований. Вопрос о восстановлении плодородия всегда был актуальным. С теоретической точки зрения расширенное воспроизводство плодородия почв можно рассматривать по следующим важнейшим частям:

– определить, какие качества плодородия почв в результате многолетнего использования ухудшились и оказались в минимуме, в связи с чем урожаи снизились.

Немецкий ученый Ю. Либих открыл закон возврата веществ в почву, который К.А. Тимирязев и Д.Н. Прянишников называли величайшим приобретением науки. Согласно этому закону при нарушении баланса питательных веществ, а также водного баланса почвы, в результате потерь их либо вследствие вымывания, либо в силу выноса урожая их или других причин, их надо восстановить путем внесения соответствующего количества удобрений или другими приемами.

Низкие урожаи в период перестройки можно объяснить тем, что был нарушен баланс питательных веществ, что привело к снижению плодородия почв. Недостаток питательных веществ покрывался за счет экстенсивного использования плодородия почв. Закон возврата веществ существенен не только для повышения плодородия почв, но и для получения качественных урожаев. Важно грамотно владеть технологией выращивания культур. Например, можно получить урожай озимой пшеницы 80 ц с га, но при отсут-

ствии в почве достаточного количества продуктивного азота зерно будет иметь низкое содержание белка и плохое качество клейковины;

– **определить комплекс агрохимических, агрофизических мер, биологических мероприятий и применять их с тем, чтобы не только устранить появившийся минимум, но и обеспечить воспроизводство плодородия почв.**

Величина урожая во многом зависит от того фактора или элемента роста растений, который находится в минимуме. Однако в практике нередко закон минимума нарушается. Так, например, на полях, где в минимуме азот, вносят фосфор, а где недостаток фосфора – азот. Там, где достаточное содержание калия в почве продолжают вносить калий. Известно, что ограничивает урожай тот элемент, который находится в минимуме. Так, например, если в почве усвояемого азота хватает для урожая 10 ц зерна с 1 га, а других питательных веществ на 30 ц с гектара, то урожай будет все равно в пределах 10 ц (Панников, Минеев, 1987).

Известно, что отдельные факторы жизни растений действуют не изолированно, а в тесном взаимодействии друг с другом. Совокупное действие факторов жизни растений – явление динамичное, изменчивое. Для получения высоких урожаев необходимо уметь управлять этими факторами.

Так, например, с помощью применения научной системы удобрений можно (в определенных пределах) регулировать транспирацию растений, тем самым повысить урожайность в условиях недостатка влаги. Или, применяя фосфорные и калийные удобрения, можно значительно уменьшить потребление растениями воды. Нарушение любого закона земледелия и связанное с ним ограничение какого-либо фактора вызывает нарушение обмена веществ и ответную реакцию растений;

– **определить экономические возможности территорий и разработать организационные меры для осуществления намеченных планов по расширенному воспроизводству плодородия почв.**

Рассмотрение этого вопроса находится в компетенции экономистов, курирующих аграрный сектор.

Вопросы плодородия почв и их воспроизводства должны рассматриваться в широком теоретическом аспекте, такой подход может обеспечить успех в создании интенсивных технологий по выращиванию высоких и устойчивых урожаев.

Оптимальное сочетание всех агроэкологических факторов в требуемых для сельскохозяйственных культур режимах (водный, питательный, тепловой, воздушный) с учетом их биологических требований, почвенно-климатических и погодных условий, фитосанитарного состояния почв и посевов является одним из основных условий высокой продуктивности и устойчивости земледелия. Сохранение и повышение плодородия почв осуществляется проведением комплекса агротехнических, агрохимических, фитосанитарных, противоэрозионных, мелиоративных и других мероприятий, разрабатываемых по результатам комплексного мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного назначения.

Следует напомнить, что способность почвы одновременно обеспечивать растения водой, пищей и воздухом, а также создавать для них наиболее бла-

гоприятные (оптимальные) физические, физико-химические, химические, биологические и другие условия роста и развития называется эффективным плодородием почвы.

Следовательно, главные регулируемые факторы жизни растений находятся в почве. Повышение плодородия почв возможно только при осуществлении комплекса агротехнических мероприятий, воздействующих на все факторы жизни растений и все свойства плодородия почв. Если при интенсивном использовании почвенных ресурсов наблюдается их ухудшение, то это вызвано не увеличением урожая, а незнанием объективных законов природы и неправильным ведением сельскохозяйственного производства. В настоящее время перечень показателей, определяющих плодородие, значительно расширен. Кроме pH, содержания в почве гумуса, подвижных форм фосфора и калия, уровень плодородия характеризуется фитосанитарными условиями, агрофизическими свойствами почв и комплексными технологическими мероприятиями, которые поддерживают почвенное плодородие.

Со временем настала необходимость перехода от качественных характеристик к поиску взаимосвязей между почвенными показателями и урожаем сельскохозяйственных культур. При использовании рекомендаций, основанных на прежних теоретических положениях о плодородии почв, возникают трудности в трактовке результатов эффективности применения минеральных удобрений, отмечено отрицательное действие минеральных удобрений даже при применении средних доз, намечилось ухудшение общей экологической ситуации в сельском хозяйстве. О том, что время экстенсивного ведения сельскохозяйственного производства подходит к концу, говорят следующие цифры. По данным ФАО из 134 млн км² общей площади земельных ресурсов только 11% обрабатываемые земли. Ежедневно населению Земли для сбалансированного питания недостает 230 млрд калорий, что равно недостатку 37 млн т пшеницы в год. Ежегодный прирост населения составляет около 80 млн человек, и даже при нынешнем уровне питания мировое земледелие должно ежегодно увеличивать производство на 24–30 млн т. Каждый новый житель планеты требует в среднем 0,3 га для производства продуктов питания и 0,07–0,09 га для жизни (ФАО, 2018).

Из-за быстрого роста населения и его нерациональной хозяйственной деятельности, находящей выражение в ежегодной потере 6–7 млн га продуктивных почв, обеспеченность человечества земельными ресурсами быстро уменьшается. Площадь земельных ресурсов, приходящихся на одного человека, ежегодно сокращается на 2%, а площадь продуктивных угодий – на 6–7% ввиду растущей антропогенной нагрузки на земельные ресурсы и деградации почвенного покрова.

При анализе некоторых определений плодородия почвы акцентируется внимание в одних случаях на способность почвы обеспечивать растения элементами питания, в других случаях – как способность обеспечивать условия формирования урожая сельскохозяйственных культур, а также рассматривать плодородие почвы в совокупности с окружающей средой.

Современный этап развития учения о плодородии почвы требует применение дополнительно новых принципов по его оценке, использованию и регулированию, основанных на фундаментальных законах.

В частности, энергетическая оценка плодородия почв является необходимым звеном в комплексной оценке состояния почв и их эволюции, так как они определяются трансформацией, миграцией и аккумуляцией вещества, энергии и информации.

Сравнение показателей плодородия в энергетическом выражении позволяет выразить их в единой системе энергетических показателей и выявить факторы, на оптимизацию которых растения затрачивают при своем развитии больше энергии.

С практической точки зрения энергетическая оценка плодородия позволяет решить также следующие вопросы: оценить потенциально возможный урожай по ФАР с учетом периода биологической активности, по водообеспеченности, при орошении, при окультуривании почв. Энергетическая оценка систем земледелия и агрофитоценозов позволяет также выбрать культуры, выращивание которых на конкретных почвах и в исследуемых климатических условиях наиболее выгодно.

Энергетическое состояние почв в значительной степени определяет урожай сельскохозяйственных культур. При этом урожай определяется климатическими условиями, состоянием почв и антропогенным воздействием. Энергетическое влияние климатических условий на урожай и биопродуктивность оценивается по ФАР, $\sum_t \text{ } ^\circ > 10^\circ$, по водообеспеченности. С нашей точки зрения, перспективно оценивать потенциально возможный урожай по приходу фотосинтетически активной радиации за период биологической активности – период приемлемых для роста растений температур и условий увлажнения. Неблагоприятные свойства почв уменьшают КПД ФАР и обеспечивают действительно возможную урожайность.

Энергетическую оценку плодородия почв целесообразно проводить по валовому содержанию биофильных элементов, гумуса для характеристики потенциального плодородия (выражая их в энергетическом эквиваленте). Для характеристики эффективного плодородия почв может быть использована энергетическая оценка содержания подвижных и усвояемых элементов питания (энергетический эквивалент содержания подвижных и усвояемых форм биофильных элементов).

В то же время более точно эффективное плодородие почв оценивается по реальной величине КПД ФАР (без внесения удобрений), по сравнению с максимальной величиной КПД ФАР для данного вида и сорта растения и рассматриваемых климатических условий. Энергетическая оценка плодородия почв без внесения удобрений характеризует естественное плодородие почв, при внесении удобрений – искусственное плодородие почв, а также характеризует эффективность внесения удобрений на данной почве. Последний показатель оценивает плодородие почв с другой стороны. Он может быть оценен, как разница в КПД ФАР с внесением удобрений и без внесения удобрений, а также по энергетическому эквиваленту разницы урожая после внесения удобрений и до внесения удобрений, отнесенному к единице внесенных удобрений (правильнее рассчитывать для определенных видов, форм и доз).

АГРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОДОРОДИЯ ПАХОТНЫХ ПОЧВ

Гумусное состояние почв

В формировании почвенного плодородия важная роль принадлежит гумусу, запасы и состав которого практически определяют все агрохимические свойства и продуктивность почв. С количеством и качеством гумуса тесно связаны основные морфологические признаки почв, их водный, воздушный и тепловой режимы, важнейшие физические и физико-химические свойства. Чем больше запасы гумуса в почве, тем богаче она азотом, серой, фосфором и другими питательными элементами.

Но все же гумус и гумусовое состояние определяет свойства почв и урожайность в различной степени в зависимости как от климатических условий и сочетания свойств почв, так и от состава гумуса, наличия и количества в нем определенных функциональных групп, ответственных за комплексобразование, структурообразование, сорбционную емкость, буферность, биологическую активность и т. д. С точки зрения влияния органического вещества на подвижность в почве ионов наибольшее значение имеют такие его функциональные свойства, как комплексообразующая способность, сорбционная емкость, буферность, структурообразующая способность, энергоемкость и биологическая активность.

Гумусовое состояние почв в значительной степени определяет их плодородие и урожайность культур. Гумус содержит азот, фосфор, серу, он улучшает питательный режим почв, структуру, уменьшает плотность и липкость почв. Гумус имеет высокую емкость поглощения – 500–800 мг-экв/100 г (в песке емкость 5 мг-экв/100 г). Этим обуславливается его положительное влияние на емкость поглощения почв по отношению к ионам, молекулам, элементам питания, токсикантам, органическим ядохимикатам, воде.

На севере его содержание менее 1% (в связи с низкими температурами, кислой реакцией среды, избытком воды, наличием в опаде дубильных веществ, преимущественным развитием грибной микрофлоры). В степной зоне (в черноземах) гумуса содержится 4–10%, в южных почвах (светло-каштановых) его $\leq 2\%$ (в связи с наличием в опаде Cl, SO₄, Na, K, со щелочной реакцией среды, малой массой опада, при высокой температуре – полным разложением органических остатков до углекислого газа и воды (Духанин, Савич и др., 2011).

Д.С. Орлов и О.Н. Бирюкова (2005) предлагают следующие показатели гумусового состояния почв: мощность гумусового горизонта: очень маломощный – 0–5 см, маломощный – 0–10, мало-среднемощный – 0–15, среднемощный – 0–20, среднетипичный – 0–30, типичный – 0–40, типичный мощный – 0–50; высокомогущный – 0–60, глубокий – 0–70, сверхмогущный – 0–80 см и более. Содержание гумуса: сверхвысокое – более 20%, очень высокое – 12–20, высокое – 8–12, среднее – 6–8, ниже среднего – 4–6, низкое – 2–4, малое – 1–2, очень малое – менее 1%. Запасы гумуса в почвенном слое 0–100 см: сверхвысокое – более 1000 т/га, очень высокое – 600–1000, высокое – 400–600, выше среднего – 300–400, среднее – 200–300, низкое – 100–200, очень низкое – менее 100 т/га. Обогащенность гумуса азотом (С:N): очень высокая – <5, высокая – 5–8, средняя – 8–11, низкая – 11–14, очень низкая – >14. Степень гумификации органического вещества почв (Сгк/Собщ): сверхвысокая – более 50%, очень высокая – 40–50, высокая – 30–40, средняя – 20–30, слабая – 10–20, очень слабая – 5–10, сверхслабая – 0–5%. Доля «свободных» гуминовых кислот от суммы гуминовых кислот: очень высокая – более 80%; высокая – 60–80, средняя – 40–60, низкая – 20–40, очень низкая 10–20, крайне низкая – 0–10. Доля гуминовых кислот, связанных с Ca²⁺, к сумме гуминовых кислот: очень высокая – более 80%, высокая – 60–80, средняя – 40–60, низкая – 20–40, очень низкая – 10–20, крайне низкая – 0–10. Доля прочносвязанных с минеральной основной гуминовых кислот к сумме гуминовых кислот: высокая – более 20%, средняя – 10–20, низкая – менее 10. Содержание водорастворимых органических веществ (Свод) от Собщ: сверхвысокое – более 5%, очень высокое – 2–5, высокое – 1–2, выше среднего – 0,5–1, среднее – 0,2–0,5, низкое – 0,1–0,2, очень низкое – менее 0,1%.

Отдельные компоненты гумуса и параметры гумусового состояния оказывают неодинаковое влияние как на эволюцию почв, так и на их плодородие. Параметры оценки, методы оценки и величины оптимальных показателей, которые целесообразно использовать, будут зависеть от цели исследования – оценки гумусового состояния с точки зрения характеристики степени окультуренности почв, повышения урожая, прогноза генезиса и эволюции почв для характеристики состояния экологической системы в целом и отдельных ее компонентов.

В литературе отмечается, что применение только минеральных удобрений без органических сдерживает уменьшение содержания гумуса в почве по сравнению с вариантами без удобрений, не компенсируя его потерь (Лимонов, 1974; Хлыстовский, Вехов и др., 1979).

На подзолистых и дерново-подзолистых почвах, отличающихся повышенной кислотностью, важным агротехническим приемом является известкование. При этом происходят заметные сдвиги в составе гумуса, снижается доля фульвокислот и расширяется отношение Сг : Сф (Лыков, 1982).

Результаты наших исследований с 1981 по 1998 г. свидетельствуют о том, что средневзвешенное содержание гумуса в подзолистых и дерново-подзолистых почвах лесотундровой зоны в производственных условиях в течение 20 лет не изменилось и составило 1,9% (табл. 10).

Таблица 10

Динамика средневзвешенного содержания гумуса (%) в пахотных почвах различных природно-сельскохозяйственных зон

Природно-сельскохозяйственная зона	1965–1970 гг.	1971–1975 гг.	1976–1980 гг.	1981–1985 гг.	1986–1990 гг.	1991–1995 гг.	1996–1998 гг.
Лесотундрово-северотаежная	–	–	–	1,9	1,9	1,9	1,9
Среднетаежная	–	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,0
Южнотаежно-лесная	–	–	1,6	1,8	2,2	2,2	2,0
Лесостепная:	–	–	2,2	2,3	2,5	2,5	2,3
серые лесные почвы	–	–	4,0	4,2	4,2	4,3	4,0
черноземы	–	–	3,2	3,5	3,5	3,5	3,2
среднее по зоне	4,0	–	3,5	4,0	4,0	4,0	3,8
Степная	–	2,1	2,0	2,0	2,1	2,0	1,7
Сухостепная							

Содержание гумуса в Европейской провинции среднетаежной зоны составляло 2,0%, и к 1990 г. произошли положительные изменения. Этот период характеризовался значительным увеличением применения минеральных и органических удобрений. Площади почв с низким содержанием гумуса в этих зонах имели тенденцию к сокращению. Аналогичные изменения в содержании гумуса можно отменить и в почвах южнотаежно-лесной зоны.

Среднерусская провинция лесостепной зоны представлена серыми лесными почвами и черноземами типичными и выщелоченными.

Содержание гумуса в серых лесных почвах в контрольных вариантах опытов колебалось от 2,1 до 3,5%.

Среднее содержание гумуса в черноземе обыкновенном составило 5,3%, в черноземе выщелоченном – 5,7%.

Результаты исследований различных авторов показали, что изменения в содержании и составе гумуса серых лесных почв в зависимости от различных факторов аналогичны таковым в дерново-подзолистых почвах. Содержание гумуса в пахотном горизонте резко снижается без применения удобрений, особенно органических (Рубилин, Долотов, 1967; Ганенко, Гра-ти, 1973; Шубина, 1973; Гатта, 1980).

Внесение в серые лесные почвы минеральных удобрений оказывает незначительное влияние на содержание в них гумуса, в некоторых случаях имеет место небольшое повышение (Кривич, 1975; Шеларь, Пономарева, 1978), в других снижение. Имеются данные, что минеральные удобрения приостанавливают потери гумуса (Кононова, 1984; Адрианов, 1990, 2004).

В исследованиях автора средневзвешенное содержание гумуса в производственных условиях возросло в течение 20 лет от 2,2 до 2,5% в серых лесных почвах и от 4,0 до 4,2% в черноземах, а в среднем по зоне от 3,2 до 3,6% (табл. 10). Этим изменениям соответствует более высокий уровень

внесения удобрений. Объемы внесения минеральных удобрений в этот период увеличились в 3 раза, органических в 2,5 раза. С 1996 по 1998 г. наметилась тенденция к снижению содержания гумуса в черноземах и не отмечено изменений в серых лесных почвах. В среднем по лесостепной зоне за этот период площадь почв с низким содержанием гумуса возросла на 55%.

В ряде работ отмечено, что на богатых гумусом черноземах действие удобрений значительно слабее, чем на дерново-подзолистых и серых лесных почвах. Так, в слабовыщелоченных черноземах увеличение содержания гумуса, общего и гидролизуемого азота наблюдалось только при внесении повышенных доз навоза в течение 46 лет (Бровкин, Синягин, 1982). Слабое влияние удобрений на изменение содержания гумуса и азота отмечалось также в оподзоленном и обыкновенном черноземах (Шевцова, Сизова, 1974; Хомоленко, Айдиев и др., 1997; Подколзин, 1997).

Опыты, проведенные на дерново-подзолистых почвах, обнаружили, что коэффициенты стабилизации уровня содержания гумуса (K_c), взятые как отношение фактического его содержания в почве к исходному, показали, что в первое четырехлетие проведения опыта стабилизация содержания гумуса в почве с его низким и средним исходным содержанием обеспечивалась в вариантах с внесением навоза 10 и 20 т/га в год на фоне НРК минеральных удобрений (K_c 1,03–1,18), с повышенным и высоким – только 20 т/га навоза КРС на том же фоне (K_c 1,0). Во второе четырехлетие применение навоза в испытываемых дозах оказалось достаточным для стабилизации исходного содержания гумуса в низкогумусной (K_c 1,02–1,19), дозы 20 т/га в год – среднегумусной почве (K_c 1,02). По другим дозам и видам удобрений стабилизация содержания гумуса в почве не обеспечивалась (K_c меньше 1,0). Это относится и к одностороннему применению минеральных удобрений (вариант НРК) (Лыков, Еськов и др., 2004).

На основании анализа многолетних экспериментальных данных 19 длительных опытов (длительность исследований до 50 лет) определены основные параметры динамики и баланса органического вещества почв при длительном применении различных систем удобрения.

Опыты, которые вошли в исследование: Соликамская опытная станция, Пермская обл. (1934–1960), ВНИИОУ, Владимирская обл. (1968–2008), ВНИИ льна, г. Торжок (1956–2011), РГАУ–МСХА, г. Москва (1912–1960), Пермский НИИСХ (1946–1977), Долгопрудная агрохимическая опытная станция НИУИФ, Московская обл. (1931–1967), опыт Прянишникова с чистым паром (1937–1968) и опыт Щербы (1937–1967), ЦОС ВНИИА, Московская обл. (1964–1992), Украинский НИИ земледелия (Чебаны), Киевская обл. (1960–1977), Владимирская оп. станция, г. Суздаль (1970–1977), НИИ лубяных культур, г. Глухов (Украина) (1931–1968), НИИ селекции озимой пшеницы, Киевская обл. 51 севооборот (1912–1969), новое опытное поле (бессменно кукуруза) (1929–1961), Эрастовская оп. станция, Днепропетровская обл. (1947–1965), Мордовская оп. станция, г. Саранск (1960–1974), Красноярский НИИСХ, (1969–1975), Бурятский НИИСХ (1967–2015), ВНИИА, смоленский НИ-

ИСХ (1978–2008), Рязанский НИИПТИ (1991–1999). Дозы применяемых удобрений в большинстве опытов невысокие, содержание элементов питания в сравниваемых вариантах навоза и минеральных удобрений, как правило, выравнено. Севообороты – типичные для разнообразных природных зон России. Продолжительный период агрогенного воздействия на почву позволил впервые сформулировать принципы и провести анализ параметров баланса и динамики гумуса в длительных опытах, таких как оценка минимального и оптимального уровня содержания гумуса в конкретном опыте за определенный период наблюдения. За минимальное содержание гумуса (C_{\min} , %) или запасов (C , т/га) в опыте за исследуемый период наблюдения, независимо от зонального расположения и типа почвы, принимают содержание (или запасы) углерода в контрольном варианте (без удобрений). Опыты, расположенные на дерново-подзолистых почвах легкого и тяжелого гранулометрического состава, заметно различаются по содержанию углерода. Наименьшее исходное содержание гумуса в супесчаных почвах Соликамской опытной станции – 0,68% и ВНИИОУ – 0,70, в легкосуглинистой почве ВНИИ льна выше – 1,13, в окультуренной легкосуглинистой почве опыта в смоленской области – 1,4, в среднесуглинистых почвах Пермского НИИСХ – 1,39, а в тяжелосуглинистых почвах Долгопрудной опытной станции и Центральной опытной станции ВНИИА – 1,09 и 1,0% соответственно. Самое низкое содержание общего углерода в конце наблюдений отмечается на контроле (без удобрений). На супесчаных почвах Соликамской опытной станции за первые 27 лет этот показатель снизился на 0,44%, а за последующие 9 лет только на 0,04%, т.е. на контроле содержание углерода практически больше не менялось, достигнув своего минимума, определяющегося главным образом гранулометрическим составом почвы (Кершенс, 1992). Аналогичная динамика углерода наблюдается и в остальных опытах, расположенных на дерново-подзолистых почвах. Так, в опыте ВНИИОУ за 34 года содержание гумуса на контроле составило 0,62% при исходном – 0,70%. Такая же закономерность и в опытах, расположенных на дерново-подзолистых почвах тяжелого гранулометрического состава. В суглинистых дерново-подзолистых почвах минимальное содержание гумуса несколько выше, чем в супесчаных, и составляло в конце срока наблюдения 1,0–0,75%.

В суглинистых дерново-подзолистых почвах минимальное содержание гумуса до 1,3%, при положительном его балансе отмечено только в опыте С.В. Щербы (ДАОС) в вариантах с более высокими, чем в других опытах, дозами навоза и навоза + NPK. В большинстве опытов на тяжелых дерново-подзолистых почвах, как и на супесчаных, при всех системах удобрения бездефицитный баланс гумуса не достигнут.

В отношении опыта на серых лесных почвах исходные данные по содержанию гумуса не сохранились, и в качестве минимального для агротехнических и природных условий каждого конкретного опыта принято его содержание на контроле. Наименьшее значение этого показателя в опыте Украинского НИИ земледелия на среднесуглинистых почвах – 0,71% (контроль), наибольшее – в варианте навоз + NPK, где за 17 лет оно увеличилось до 0,85%.

Самыми большими природными запасами органического вещества характеризуются серые лесные почвы Владимирского НИИСХ (г. Суздаль), где на контроле содержание гумуса составляет 2,33%, что соответствует запасам 62,9 т/га. В варианте NPK за 7 лет исследований оно повысилось до 67,7 т/га.

Интересен и опыт НИИ лубяных культур с бессменной культурой конопля. За 37 лет на контроле содержание гумуса сохранилось на уровне 1,93%, а в варианте с навозом оно увеличилось до 2,45%.

В черноземных почвах содержание гумуса на контрольных делянках опытов было довольно близким и колебалось к концу срока наблюдений (13–24 года) от 2,05% в черноземе карбонатном Молдавского СХИ до 2,49% в опыте Мироновского НИИ селекции озимой пшеницы (Украина). Высоким содержанием гумуса характеризовались черноземы Мордовской опытной станции и Красноярского НИИСХ, где количество углерода в почве контроля составляло 5,76 и 4,64% соответственно. Таким образом, черноземные почвы даже за длительный период использования без удобрений сохранили свой статус почв, обеспеченных органическим веществом. К сожалению, качество органического вещества в них значительно ухудшилось, так как была утрачена наиболее активная, легко минерализуемая часть гумуса, остался «выпаханный» чернозем, требующий внесения органических и минеральных удобрений для обеспечения необходимого уровня продуктивности почвы (Шарков, 2005).

На каштановых почвах Бурятии исследования проводили в длительном опыте в течение 48 лет (Билтуев, Будажапов и др., 2017). Хорошо проявляется уменьшение отрицательного сальдо баланса гумуса по срокам наблюдения. Если в первые годы опыта содержание гумуса в контрольном варианте снизилось на 11%, то в последующие сроки его убыль шла менее заметно.

За весь период наблюдений (в течение 48 лет) содержание гумуса на контроле стабилизировалось на минимальном уровне – 0,55–0,50%. Сохранить исходный уровень гумуса в этом опыте удавалось только при применении 20 т/га навоза в паровом поле.

По данным М. Кершенса и др. (Koershens, Weigel et al., 1988; Кершенс, Шульц и др., 2002), уровень содержания гумуса в контрольных вариантах многолетних опытов близок к показателям, полученным на участках с бессменным чистым паром, поэтому в наших расчетах он принят за критерий минимального уровня для почв конкретных опытов. Учитывая, что длительные опыты, как правило, располагаются на типичных для региона почвах, количественное значение минимального уровня гумуса в длительном опыте можно экстраполировать на весь ареал подобных почв региона. Этот уровень оценивается как критический. Дальнейшее снижение ведет к деградации и полной утрате плодородия почв.

За оптимальное содержание гумуса конкретного опыта принято количество углерода в варианте с наиболее высоким его показателем в конечный срок наблюдения. Во всех исследуемых опытах это были в основном варианты навоз или навоз + NPK, или NPK + известь. Оптимальное содержание гумуса (до 1,3%) при положительном балансе отмечено и на дерново-подзолистой почве в опыте С.В. Щербы (ДАОС) в вариантах с более высокими,

чем в других опытах, дозами навоза + NPK. Уровень продуктивности почвы в этих вариантах опыта был наиболее высоким.

Несмотря на то, что в приведенных вариантах опытов на дерново-подзолистых почвах не всегда достигался бездефицитный баланс гумуса, интенсивность и скорость утраты органического вещества были значительно ниже, чем на контроле. Это позволяло долго сохранять исходное плодородие почвы и устойчивость ее продуктивности.

К важнейшим параметрам баланса гумуса относятся темпы снижения–накопления гумуса в почве при применении различных систем удобрения.

Темпы снижения–прироста содержания гумуса определяются по сальдо баланса ($-\Delta C$, % или т/га) между исходным при закладке опыта содержанием (запасами) гумуса и «минимальным–оптимальным» за исследуемый период наблюдения. Наибольшую интенсивность процессов снижения запасов углерода имели варианты без удобрения на самых бедных супесчаных и легкосуглинистых почвах Соликамской опытной станции и ВНИИ льна, где за 34–52 года было утрачено 45–55% исходных запасов гумуса соответственно.

Сравнение среднегодовых темпов «снижения–прироста» гумуса позволяет оценивать направленность и интенсивность воздействия исследуемых в опытах систем удобрения на запасы гумуса в почве, а также перспективы их изменений при дальнейшем использовании первоначальных схем или при их существенном изменении.

Важнейшей задачей агрохимической службы в настоящее время является стабилизация содержания гумуса на значительных площадях пашни в возможно более короткие сроки. Для поддержания бездефицитного баланса гумуса в целом по стране при современной структуре посевных площадей требуется вносить 6–7 т/га, а с учетом чистых паров – 500 млн т в физической массе при значительных колебаниях для различных земледельческих зон страны.

С учетом сложности значительного увеличения количества вносимого навоза в ближайшей перспективе важную роль в улучшении гумусового баланса могут играть совершенствование структуры посевных площадей, увеличение насыщения севооборотов бобовыми травами, максимальное использование соломы, пожнивных промежуточных сельскохозяйственных культур, зеленых удобрений (Лошаков, 2007).

Для ослабления потерь гумуса почвами необходимо также внедрение в полном объеме рекомендуемых мер по борьбе с водной и ветровой эрозией. По-видимому, в течение ближайших нескольких лет не удастся минимизировать потери гумуса за счет процессов водной и ветровой эрозии, но сократить эти потери по сравнению с наблюдаемыми в настоящее время представляется вполне возможным.

При значительном увеличении внесения органических удобрений, осуществлении других мероприятий по восполнению гумуса в почвах, внедрении комплексов мер по борьбе с эрозией почв можно ожидать замедления темпов уменьшения содержания гумуса в почвах примерно в 2–3 раза.

Результаты исследований динамики содержания гумуса в почвах разных типов позволили определить особенности воздействия различных систем удобрения для каждого типа почв. Активные изменения в начале опытов

завершаются стабилизацией на определенном уровне, при постоянном использовании одних и тех же опытных программ и приемов их агротехнического обеспечения.

Установление равновесного состояния указывает на то, что системы удобрения, заложенные более 30–50 лет тому назад, уже не соответствуют современным требованиям сельскохозяйственного производства и нуждаются в модернизации для решения современных проблем сохранения устойчивости гумусного фонда почв и повышения их плодородия.

Оптимальное содержание гумуса в почвах сельскохозяйственного назначения

С агрономической точки зрения оптимальное состояние свойств, процессов и режимов гумусовых соединений в почве является относительной величиной и зависит от сочетания свойств почв, проявления факторов почвообразования, выбранной культуры и уровня интенсификации производства.

Оптимальным содержанием гумуса следует считать такую величину, которая обеспечит урожайность сельскохозяйственных культур, отвечающую биоклиматическому потенциалу региона. По данным И.С. Шатилова, содержание гумуса 2,2–3,0% в Московской области позволяет получить урожайность озимой пшеницы до 50 ц/га. Т.Н. Кулаковская считала, что для почв Белоруссии хорошая урожайность сельскохозяйственных культур может быть получена при содержании гумуса 1,8% – для легких почв и 2% – для суглинистых. Оптимальное содержание гумуса для почв северо-запада составляет для песчаных почв – 2–4%, для тяжелосуглинистых – 4–5%.

Оптимальная гумусированность зависит от выращиваемой сельскохозяйственной культуры. Оптимальное содержание гумуса на дерново-глеевых почвах для зерновых (37–39 ц/га) – 3,5–5,0%, картофеля (327 ц/га) – 3–4%, сахарной свеклы (268 ц/га) – 5–6%, многолетних трав (67,1 ц/га) – 4–5%.

Величина оптимального содержания гумуса зависит от вида культуры и планируемого урожая (табл. 11).

Таблица 11

Оптимальные параметры дерново-подзолистых почв для некоторых сельхозкультур (Семенов, 2003)

Культуры	Оптимальные параметры свойств почв					
	физическая глина	содержание гумуса, %	pH	P ₂ O ₅ , мг/100 г	K ₂ O, мг/100 г	H _г , мг-экв/100 г
Рожь озимая	20–30	2,5–3,5	5,5–6,0	20–25	20–25	1,0–1,5
Ячмень	25–35	3,0–4,0	6,0–6,5	20–25	20–30	1,0
Пшеница яровая	25–35	3,0–3,5	5,5–6,0	25–30	20–30	1,0–1,5
Картофель	15–35	3,5–4,0	5,5–6,0	20–30	30–40	1,0–3,0
Капуста белокочанная	25–35	4,5–5,5	7,0	50–70	70–100	1,0
Лен	25–35	2,5–3,5	6,0–6,5	20–30	20–30	1,0–2,0
Брюква кормовая	15–25	4,0–5,0	6,0–6,5	40–50	40–60	1,0–1,5

В пределах достигнутого уровня агрономической оценки гумусового состояния почв существенное значение имеет оценка оптимального содержания гумуса в почве. При определении оптимума гумуса необходимо установить нижнюю границу его содержания, при которой недостаток в почве органического вещества замедляет формирование высоких и устойчивых урожаев. Для разных типов почв оптимальным является определенное, но не всегда максимальное содержание гумуса. Аналогично предполагается, что не всегда оптимально и наибольшее отношение гумусовых и фульвокислот. В то же время при повышении плодородия почв не всегда экономически выгодно создавать в верхнем горизонте оптимальное состояние гумуса, в ряде случаев целесообразнее улучшить гумусовое состояние (возможно, не доводя его до оптимума) в слое почвы большей мощности, чем Апах. Таким образом, следует различать оптимальное гумусовое состояние почв теоретическое и экономически оправданное. Экономически оправданное содержание гумуса в почвах разной степени окультуренности приводится в таблицах 12 и 13.

Таблица 12

**Оптимальные параметры содержания гумуса
для зерновых культур в дерново-подзолистых и черноземных почвах
(Духанин, Савич и др., 2011)**

Почва (регионы)	Содержание гумуса, %	Автор
дерново-подзолистые (Беларусь)	2,0–2,5	Кулаковская Т.Н. и др., 1982
суглинистые	1,8–2,0	
супесчаные песчаные	1,6–2,0	
(Северо-Западный регион)		
супесчаные и легкосуглинистые	3,5–4,0	Пестряков В.К., Гаврилов И.С., 1973 Семенов В.А., 1980
тяжелосуглинистые и глинистые	3,0–6,0	
(Ленинградская область)		
песчаные и супесчаные	3,0–4,0	Александрова Л.Н., Юрлова О.В., 1984
легко- и среднесуглинистые	4,0–5,0	
тяжелосуглинистые и глинистые	5,0–6,0	
(Московская область)		
среднесуглинистые	2,2–2,5	Кауричев И.С., Лыков А.М., 1979 Ельников И.И., 1982
тяжелосуглинистые	1,3–1,7	
легкосуглинистые	1,8–2,0	
черноземы лесостепи (Украина)		
типичные, мощные легкосуглинистые	5,5–6,0	Чесняк Г.Я., 1980
среднесуглинистые	4,0–5,0	
(Центральный черноземный округ)		
тяжелосуглинистые	5,0–7,0	Ефремов В.В., 1982
(Молдавия)		
суглинистые и глинистые	3,3–3,6	Унгуриян В.Г., 1983

Следует подчеркнуть, что при отсутствии достаточного количества удобрений и эффективных технологий гумус является почти единственным источником азота, но при удовлетворительном уровне химизации земледелия роль гумуса ослабевает.

Однако во многих случаях, даже при высоких дозах минеральных удобрений, слабое содержание гумуса служит причиной низких урожаев сельскохозяйственных культур, что связано в основном с неблагоприятными физическими свойствами почв.

Оптимальные параметры зависят от плодородия и применяемой системы удобрений. Например, на слабогумусированных дерново-подзолистых почвах при рН 4,8, P₂O₅ 6,7 мг/100 г оптимум гумуса – 2,3–2,7%, на более окультуренных при рН 5,2, P₂O₅ 29 мг/100 г – 2,7–3,0%.

Оптимальное содержание гумуса зависит и от сочетания свойств почв. Например, высокое содержание гумуса при рНвод 7 соответствует 0,9–1,8%, а при рН 4 – 3,5–7,1%. Очевидно, что при содержании гумуса 3,5–7,1% критический уровень рН 4, а 0,9–1,8% – 7 (Духанин, Савич и др., 2006).

Таблица 13

**Градации содержания гумуса для основных групп почв
Европейской части России
(на основе массовых материалов ВНИПТИХИМ)**

Почва	Содержание гумуса, %				
	очень низкое	низкое	среднее	повышенное	высокое
дерново-подзолистая					
супесчаная	≤ 1	1,1–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	> 2,5
суглинистая	≤ 1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	> 3,0
дерново-карбонатная					
суглинистая	≤ 2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	> 3,5
светло-серая лесная					
суглинистая	≤ 1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	> 3,0
серая суглинистая	≤ 2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	> 3,5
темно-серая					
суглинистая	≤ 3,0	3,1–3,5	3,6–4,0	4,1–4,5	> 4,5
черноземы					
тяжелосуглинистый					
оподзоленный	≤ 4,0	4,1–5,0	5,1–6,0	6,1–7,0	> 7,0
выщелоченный	≤ 5,0	5,1–6,0	6,1–7,0	7,1–8,0	> 8,0
типичный	≤ 6,0	6,1–7,0	7,1–8,0	8,1–9,0	> 9,0
обыкновенный	≤ 5,0	5,1–6,0	6,1–7,0	7,1–8,0	> 8,0
южный	≤ 3,0	3,1–3,5	3,6–4,0	4,1–4,5	> 4,5
темно-каштановая					
суглинистая	≤ 2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	3,6–4,0	> 4,0
каштановая					
суглинистая	≤ 2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	> 3,5
светло-каштановая					
суглинистая	≤ 1,0	1,1–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	> 2,5
бурая степная					
суглинистая	≤ 0,5	0,6–1,0	1,1–1,5	1,6–2,0	> 2,0

Для почв Нечерноземной зоны проблема оптимального гумусного состояния является особенно важной, так как содержание последнего в почвах этой зоны обычно невелико. По нашим данным, среднее содержание гумуса в контрольных вариантах опытов составляло 1,75–1,86% в подзолистой легкосуглинистой почве и 1,9–2,13% в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве (табл. 14).

Таблица 14

**Агрохимические показатели различных почв
в контрольных вариантах опытов**

Почва	Кол-во опытов	Содержание гумуса, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH _{сол}	H _г
			мг/100 г почвы			мг-экв на 100 г почвы
1	2	3	4	5	6	7
Среднетаежная зона						
Дерново-подзолистая: легкосуглинистая	8	<u>1,86</u> [*] 1,6–2,1	<u>7,8</u> 3,7–13,0	<u>9,8</u> 5,7–13,8	<u>5,4</u> 4,9–6,1	<u>2,6</u> 1,6–3,9
среднесуглинистая	5	<u>2,13</u> 1,59–2,64	<u>7,2</u> 4,5–11,5	<u>15,7</u> 6,3–27,0	<u>4,8</u> 4,0–6,2	<u>4,1</u> 1,7–5,2
Южнотаежно-лесная зона						
Дерново-подзолистая: легкосуглинистая	8	<u>1,75</u> 1,3–2,42	<u>7,1</u> 6,0–13,8	<u>14,0</u> 9,4–17,0	<u>5,3</u> 4,3–6,0	<u>2,6</u> 0,8–4,5
среднесуглинистая	15	<u>1,9</u> 1,3–3,0	<u>6,8</u> 5,6–10,4	<u>18,8</u> 9,4–32,0	<u>5,0</u> 4,1–6,0	<u>2,1</u> 0,8–4,8
Лесостепная зона						
Светло-серая лесная	7	<u>2,1</u> 1,9–2,3	<u>4,5</u> 2,5–7,7	<u>8,9</u> 8,0–9,6	<u>5,2</u> 4,7–5,6	<u>3,2</u> 2,8–3,7
Серая лесная	5	<u>3,5</u> 3,0–3,86	<u>7,2</u> 5,6–8,0	<u>9,3</u> 7,1–11,2	<u>5,2</u> 5,0–5,6	
Темно-серая лесная	8	<u>3,5</u> 3,0–3,7	<u>6,7</u> 6,0–8,5	<u>10,3</u> 7,2–13,3	<u>5,2</u> 4,9–5,6	<u>3,5</u> 3,1–3,9
Чернозем: выщелоченный	10	<u>5,7</u> 4,58–7,2	<u>5,2</u> 3,9–9,4	<u>9,3</u> 7,5–12,3	<u>5,5</u> 4,0–7,0	<u>5,4</u> 4,0–7,6
оподзоленный	7	<u>5,75</u> 4,0–6,8	<u>7,2</u> 2,4–11,0	<u>10,5</u> 8,4–15,7	<u>5,0</u> 4,9–5,6	<u>6,2</u> 5,9–6,8
Степная зона						
Чернозем обыкновенный	3	<u>5,3</u> 4,2–7,2	<u>7,8</u> 7,3–8,1	<u>13,4</u> 12,6–14,5	<u>7,2</u> 7,0–7,4	<u>0,6</u> 0,1–1,0
Сухостепная зона						
Темно-каштановая	5	<u>3,9</u> 3,5–5,3	<u>0,98</u> 0,8–1,5	<u>41,3</u> 35,5–46,9	<u>7,2</u> 7,0–7,5	–

Примечание: * в числителе – средние значения; в знаменателе – крайние значения показателей.

Обобщенные сведения о связи гумусированности, свойств почв и продуктивности севооборотов по данным длительных стационарных опытов ВИУА приведены в таблице 15.

Важным фактором, влияющим на гумусовое состояние почв, является набор выращиваемых культур и их чередование в севообороте.

От него зависят количество и состав поступающих в почву растительных остатков, характер механической обработки почвы, состав и дозы вносимых удобрений.

Таблица 15

Продуктивность севооборотов и основные агрохимические показатели плодородия различных типов почв (по данным длительных стационарных опытов ВИУА)

Почвы	Продуктивность, тыс. з.е./га в год	рН _(ксл)	Гумус, %	P ₂ O ₅ подвижный по Кирсанову, мг/100 г почвы	K ₂ O обменный по Масловой, мг/100 г почвы	Удобрения в среднем в год			
						навоз, т/га	N, кг/га	P, кг/га	K, кг/га
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
дерново-подзолистые									
супесчаные	3,0–3,5	<5	1,3–1,5	8–10	10–15	7,5	46	34	54
суглинистые	3,3–4,0	5,0–5,5	1,5–1,8	≈ 15	15–20	12,5	47	42	68
тяжелосуглинистые	3,7–4,5	5,0–5,5	1,6–2,0	10–15	15–20*	7,0	103	85	132
серые лесные	4,5–5,5	5,0–5,5	1,5–2,5	10–15*	10–15	9,0	57	45	65
оподзоленные	≈ 4,5	≈ 6	≈ 2,3	18–20	≈ 15	10,0	51	60	60
серые лесные									
черноземы									
выщелоченные	5,5–6,0	5,5–6,0	≈ 3,7	15–20*	20–25	–	82	90	0
типичные	≈ 4,5	≈ 6,0	5,2–5,4	≈ 10	15–20	6,0	30	33	30
мощные	≈ 4,5	6,2–6,5	≈ 7,5	10–15*	20–30	2,5	85	91	86
типичные	≈ 3,5	≈ 7,0	4,0–4,2	10–15*	≈ 20	5,0	13	25	15
обыкновенные	≈ 6,5	≈ 7,0	≈ 3,0	2,0–2,5**	20–30**	–	60	90	0
карбонатные (при орошении)									
каштановые (при орошении)									
светло-каштановые	≈ 6,5	≈ 7,0	≈ 2,0	2,5–3,0**	> 20**	–	75	65	65
темно-каштановые	≈ 9,0	≈ 7,0	≈ 3,0	2,5–3,5**	> 20	–	79	98	0

Примечание: * – по Чирикову, ** – по Мачигину.

Агрохимическая оценка кислотного состояния почв

Кислотность – один из основных показателей плодородия почвы, от нее зависит уровень урожайности и качество продукции, а также эффективность применения удобрений. Кислотность почвы оказывает непосредственное влияние как на растения, так и на все химические, физико-химические и биологические процессы в почве и тем самым определяет уровень минерального питания сельскохозяйственных культур.

Впервые агрохимическая характеристика пахотных почв в разрезе природно-сельскохозяйственного районирования была представлена в 1975 г. по материалам обследования пашни центрами и станциями агрохимической службы за период 1965–1972 гг.

Обобщение материалов обследования пахотных почв по состоянию на 1.01.2008 г. с учетом их зональности дало возможность выявить динамику изменения плодородия пахотных земель по основным агрохимическим показателям и кислотности, в том числе в разрезе основных природно-сельскохозяйственных зон и провинций.

За истекшие 35 лет процесс изменения плодородия пахотных почв России по основным показателям в целом имеет позитивный характер. Однако в различных природно-хозяйственных условиях эти изменения не однозначны.

Следует отметить, что во всех природно-сельскохозяйственных зонах сократились площади пашни с кислой реакцией среды.

Особенно это характерно для зон, где пахотные почвы, нуждающиеся в известковании, занимают площади более 50%. В среднетаежной зоне площади пахотных почв с кислой реакцией среды сократились на 32,9%, в южнотаежно-лесной – на 26,4%. В других зонах площади кислых почв сократились менее чем на 10% (от 0,2% в лесостепной зоне до 9,4% в лесотундровой) (рис. 1).

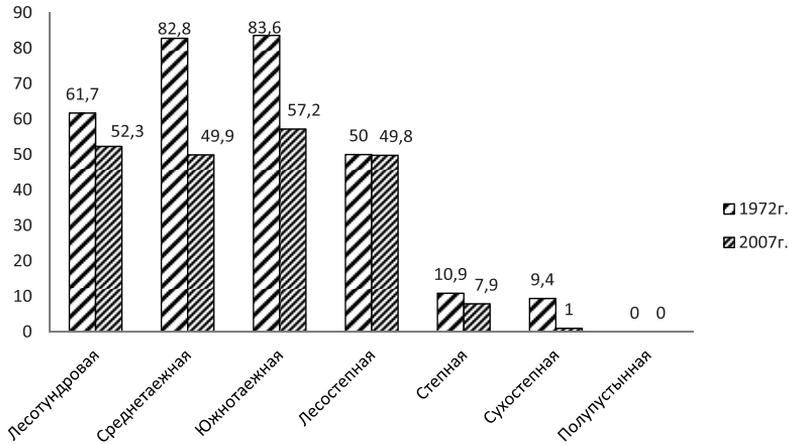


Рис. 1. Динамика площадей пахотных почв России с кислой реакцией среды ($pH < 5,5$)

В среднетаежной зоне подзолистых (типичных) и мерзлотно-таежных почв в Европейской провинции площади кислых почв сократились на 26,0% (в основном в Архангельской, Вологодской и Кировской областях).

В южнотаежно-лесной зоне дерново-подзолистых, подзолисто-бурых и бурых лесных почв наибольшие изменения по улучшению кислотного режима пахотных почв выявлены в Прибалтийской и Среднерусской южнотаежно-лесной провинциях. Площади пахотных почв с кислой реакцией среды сократились на 40,3 и 33,1% соответственно. Это субъекты Северного Федерального округа (Калининградская, Ленинградская, Новгородская и Псковская области) и большая часть субъектов Центрального округа.

В Западно-Сибирской провинции наличие кислых почв за истекший период практически не изменилось (сократилось на 0,4%).

В Среднесибирской провинции (северные регионы Красноярского края и Иркутской области) площади пахотных почв с кислой реакцией среды увеличились на 6,5%. При этом обследованная площадь пашни сократилась на 183,9 тыс. га (рис. 2).

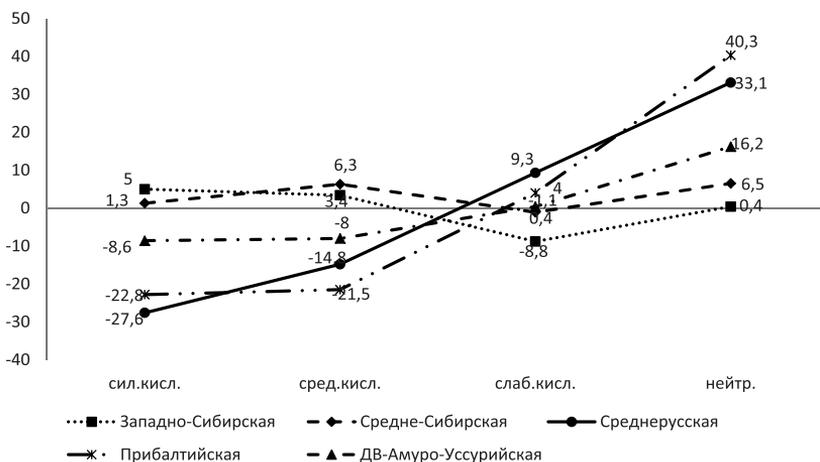


Рис. 2. Динамика кислотности пахотных почв провинций Южнотаежно-лесной зоны (1972–2007 гг.)

В целом по лесостепной зоне серых лесных почв, оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов наблюдается небольшое сокращение сильнокислых (–0,9%) и среднекислых (–0,6%) почв. Соответственно, площадь слабокислых почв пашни увеличилась на 1,3%. Однако в провинциях лесостепной зоны при продвижении с запада на восток наличие кислых почв значительно увеличивается.

На европейской территории России в Среднерусской и Предуральской провинциях лесостепной зоны площадь пашни с кислой реакцией среды сократилась на 7,6%–2,6%. В Среднерусской провинции, в регионах, где преобладают в основном черноземные почвы, площадь кислых почв сократилась на 7,6% (рис. 3).

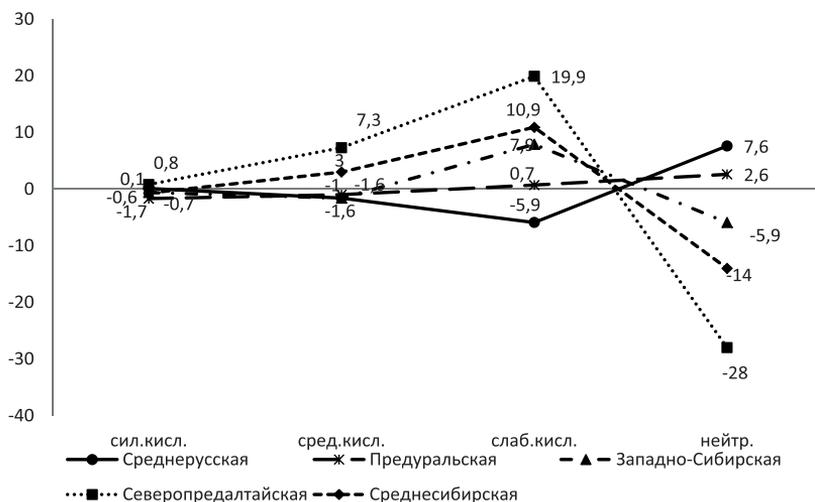


Рис. 3. Динамика кислотности пахотных почв провинций Лесостепной зоны (1972–2007 гг.)

Следует отметить, что при увеличении обследованной площади пашни в этой зоне на 950 тыс. га площадь кислых почв сократилась на 789 тыс. га, что, скорее всего, связано с применением больших объемов средств химизации по известкованию.

В провинциях, расположенных за Уралом, площадь пахотных почв с кислой реакцией среды увеличилась от 5,7% в Западно-Сибирской провинции (субъекты Уральского Федерального округа) до 28,0% в Северопредалтайской провинции (северная часть Алтайского края, Кемеровская и Новосибирская области). В Западно-Сибирской провинции увеличение площадей кислых почв связано в первую очередь с увеличением обследованной площади. В Северопредалтайской провинции обследованная площадь пашни увеличилась незначительно (на 124,6 тыс. га), а площадь кислых почв увеличилась на 1027,4 тыс. га, что указывает на отсутствие регулярных мероприятий по известкованию пахотных почв.

В Среднесибирской провинции (Красноярский край, Иркутская область) с увеличением обследованной площади (на 1062,4 тыс. га) пропорционально возрастает площадь пашни с кислой реакцией среды (на 652,3 тыс. га).

В целом по степной зоне обыкновенных и южных черноземов площади пахотных почв с кислой реакцией среды сократились на 1247,6 тыс. га (3,0%), что в первую очередь связано с сокращением обследованной площади на 3013,3 тыс. га и выходом из оборота наименее плодородных земель. Такая же ситуация наблюдается в Предкавказской (регионы Южного федерального округа), Западнопредалтайской (Алтайский край) и Восточносибирской (Читинская область) провинциях.

В Южнорусской степной провинции при значительном сокращении обследованных пахотных земель (на 1687,7 тыс. га), площадь пашни с кислой реакцией среды увеличилась на 1178,0 тыс. га за счет Саратовской области. В 1990-е гг. саратовские черноземы считались почвами с нейтральной реакцией среды и показатель pH не определяли. И только в конце 1990-ых гг. этот показатель стали контролировать.

В Казахстанской степной провинции за истекший период обследованная площадь пахотных почв увеличилась на 1,0 млн га. Площадь пашни с кислой реакцией среды в этой провинции сократилась на 273,8 тыс. га (8,3%), в Новосибирской и Омской областях.

Пахотные почвы Сухостепной зоны темно-каштановых и каштановых почв характеризуются в основном нейтральной реакцией среды. К 2007 г. в этой зоне всего лишь 99,5 тыс. га кислых почв, что составляет 1,06% от обследованной площади пашни. Из них – 91,3 тыс. га пашни в Алтайском крае Казахстанской сухостепной провинции.

По результатам обобщенных данных агрохимического обследования почв, площади почв с кислой и очень кислой реакцией почвенной среды в 1965–1970 гг. составляли в северотаежной зоне в среднем >70%, в среднетаежной – >45%. южнотаежная зона, представленная в основном дерново-подзолистыми почвами, имела около 40% кислых почв (рис. 4). Средневзвешенные значения pH_{kcl} составили соответственно – 4,5; 4,6; 4,6.

Основные почвы лесостепной зоны – черноземы и серые лесные.

Светло-серые и серые лесные почвы характеризуются преимущественно кислой реакцией почвенной среды. Площади почв с кислой реакцией составили 10% при средневзвешенном значении рН – 5,2.

Начиная с 1970 г. значительно возросли объемы известкования почв во всех зонах страны, имеющих кислые почвы.

В период с 1970 по 1995 г. площади почв, на которых было проведено известкование (тыс. га в год), возросли в северотаежной зоне с 42,7 до 126,7; в среднетаежной зоне – с 72,2 до 133,8; в южнотаежной зоне – с 87,0 до 139,8 и в лесостепной зоне с 17,8 до 82,0. Средневзвешенные значения рН изменились соответственно – от 4,5 до 4,7; от 4,6 до 5,3; от 5,2 до 5,3. Незначительное изменение значений рН в лесостепной зоне связано с подкислением черноземов в связи с внесением физиологически кислых удобрений. Площади почв с низкими значениями рН сократились в северотаежной зоне на 9,3%, в среднетаежной зоне на 28,9%, в южнотаежной зоне на 36,2%, в лесостепной зоне на 6,7%.

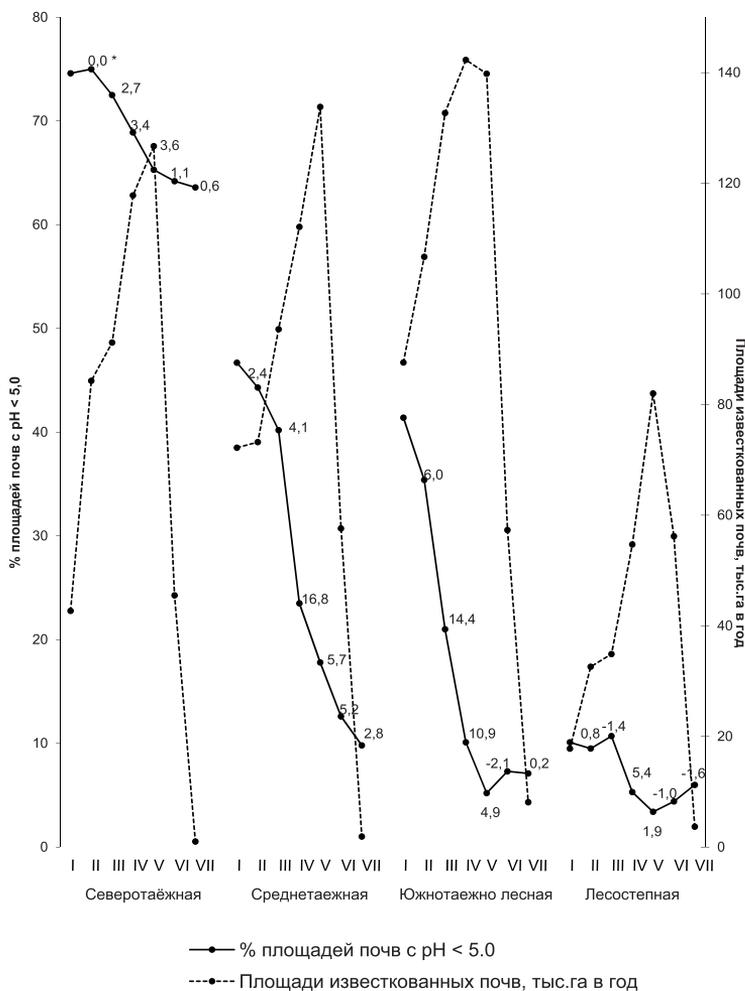
После 1990 г. резко сократились объемы известкования, и к 1998 г. известкование практически не проводилось и составило по зонам 1,0; 1,9; 8,1; 3,7 тыс. га в год.

Известно, что действие извести продолжается несколько лет и зависит от нормы внесения. Так, при внесении 3–4 т извести на 1 га ее действие продлится 5–7 лет, а при внесении 6–8 т до 15 лет (Державин, 1986; Шильников, Лебедева, 1987; Kurtinecz, 1988).

Нормы извести в северотаежной зоне составили в среднем от 4,5 до 7,0 т/га, среднетаежной зоне – от 4,0 до 6,5 т/га, южнотаежной – от 3,5 до 6,5 т/га, лесостепной – от 2,5 до 6,0 т/га в зависимости от гранулометрического состава почвы.

Поэтому количество площадей кислых почв в северотаежной и Среднетаежной зонах в последние годы продолжает уменьшаться, несмотря на очень низкие объемы известкования. Однако темпы уменьшения резко сократились и соответствовали уровню 1970–1975 гг. Средневзвешенное значение рН практически не изменилось. Южнотаежная и лесостепная зоны характеризовались увеличением площадей кислых почв, хотя темпы их роста незначительны – 1–2% (рис. 4).

Таким образом, в течение 25 лет (1965–1990 гг.) при проведении мелиорированного и поддерживающего известкования площади кислых почв снизились вдвое, а в период с 1991 по 1998 г. (8 лет) в 1,06 раза, то есть практически количество их не изменилось. Увеличение площадей кислых почв не произошло только за счет длительного действия извести. Но в настоящее время уже наметилась тенденция роста почв с низкой реакцией почвенной среды. К 1990 г. благодаря внедрению промышленной технологии и увеличению производства известковых удобрений было завершено первичное известкование, а в некоторых регионах проведены третий и даже четвертый туры известкования. Произвесткованные полными дозами почвы даже через длительные промежутки времени не восстанавливаются до вредного для растений уровня обменной формы кислотности. Однако на этих почвах отмечается увеличение потерь кальция вследствие вымывания и выноса растениями, а также эрозии.



* – Темпы сокращения площадей кислых почв

I	II	III	IV	V	VI	VII
1965–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1991–1995	1996–1998

Рис. 4. Динамика площадей почв с pH < 5,0 и объемов известкования по зонам и годам исследования

По данным И.А. Шильникова и Л.А. Лебедевой (1987), действие извести на реакцию среды в почве достигает максимума в первые два года. Затем происходит постепенное подкисление почвенного раствора. В течение пятилетнего периода теряется примерно третья часть достигнутого сдвига реакции в щелочную сторону. Через 7–8 лет эта потеря достигает половины уровня pH, полученного в первые годы.

По нашим расчетам в течение 33 лет (1965–1990 г.) сдвиг pH составил в северотаежной зоне – 0,4; среднетаежной – 0,7; южнотаежной – 0,8, лесостепной – 0,2.

Снижение объемов известкования почв может привести к тому, что повышенная кислотность опять станет лимитирующим фактором получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Результаты мониторинга плодородия почв сельскохозяйственных угодий, обобщенные за последний цикл агрохимического обследования по состоянию на 1 января 2010 г., показывают, что из обследованных 83,6 млн га площадей пашни 29,4 млн га, или 35%, имеют повышенную кислотность. Сильнокислые и очень сильнокислые почвы распространены на площади 2,7 млн га, доля их составляет 0,03%, среднекислые почвы занимают 8 млн га (9,6%). Кислые почвы наиболее распространены в Уральском (46%), Центральном (54,4%) и Дальневосточном (74,2%) федеральных округах, в остальных округах, кроме Южного, пахотные почвы с кислой реакцией почвенной среды составляют 21–40%. Наблюдается смещение границы кислых почв на юг. В Краснодарском крае насчитывается 143,4 тыс. га кислых почв, республике Адыгея – 103,1 тыс. га.

Подкисление почв приводит к резкому снижению их биопродуктивности, деградации самих почв и биоты водоемов, увеличению загрязнения почв и вод водорастворимыми формами соединений тяжелых металлов. Устойчивость почв к подкислению в значительной степени определяет их экологические и агрономические функции.

Результаты агрохимического обследования пашни в районах распространения кислых почв и группировки площадей по степени кислотности показывают, что в Северо-Западном ФО сохраняется достаточно высокое количество пашни с $pH < 4,5$. В Центральном, Северо-Западном и Дальневосточном ФО pH остается на уровне 4,6–5,0.

Согласно результатам обобщения данных агрохимического обследования пахотных почв по состоянию на 1 января 2016 г. в целом по стране около 33% имеет повышенную кислотность (табл. 16).

Таблица 16

Распределение пашни по степени кислотности по состоянию на 1 января 2016 г., % от обследованной почвы

Федеральный округ	Величина pH					
	< 4,5	4,6–5,0	5,1–5,5	5,6–6,0	6,1–7,9	≥ 8,0
Российская Федерация	2	10	21	19	30	18
Центральный	3	19	37	23	18	0
Северо-Западный	7	15	25	25	29	0
Южный	0	1	3	5	28	62
Северо-Кавказский	0	1	1	2	17	79
Приволжский	3	10	20	18	40	9
Уральский	2	9	38	27	24	1
Сибирский	2	7	22	29	36	4
Дальневосточный	15	41	31	9	4	0

В целом для настоящего периода нет оснований говорить о существенном ослаблении кислотности почв. Наблюдается скорее сдерживание усиления кислотности почв и некоторое «перераспределение» площадей кислых почв в зонально-региональном плане, то есть сокращение этих площадей в одних сельскохозяйственных зонах и увеличение – в других.

Взаимосвязь реакции среды с физико-химическими свойствами почв

Реакция почвенной среды в большинстве случаев выступает как главный фактор, ограничивающий урожай.

Кислые почвы обладают комплексом неблагоприятных свойств, которые необходимо учитывать отдельно.

Токсичность кислотности как таковой, то есть высоких концентраций обменного водорода, проявляется в наибольшей степени на торфяных почвах с pH_{KCl} 2,8–3,9 при низком содержании обменного кальция. На дерново-подзолистых почвах с токсичностью самого катиона водорода приходится сталкиваться очень редко.

Для дерново-подзолистых почв высокое содержание подвижного алюминия является важнейшей причиной, обуславливающей необходимость их известкования. По валовому содержанию в земной коре алюминий занимает третье место. Практически все дерново-подзолистые почвы (за исключением рыхлых песков) содержат огромные валовые количества Al (в среднем около 90% к массе почвы) и поэтому содержание его подвижных форм слабо связано с гранулометрическим составом. Главную роль играют условия, определяющие переход алюминия в подвижное состояние, прежде всего, уровень реакции и содержание гумуса. Установлено, что при взаимодействии почвы с 1н KCl при кислой реакции вытесняются не только обменный алюминий, но и не полностью нейтрализованные ионы гидратированного алюминия, а также его органоминеральные соединения. Поэтому наиболее точен термин «подвижный алюминий».

Взаимосвязи подвижного алюминия с гумусом весьма многообразны. С одной стороны, продукты жизнедеятельности растений, микроорганизмов (органические, гуминовые, фульвокислоты, а также низкомолекулярные кислоты, лимонная, яблочная, щавелевая и т. д.), являясь реагентами почвообразования, разлагают минералы, содержащие алюмосиликаты. При этом количество подвижного Al в сильнокислом интервале повышается с возрастанием содержания гумуса (до определенного предела). С другой стороны, за счет образования органоминеральных малорастворимых соединений и осаждения $Al(OH)_3$ снижается содержание подвижного Al, экстрагируемого 1н KCl. В хорошо гумусированных почвах это происходит при более низких значениях pH.

Образующиеся органоминеральные соединения алюминия с гуминовыми и фульвокислотами, как показали исследования, малотоксичны или нетоксичны для растений.

Влияние алюминия на сельскохозяйственные растения изучалось многими исследователями. Большинство из них связывают токсичность алюминия с ухудшением углеводного, белкового и фосфатного обмена у растений. Токсичность Al вызывает общее снижение проницаемости протоплазмы корневых клеток.

Алюминий не является элементом, необходимым для растений, в сколько-либо заметных количествах (по некоторым данным это ультрамикрэлемент, полезный растениям при совершенно ничтожных концентрациях). Та-

ким образом, стоит вопрос об угнетающем действии этого элемента и уровнях его токсичности (Шильников, Аканова и др., 2001; Шильников, Сычев и др., 2008).

А.Н. Небольсиным и З.П. Небольсиной (1997) были проведены десятки вегетационных опытов с различными культурами, в которых были использованы три основных методических подхода: 1) подбор почвы, различающейся по содержанию алюминия; 2) искусственное повышение содержания алюминия в почве путем внесения его растворимых солей или катионита, насыщенного им; 3) уменьшение содержания алюминия в почве путем известкования или связывание его в форме фосфатов. Подтверждено, что сельскохозяйственные растения обладают разной чувствительностью к алюминию. Вместе с тем и на одной культуре, в зависимости от свойств почв, токсичность этого элемента проявляется неодинаково.

Так, на почвах с близким содержанием Al (0,311 и 0,330 мг-экв/100 г) повышение содержания органического вещества до 4,5% увеличило урожай клевера при сильноокислой реакции почти в 10 раз. Аналогичные данные получены при обобщении результатов опытов, проведенных на естественных дерново-подзолистых почвах с различным содержанием гумуса. Сопоставление величин коэффициентов регрессии показывают, что токсичность алюминия для горчицы на почвах с содержанием гумуса 2–4% вдвое ниже, чем на малогумусных. Такие же закономерности отмечаются для клевера и льна.

Большое значение в снижении вредного действия алюминия почвы имеют фосфорные удобрения. Это объясняется либо химическим связыванием этого элемента, либо изменением обмена веществ в самих растениях.

Влияние фосфора на подвижность алюминия и его токсичность неоднозначно. Фосфаты алюминия высших степеней замещения, алюмогидроксифосфаты – малорастворимы, вследствие чего повышение содержания фосфора в почве (до определенных пределов) снижает подвижность и токсичность алюминия.

Однако при некотором избытке подвижного фосфора в почвах (более 25 мг/100 г) начинается образование более растворимых двух- и однозамещенных фосфатов, и подвижность алюминия может снова возрасть. Поэтому на почвах очень бедных фосфором при $pH_{KCl} 1,5$ урожайность культур чувствительных к кислотности будет низкой (на 20–35% ниже, чем при $pH 5,0$), а при повышенном содержании фосфора (15–25 мг на 100 г) снижение урожая несущественно. Эти факты, безусловно, должны учитываться при оптимизации доз внесения извести.

Важным показателем, обуславливающим вредные свойства кислых почв, являются также низкое содержание обменных оснований (кальция и магния). По отношению к валовым запасам кальция в почве его вынос сельскохозяйственными культурами невелик и составляет: зерновыми 30–40, корнеплодами (свекла, брюква) 60–120, бобовыми (клевер, люцерна) 120–250, овощами (капуста) 300–500 кг CaO с 1 га. Еще меньше вынос магния. Однако поступление кальция и магния из кислых почв в растения из-за антагонизма с катионами H, Al, Mn, Fe крайне затруднено и многие

культуры на кислых почвах (бобовые, капустные, лук, чеснок) испытывают их недостаток как элементов питания.

Наименьшее содержание обменных форм кальция и магния характерно для сильнокислых почв легкого гранулометрического состава (песчаных). Максимальное количество подвижного Са отличается при рН 5,5–8,5 для минеральных почв и рН 6,0–8,5 для органических почв. Эти закономерности будут отличаться для отдельных типов почв. По мере уменьшения кислотности и увеличения содержания илистых частиц, содержание обменных оснований закономерно возрастает. Значительная вариабельность данных внутри группы указывает на существенное влияние различий в содержании гумуса и минералогическом составе глинистых частиц, обуславливающих величину емкости поглощения почв (Шильников, Лебедева, 1987; Шильников, Сычев и др., 2008).

Немаловажным фактором, определяющим отрицательное действие кислотности на сельскохозяйственные растения, является избыточное накопление в почвах подвижных марганца и железа. При кислой реакции, с одной стороны, увеличивается подвижность этих элементов в почвах, с другой – усиливается их поглощение растениями, особенно при недостатке кальция и магния. Подзолистые и дерново-подзолистые почвы содержат очень большие валовые запасы как железа, так и марганца (марганца от 0,03 до 0,5%, железа от 0,7 до 5% к массе почвы). В зависимости от степени разрушения минералов, реакции почвы, условий увлажнения в легкоподвижные формы переходит от 0,01 до 1% валовых запасов этих элементов. Доступными для растений являются в основном восстановленные (двухвалентные) соединения Mn, Fe (около 80–85% общего содержания этих элементов в вытяжке 1N KCl). Содержание легкоподвижных форм марганца в подзолистых и дерново-подзолистых почвах колеблется в очень широком интервале от 0,005 до 0,355 мг-экв на 100 г.

А.Н. Небольсиним (1997) при обработке массива данных установлено наличие взаимосвязи между реакцией почв и содержанием легкоподвижного марганца (коэффициенты корреляции между pH_{KCl} и Ig_{Mn} для почв различного гранулометрического состава колеблется от 0,16 до 0,29). Теснота такой зависимости весьма слабая. В то же время для конкретных почв в опытах, где величина рН изменялась внесением разных доз извести, теснота связи $pH_{KCl} - Ig_{Mn}$ очень высокая ($R = 0,87-0,99$, по 196 опытам).

В условиях региона имеются почвы как с явно недостаточным содержанием марганца (как элемента питания), так и избыточным, токсичным для растений. Содержание легкоподвижного марганца слабо связано с гранулометрическим составом почв и содержанием гумуса, хотя отмечается, что подзолисто-глееватые и подзолисто-глеевые почвы (т.е. почвы временно и постоянно избыточно-увлажненные) содержат большее количество гумуса – 5–6% и легкоподвижного марганца – до 0,35 мг-экв на 100 г почвы.

Установлено, что в почвах с высоким начальным содержанием легкоподвижного марганца (при кислой реакции) при известковании его содержание падает более резко, чем в почвах бедных марганцем. При $pH_{KCl} 6,75$ в дерново-подзолистых почвах нормального увлажнения содержание легкоподвижного марганца снижается до 0,006–0,008 (в среднем 0,007) мг-экв на 100 г

почвы. Этот уровень реакции соответствует образованию в почвах оксидов марганца Mn_2O_3 и MnO_2 , которые обладают малой растворимостью.

Аналогичным образом влияют почвенные свойства и на содержание легкоподвижного железа. Это объясняется тем, что Mn , Fe и обменный H^+ образуют в почве единую окислительно-восстановительную систему, в которой каждый из указанных катионов зависит от других.

Так как валовые запасы железа в почве очень велики (около 60–80 т/га Fe_2O_3), то содержание легкоподвижного железа, как и марганца, слабо связано с гранулометрическим составом почв и определяется, главным образом, кислотнo-щелочными и окислительно-восстановительными условиями.

В этом отношении показательны результаты одного из опытов, проведенного в СЗНИИСХ по изучению влияния переувлажнения на структуру почвенной кислотности, в котором в сосудах емкостью 8 л помещали разные кислые почвы. В одной серии сосудов в течение 6 месяцев поддерживали условия нормального увлажнения (60% от полной влагоемкости), в другой серии создавали условия переувлажнения (100% влагоемкости). Через определенные промежутки времени в свежееотобранных почвенных образцах определяли подвижные формы Al , Mn , Fe .

Установлено, что при избыточном увлажнении содержание легкоподвижных марганца и железа возрастает в несколько раз, а осаждение их в виде растворимых соединений происходит при более высоких значениях pH , чем в почвах нормального увлажнения. Механизм осаждения марганца здесь иной: если в почвах нормального увлажнения марганец осаждается в основном в виде оксидов Mn_2O_3 и MnO_2 , то в почвах избыточного увлажнения осаждение происходит при $pH_{KCl} > 8-9$ в виде $Mn(OH)_2$ и $MnCO_3$. Существенное влияние на содержание легкоподвижных марганца и железа оказывает и присутствие катионов-восстановителей, в частности аммония, вносимого с минеральными азотными удобрениями.

Отношение растений к кислотности почв

Сельскохозяйственные растения значительно отличаются друг от друга по своему отношению к кислотности и известкованию почвы и формируют максимальный урожай при различных значениях pH , гидролитической кислотности и степени насыщенности основаниями (табл. 17).

Для каждого растения в случае севооборота, в котором оно выращивается, ориентируются на слабокислую реакцию почвы, соответствующую примерно $pH_{вод}$ 6,2–6,5 или pH_{KCl} 5,6–5,8 (Аканова, 2001).

Культуры, приспособленные к кислым почвам, толерантны к высокой концентрации Al^{3+} . Культуры на карбонатных почвах не имеют защитного барьера против токсичности Al^{3+} , в связи с чем возделывание их на кислых почвах без известкования невозможно.

Были выявлены оптимальные значения активной кислотности для основной массы сельскохозяйственных растений в условиях известкования кислых дерново-подзолистых почв, то есть в условиях, когда в питательной среде содержится значительное количество кальция (табл. 17).

Таблица 17

**Оптимальный интервал рНКСI сельскохозяйственных культур
от известкования на дерново-подзолистых почвах**

Культура	рН _{КСI}	Доза СаСО ₃ , т/га				Оптимальный интервал рН _{КСI}
		2–4	4–6	6–8	более 8	
Пшеница озимая	4,5 и ниже	3,9	4,6	5,4	6,6	6,0–7,0
	4,6–5,0	2,7	4,0	4,6	5,0	
	5,1–5,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
Рожь озимая	4,5 и ниже	2,0	3,0	3,4	3,8	5,5–6,5
	4,6–5,0	1,7	2,0	2,4	2,8	
	5,1–5,5	0,5	1,0	1,2	1,2	
Ячмень яровой	4,5 и ниже	3,6	4,0	4,5	5,1	6,3–7,0
	4,6–5,0	3,0	3,6	4,1	4,4	
	5,1–5,5	1,4	1,8	2,0	2,0	
Овес	4,5 и ниже	2,0	2,3	2,6	2,9	5,4–6,0
	4,6–5,0	1,7	2,0	2,2	2,5	
	5,1–5,5	0,5	1,0	1,2	1,2	
Пшеница яровая	4,5 и ниже	2,0	2,4	2,6	2,8	5,8–6,4
	4,6–5,0	1,0	1,5	2,0	2,0	
	5,1–5,5	0,5	0,8	0,8	1,0	
Картофель	4,5 и ниже	10	14	18	20	5,0–5,5
	4,6–5,0	13	17	17	10	
	5,1–5,5	5	5	5	–	
Кормовые корнеплоды	4,5 и ниже	80	90	120	140	6,2–7,0
	4,6–5,0	20	40	50	60	
	5,1–5,5	10	15	15	15	
Кукуруза (на силос)	4,5 и ниже	40	60	70	80	5,6–6,3
	4,6–5,0	20	30	40	40	
	5,1–5,5	10	15	20	20	
Однолетние травы (сено)	4,5 и ниже	12	14	16	16	5,4–6,0
	4,6–5,0	6	8	10	10	
	5,1–5,5	5	8	8	8	
Многолетние травы (сено)	4,5 и ниже	18	25	27	30	5,6–6,4
	4,6–5,0	12	15	18	20	
	5,1–5,5	9	12	13	15	
Сеяные луга и пастбища – бобово-злаковые (сено)	4,5 и ниже	10	15	18	20	5,4–6,0
	4,6–5,0	6	8	12	–	
	5,1–5,5	4	–	–	–	
Естественные луга	4,5 и ниже	3	4	4	–	5,3–5,7
	4,6–5,0	2	2	–	–	

По отношению к реакции среды и по отзывчивости на известкование сельскохозяйственные культуры разделяются на пять групп:

1) наиболее чувствительные к кислотности (люцерна, красный клевер, сахарная и столовая свекла, конопля), требующие рН 6,5–7,2;

2) чувствительные к повышенной кислотности (ячмень, озимая и яровая пшеница, кукуруза, просо, соя, фасоль, горох, кормовые бобы, клевер шведский, подсолнечник, капуста, кабачок, лук, салат, лисохвост, кострец), оптимальная величина рН для которых 5,7–6,2;

3) слабо чувствительные к повышенной кислотности (рожь, овес, просо, гречиха, тимофеевка, томат, редис, огурец, морковь, овсяница), хорошо возделываемые в широком интервале рН 4,6–6,0;

4) лен легко переносит умеренную кислотность. Оптимум рН 5,2–5,7, положительно отзывается на известкование при рН 5,9–6,0 с соблюдением оптимального соотношения в почве Са : Mg : К;

5) люпин и сераделла малочувствительны к кислотности почвы, высокая продуктивность отмечается при рН 4,8–5,2, положительно отзывается на известкование при возделывании на сильнокислых почвах.

В лаборатории известкования ВИУА и в дальнейшем ВНИИАгрохимии, несмотря на многочисленные данные об оптимальных для сельскохозяйственных растениях значениях рН, полученных как отечественными, так и иностранными исследователями, была проведена работа с целью установить отношение сельскохозяйственных растений к активной кислотности почвы в определенных условиях, то есть в условиях известкования почвы, когда в поглощающем комплексе последней и в почвенном растворе имеется значительная концентрация ионов кальция. При этом выяснялось также отношение растений к другим формам почвенной кислотности и к степени насыщенности почв основаниями.

Эта работа выполнялась группой сотрудников ВИУА в течение нескольких лет. В результате этой работы были выявлены оптимальные значения активной кислотности для основной массы сельскохозяйственных растений в условиях известкования кислых дерново-подзолистых почв, т.е. в условиях, когда в питательной среде содержится значительное количество кальция (табл. 18).

Таблица 18

**Оптимум рН для сельскохозяйственных растений
при известковании подзолистых почв**

Культура	рН водной вытяжки	
	основной интервал	широкий интервал
Пшеница яровая	6,5–7,3	
Пшеница озимая	6,5–7,3	
Ячмень	6,0–7,3	
Рожь	7,0–7,4	
Овес	7,0–7,7	
Кукуруза	6,5–7,0	5,9–7,5
Гречиха	7,0–7,4	
Просо	5,5–7,5	
Клевер	6,0–6,7	4,7–7,5
Вика	6,3–6,8	
Соя	6,5–7,1	
Горох	6,8–7,4	
Фасоль	7,4–7,6	6,5–7,6
Люпин	5,3–6,7	6,4–7,5
Сераделла	5,0–6,3	
Картофель	4,7–6,3	4,6–6,9
Топинамбур	7,0–7,2	4,7–7,0
Томаты	6,3–6,7	
Свекла столовая	6,3–6,9	6,0–7,2
Свекла кормовая	6,2–7,0	
Капуста	6,7–7,4	
Тимофеевка	5,0–6,5	
Райграс	7,0–7,5	
Лисохвост	6,5–7,5	4,5–7,8
Ежа сборная	6,9–7,4	
Лен	6,0–6,3	6,0–7,5
Конопля	7,1–7,4	
Горчица	7,0–7,5	6,0–6,9
Подсолнечник	6,0–6,8	
Мак	6,8–7,2	

Было выявлено также отношение сельскохозяйственных растений к обменной и гидролитической кислотности и степени насыщенности основаниями. Согласно главному выводу этой работы, наиболее ясное представление об отношении растений к известкованию можно составить по величинам рН водной, а также солевой вытяжек, устанавливаемым при известковании почвы. Определенный интервал оптимальных значений рН является характерным для каждого растения. Если же идет речь о севообороте, в котором выращиваются разные растения, отличающиеся друг от друга по своему отношению к почвенной кислотности, то в этом случае надо ориентироваться на слабокислую реакцию почвы, соответствующую примерно рН водной вытяжки (6,2–6,5) или рН солевой вытяжки (5,6–5,8).

Эти исследования были продолжены Н.И. Алямовским. С нескольких сотен полевых опытов с дозами извести были отобраны почвенные образцы. В этих образцах определялись формы почвенной кислотности и степень насыщенности почв основаниями. Сопоставление результатов этих аналитических исследований с величинами урожая сельскохозяйственных растений при внесении различных доз извести дало возможность выявить, при каких значениях рН и других показателей физико-химических свойств почвы известкование дает наиболее высокий эффект. Результаты этой работы показали, что наиболее точно отношение растений к известкованию определяется значением рН, которое устанавливается в почве под влиянием извести. Вывод о необходимости понижения избыточной кислотности почвы до слабокислой реакции – основное положение современного известкования кислых почв, из которого нужно исходить при решении всех вопросов, в частности о потребностях в известковании и дозах извести.

Исследования показали, что наибольший эффект известкование дает тогда, когда растения произрастают на известкованной почве в течение всего цикла своего развития, например, при выращивании растений в период рассады и после пересадки последней (однолетки) или в течение первого и второго года развития (двулетники). Очень большое значение при этом имеет внесение извести в начальный период вегетации, так как это также дает значительный эффект. Исследования О.К. Кедрова-Зихмана, С.С. Ярусова, А.Н. Кожевниковой, Ф.И. Семеновой о чувствительности растений к кислотности почвы в разные периоды их развития стали теоретической основой для разработки способов применения малых доз извести:

1) заделывание в почву культиватором или даже бороной при предпосевной обработке почвы под покровную культуру для многолетних трав;

2) внесение извести при заделке в почву вместе с навозом или другими органическими, а также минеральными удобрениями под плуг перед посевом покровной для трав культуры;

3) внесение извести в лунки (лучше всего вместе с другими удобрениями при высаживании рассады).

При дальнейшем понижении доз известковых удобрений до $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{10}$ нормальной или еще меньшей известкование не дает устойчивых результатов.

Таким образом, отзывчивость растений на известкование в основном определяется их отношением к почвенной кислотности, так как устранение избыточной почвенной кислотности не только само по себе оказывает положительное действие на рост и развитие растений, но создает также благоприятные условия для проявления положительного действия

известкования в других отношениях. Поэтому при известковании почвы в сельскохозяйственном производстве можно с достаточной точностью устанавливать дозы извести, учитывая только почвенную кислотность.

Очередность известкования и определение оптимальных доз извести

Оптимальные показатели рН колеблются в широких пределах и зависят от множества факторов: структуры посевных площадей в севообороте, типа и гранулометрического состава почвы, обеспеченности почвы гумусом, фосфором и других показателей. Оптимум рН уменьшается с увеличением содержания в почве органического вещества. Отклонение показателя рН от оптимальных значений приводит к снижению урожая зерна (Vostal, Balik, 1988; Vank, Najmanová et al., 1997; Небольсин, Сычев и др., 2000) (табл. 19).

Таблица 19

Средние прибавки урожая основных сельскохозяйственных культур и окупаемость известкования на почвах с различной степенью кислотности

рН почвы	Дозы извести т/га							
	2-4		4,1-6		6,1-8		8,1-12	
	прибавка, ц/га	окупаемость, ц/т	прибавка, ц/га	окупаемость, ц/т	прибавка, ц/га	окупаемость, ц/т	прибавка, ц/га	окупаемость, ц/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рожь озимая								
<4,5	2,0	0,7	3,0	0,6	3,4	0,5	3,8	0,4
4,6-5,0	1,7	0,6	2,0	0,4	2,4	0,3	2,8	0,3
5,1-5,5	0,5	0,2	1,0	0,2	1,2	0,2	1,2	0,1
Овес								
<4,5	2,0	0,7	2,3	0,5	2,6	0,4	2,9	0,3
4,6-5,0	1,7	0,6	2,0	0,4	2,2	0,3	2,5	0,3
5,1-5,5	0,5	0,2	1,0	0,2	1,2	0,2	1,2	0,1
Ячмень яровой								
<4,5	3,6	1,2	4,0	0,8	4,5	0,6	5,1	0,5
4,6-5,0	3,0	1,0	3,6	0,7	4,1	0,6	4,4	0,4
5,1-5,5	1,4	0,5	1,8	0,4	2,0	0,3	2,0	0,2
Картофель								
<4,5	13,0	4,3	17,0	3,4	18,0	2,6	20,0	2,0
4,6-5,0	10,0	3,3	14,0	2,8	17,0	2,4	10,0	1,0
5,1-5,5	5,0	1,7	5,0	1,0	5,0	0,7	-	-
Многолетние травы (сено)								
<4,5	18,0	6,0	25,0	5,0	27,0	3,9	30,0	3,0
4,6-5,0	12,0	4,0	15,0	3,0	18,0	2,6	20,0	2,0
5,1-5,5	9,0	3,0	12,0	2,4	18,0	2,6	15,0	1,5
Сеяные сенокосы (сено)								
<4,5	10,0	3,3	15,0	3,0	18,0	2,6	20,0	2,0
4,6-5,0	6,0	2,0	8,0	1,6	12,0	1,7	17,0	1,7
5,1-5,5	4,0	1,3	5,0	1,0	7,0	1,0	10,0	1,0
Свекла столовая								
<4,5	30,0	10,0	29,0	5,8	32,0	4,6	35,0	3,5
4,6-5,0	20,0	6,7	22,0	4,4	24,0	3,4	28,0	2,8
5,1-5,5	15,0	5,0	20,0	4,0	22,0	3,1	24,0	2,4
Морковь								
<4,5	25,0	8,3	29,0	5,8	31,0	4,4	34,0	3,4
4,6-5,0	19,0	6,3	21,0	4,2	23,0	3,3	27,0	2,7
5,1-5,5	10,0	3,3	12,0	2,4	14,0	2,0	17,0	1,7
Капуста белокочанная								
<4,5	40,0	13,3	44,0	8,8	41,0	5,9	39,0	3,9
4,6-5,0	35,0	11,7	41,0	8,2	39,0	5,6	37,0	3,7
5,1-5,5	20,0	6,7	25,0	5,0	30,0	4,3	30,0	3,0

Оптимизация известкования почв состоит из двух отдельных задач:

- а) определение степени нуждаемости (и очередности) в известковании;
- б) определение оптимальных для конкретной почвы доз извести.

Степень нуждаемости почв в известковании является признаком вероятной эффективности действия извести и требуется при установлении очередности известкования почв. Чаще всего необходимость определения очередности известкования в настоящее время возникает из-за ограниченности ресурсов (нехватки извести, средств механизации и т. д.). В этом случае целесообразно известковать в первую очередь только почвы наиболее нуждающиеся, с целью получения наибольшей отдачи.

В таблицах 20, 21, составленных на основании обобщения большого числа полевых опытов, приведены уровни кислотности (pH_{KCl}) почв, при которых известкование следует проводить в первую очередь.

Если реакция почв на 0,2–0,4 единицы pH выше – известкование выполняют во вторую очередь, если уровень реакции близок к оптимальному уровню, проводят поддерживающее известкование. Обычно поддерживающее известкование применяется один раз в 2–3 года дозами, компенсирующими вынос кальция и магния урожаями и неизбежные потери за счет вымывания (1,5–2 т/га $CaCO_3$).

Таблица 20

**Уровни кислотности (pH_{KCl}) почв
в севооборотах, при которых необходимо первоочередное известкование.
Почвы нормального увлажнения**

Содержание гумуса, %	Типы севооборотов								
	со льном, картофелем, люпином			с картофелем, бобово-злаковыми травами			с культурами чувствительными к кислотности		
	содержание подвижного P_2O_5 (по Кирсанову), мг/100 г								
	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Песчаные и супесчаные почвы									
<1	4,6	4,8	5,0	4,8	5,0	5,2	Не возделывают		
1–2	4,2	4,4	4,6	4,4	4,6	5,0	4,8	5,0	5,2
2–3	4,1	4,3	4,5	4,3	4,5	4,7	4,6	4,8	5,0
>3	4,0	4,2	4,4	4,2	4,4	4,6	4,4	4,6	4,8
Легко- и среднесуглинистые почвы									
1–2	4,9	5,1	5,2	5,0	5,2	5,4	5,4	5,6	5,8
2–3	4,5	4,7	4,9	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6
3–4	4,3	4,5	4,7	4,6	4,8	5,0	5,0	5,2	5,4
>4	4,2	4,4	4,6	4,4	4,6	4,8	4,6	4,8	5,0
Тяжелосуглинистые и глинистые почвы									
2–3	4,9	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,8	6,0	6,2
3–4	4,7	4,9	5,1	5,2	5,4	5,6	5,6	5,8	6,0
4–5	4,5	4,7	4,9	5,0	5,2	5,4	5,4	5,6	5,8
>5	4,3	4,5	4,7	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6

Таблица 21

Уровни кислотности (рН_{KCl}) почв в севооборотах, при которых необходимо первоочередное известкование. Почвы избыточного увлажнения

Содержание гумуса, %	Типы севооборотов								
	со льном, картофелем, люпином			с картофелем, бобово-злаковыми травами			с культурами чувствительными к кислотности		
	содержание подвижного P ₂ O ₅ (по Кирсанову), мг/100 г								
	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Песчаные и супесчаные почвы									
1–2	4,8		5,0	5,2	5,2	5,4	5,6	Не воз- делыва- ют	
2–3	4,6	4,8	5,0	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6
3–4	4,4	4,6	4,8	4,8	5,0	5,2	5,0	5,2	5,4
>4	4,2	4,4	4,6	4,6	4,8	5,0	4,8	5,0	5,2
Легко- и среднесуглинистые почвы									
2–3	5,0	5,2	5,4	5,4	5,6	5,8	5,6	5,8	6,0
3–4	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6	5,4	5,6	5,8
4–5	4,6	4,8	5,0	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6
>5	4,4	4,6	4,8	4,8	5,0	5,2	5,0	5,2	5,4
Тяжелосуглинистые и глинистые почвы									
2–3	5,2	5,4	5,6	5,6	5,8	6,0	6,0	6,2	6,2
3–4	5,0	5,2	5,4	5,4	5,6	5,8	5,8	6,0	6,2
4–5	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6	5,6	5,8	6,0
5–6	4,6	4,8	5,0	5,0	5,2	5,4	5,4	5,6	5,8
>6	4,4	4,6	4,8	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6

Так как действие извести продолжается в течение многих лет, то не может быть и речи об известковании под какую-либо одну культуру. Поэтому при проведении известкования приходится учитывать отношение к извести всех культур севооборота, а если их требования к уровню реакции очень различны, то принимать во внимание отношение наиболее хозяйственно-ценных (доходных) культур.

В таблицах 22, 23 приведены оптимальные уровни кислотности (рН_{KCl}) почв для севооборотов с культурами, различающимися по чувствительности к кислотности.

Поскольку массовое определение легкоподвижных форм фитотоксических элементов Al, Mn, Fe в регионе не делают, на основании анализов 1000 образцов по 15 параметрам были рассчитаны 47 эмпирических уравнений, связывающих величину гидролитической кислотности с рН почвы и с учетом ее гранулометрического состава и содержания гумуса. В общем виде эти уравнения имеют вид:

$$y = a - b \ln \text{pH}. \quad (1)$$

При этом y – полная гидролитическая кислотность (Н_г), которой обладает искомая кислая почва или остаточная гидролитическая кислотность при оптимальном уровне реакции для данного севооборота, которую нет необходимости нейтрализовать.

Таблица 22

Оптимальные уровни кислотности (рНКСИ) почвы различных типов для севооборотов на дерново-подзолистых почвах избыточного увлажнения в зависимости от гранулометрического состава, содержания гумуса и подвижного фосфора

Содержание гумуса, %	Типы севооборотов								
	со льном, картофелем, люпином			с картофелем, бобово-злаковыми травами			овощные, овоще-кормовые с культурами чувствительными к кислотности		
	содержание подвижного P ₂ O ₅ (по Кирсанову), мг/100 г								
	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Песчаные и супесчаные почвы									
<1	5,4	5,6	5,8	5,6	5,8	6,0	Не возделывают		
1–2	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,8	5,6	5,8	6,0
2–3	4,9	5,1	5,3	5,1	5,3	5,5	5,4	5,6	5,8
>3	4,8	5,0	5,2	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6
Легко- и среднесуглинистые почвы									
1–2	5,7	5,9	6,0	5,8	6,0	6,2	6,2	6,4	6,6
2–3	5,3	5,5	5,7	5,6	5,8	6,0	6,0	6,2	6,4
3–4	5,1	5,3	5,5	5,4	5,6	5,8	5,8	6,0	6,2
>4	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6	5,4	5,6	5,8
Тяжелосуглинистые и глинистые почвы									
2–3	5,7	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,6	6,8	7,0
3–4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,2	6,4	6,4	6,6	6,8
4–5	5,3	5,5	5,7	5,8	5,9	6,2	6,2	6,4	6,6
>5	5,1	5,3	5,5	5,6	5,8	6,0	6,0	6,2	6,4

Таблица 23

Оптимальные уровни кислотности (рНКСИ) почвы различных типов севооборотов на дерново-подзолистых почвах нормального увлажнения в зависимости от гранулометрического состава, содержания гумуса и подвижного фосфора

Содержание гумуса, %	Типы севооборотов								
	со льном, картофелем, люпином			с картофелем, бобово-злаковыми травами			овощные, овоще-кормовые с культурами чувствительными к кислотности		
	содержание подвижного P ₂ O ₅ (по Кирсанову), мг/100 г								
	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10	15–25	10–15	<10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Песчаные и супесчаные почвы									
<1	5,4	5,6	5,8	5,6	5,8	6,0	Не возделывают		
1–2	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,8	5,6	5,8	6,0
2–3	4,9	5,1	5,3	5,1	5,3	5,5	5,4	5,6	5,8
>3	4,8	5,0	5,2	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6
Легко- и среднесуглинистые почвы									
1–2	5,7	5,9	6,0	5,8	6,0	6,2	6,2	6,4	6,6
2–3	5,3	5,5	5,7	5,6	5,8	6,0	6,0	6,2	6,4
3–4	5,1	5,3	5,5	5,4	5,6	5,8	5,8	6,0	6,2
>4	5,0	5,2	5,4	5,2	5,4	5,6	5,4	5,6	5,8
Тяжелосуглинистые и глинистые почвы									
2–3	5,7	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,6	6,8	7,0
3–4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,2	6,4	6,4	6,6	6,8
4–5	5,3	5,5	5,7	5,8	5,9	6,2	6,2	6,4	6,6
>5	5,1	5,3	5,5	5,6	5,8	6,0	6,0	6,2	6,4

Величину нейтразуемой гидролитической кислотности (ΔH_r) находят как разность между H_r при оптимальном рН и фактическом.

После трансформации уравнение для расчета ΔH_r приобретает вид:

$$\Delta H_r = b(\ln \text{pH}_{\text{опт}} - \ln \text{pH}_{\text{факт.}}). \quad (2)$$

Эти уровни учитывают наиболее вероятное содержание фитотоксичных элементов (Al, Mn, Fe), гранулометрический состав почв, содержание гумуса и подвижных форм фосфора, т.е. наиболее значимые факторы, влияющие на оптимальный интервал реакции.

Определение оптимальных доз извести является весьма сложной самостоятельной задачей. Применявшиеся ранее и до сих пор методы определения доз извести по величине гидролитической кислотности или по таблицам, в которых дозы извести связаны с гранулометрическим составом и величиной рН, не учитывали многообразие свойств кислых почв и устарели.

ВИУА совместно с СЗНИИСХ был предложен новый метод оптимизации доз извести по комплексу параметров: тип севооборота, условия увлажнения, гранулометрический состав, объемная масса почв, мощность пахотного горизонта, содержание гумуса и подвижных форм фосфора, а также опосредованно, через разработанные математические модели – содержание токсичных элементов (Al, Mn, Fe) и тяжелых металлов.

Определение гидролитической кислотности в лабораторных условиях не очень точно отражает реальные процессы, происходящие в почвах при известковании. Дело в том, что в произвесткованных почвах усиливаются многие микробиологические процессы, например разложение органических веществ, нитрификация и т.п., в результате чего образуются дополнительные количества кислых продуктов, что необходимо учитывать при оптимизации доз извести. С этой целью на основании 340 лабораторных опытах с кислыми почвами продолжительностью в 1,5 года были определены поправочные коэффициенты (К), компенсирующие кратковременность взаимодействия реагентов с почвами при анализах. Эти коэффициенты для песчаных почв составляют 1,25; супесчаных – 1,30; легко- и среднесуглинистых – 1,35; для тяжелосуглинистых – 1,40 и глинистых – 1,50.

На основании обобщения литературных данных была определена средняя объемная масса ($d - \text{г/см}^3$) дерново-подзолистых и подзолисто-глеевых почв разного гранулометрического состава с различным содержанием гумуса. Далее используют формулу для расчета доз извести. Кроме нейтразуемой гидролитической кислотности, она включает объемную массу почвы (d), коэффициент на неполноту вытеснения (K), мощность пахотного горизонта (h) и после преобразования единиц измерения имеет следующий вид:

$$D_{\text{т/га}} = \frac{100 \cdot \Delta H_r \cdot K \cdot 5 \cdot d \cdot h}{\% \text{CaCO}_3}, \quad (3)$$

где ΔH_2 – кислотность, которую нужно нейтрализовать для достижения оптимального уровня pH, равную $b (\ln pH_{\text{опт}} - \ln pH_{\text{факт}})$;

K – поправочный коэффициент, обусловленный кратковременностью взаимодействия почвы с реагентом при анализе;

5 – трансформированный пересчетный коэффициент из мг-экв в т CaCO_3 .

h – мощность пахотного горизонта, м;

d – удельная объемная масса почвы, г/см³.

Поскольку коэффициенты b , K , d , 5 для каждого гранулометрического состава и содержания гумуса любой конкретной почвы величины постоянны, мы объединили их в свободный коэффициент

$$M = 5 b K d.$$

Для практических задач целесообразно округление величин M до целых чисел. Формула для расчета оптимальных доз извести приобретает следующий вид:

$$D_{\text{т/га}} = \frac{100 \cdot (\ln pH_{\text{опт}} - \ln pH_{\text{факт}}) M \cdot h}{\% \text{CaCO}_3} \quad (4).$$

В таблице 24 представлены названные выше величины и сводные коэффициенты для расчета доз извести для почв с широким диапазоном свойств.

Так как погрешность определения гумуса, обусловленная пестротой почвенного покрова и точностью анализов, при массовых определениях превышает $\pm 0,3-0,4\%$, то при расчетах используют данные с округлением до $0,5\%$. Промежуточные значения коэффициента M могут быть найдены методом интерполяции, т.е. как среднее из двух граничных значений.

При расчетах необходимо учитывать содержание в известковых материалах нейтрализующих веществ (Ca и Mg), их активность, которая зависит от плотности породы и тонины помола. Приводим алгоритм (последовательность) определения доз извести и очередности известкования по методу СЗНИИСХ.

1. По степени увлажнения почв, их гранулометрическому составу, содержанию гумуса и подвижного фосфора (по Кирсанову) для соответствующего севооборота определяется очередность известкования (табл. 20, 21). При известковании техногенно загрязненных почв первоочередное известкование проводят на сильно загрязненных и средне загрязненных почвах.

2. По тем же критериям находят оптимальный уровень реакции – $pH_{\text{КСГ}}$.

3. Используя данные таблицы 23 по гранулометрическому составу конкретной почвы и содержанию в ней гумуса, находим коэффициент M .

4. Имея данные о фактической реакции почвы, глубине пахотного слоя и качестве известкового материала, по формуле 4 рассчитываем оптимальную дозу извести. Полученную величину округляем до $0,5$ т/га, так как существующими механизмами невозможно обеспечить большую точность внесения.

Таблица 24

**Исходные данные для расчета доз извести для дерново-подзолистых
и дерново-глебовых почв**

Содержание, %		Объемная масса (d), г/см ³	Коэффициенты		
илистых частиц	гумуса		б	К	М
1	2	3	4	5	6
Песчаные почвы					
5	1	1,70	4,29	1,25	46
	2	1,60	7,68		77
	3	1,50	11,07		104
	4	1,40	14,46		126
Супесчаные почвы					
15	1	1,60	5,54	1,30	58
	2	1,55	8,93		90
	3	1,50	12,32		120
	4	1,45	15,71		148
	5	1,40	19,11		174
	6	1,35	22,50		197
Легкосуглинистые почвы					
25	1	1,50	6,79	1,35	69
	2	1,45	10,18		100
	3	1,40	13,57		128
	4	1,35	16,96		154
	5	1,30	20,36		179
	6	1,25	23,75		200
	7	1,20	27,14		220
	8	1,15	30,54		237
Среднесуглинистые почвы					
35	1	1,40	8,21	1,35	77
	2	1,35	11,61		106
	3	1,30	15,00		132
	4	1,25	18,39		155
	5	1,20	21,79		176
	6	1,15	25,18		195
	7	1,10	28,57		212
	8	1,05	31,96		226
	9	1,00	35,36		239
Тяжелосуглинистые почвы					
45	1	1,30	9,64	1,40	88
	2	1,25	13,04		114
	3	1,20	16,43		138
	4	1,15	19,82		159
	5	1,10	23,21		179
	6	1,05	26,61		195
	7	1,00	30,00		210
	8	0,95	33,39		222
	9	0,90	36,79		232
	10	0,85	40,18		239
Глинистые почвы					
75	1	1,25	13,75	1,50	129
	2	1,20	17,14		154
	3	1,15	20,54		177
	4	1,10	23,93		197
	5	1,05	27,32		215
	6	1,00	30,71		230
	7	0,95	34,11		243
	8	0,90	37,50		253
	9	0,85	40,89		260
	10	0,80	44,29		265

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВ АЗОТОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЯХ

Процессы ассимиляции и круговорота азота являются существенной чертой развития природного плодородия почвы. В связи с этим И.В. Тюрин (1937) считал возможным рассматривать запасы общего азота в почвах в качестве условного количественного показателя их потенциального плодородия, и такой же условной мерой действительного или эффективного плодородия могут служить количества азота, ежегодно используемые растительностью из этих запасов.

Азот является одним из самых сложных питательных элементов растений. Как избыток, так и недостаток доступного для растений азота в почве приводит к снижению урожая и качества растениеводческой продукции. Оптимизацию азотного питания осуществляют по результатам ежегодной почвенно-растительной диагностики азотного питания в течение вегетационного периода.

От степени обеспеченности растений азотом зависит величина урожая. В свободном состоянии азот является инертным газом, которого в атмосфере содержится 75,5% от ее веса. В элементарной форме азот не может усваиваться растениями, за исключением бобовых, которые используют азотные соединения развивающимися на их корнях клубеньковыми бактериями, способными усваивать атмосферный азот и преобразовывать его в доступную для высших растений форму. Азот поглощается растениями только после соединения его с другими элементами. Наиболее доступными для растений формами азота в почве являются аммонийная и нитратная. Аммоний, являясь восстановленной формой азота, при поглощении растениями легко используется в синтезе аминокислот и белков, который возможен только при участии восстановленных форм азота. Синтез аминокислот и белков из восстановленных форм азота происходит быстрее и с меньшими затратами энергии, чем из нитратов, для восстановления которых в растении до аммиака необходимы затраты дополнительной энергии.

Однако нитратная форма азота является более безопасной для растений, чем аммиачная, так как высокие концентрации аммиака в тканях растений вызывают их отравление и гибель. Аммиак может накапливаться в растении, если не хватает углеводов, которые необходимы для синтеза аминокислот и белков. Недостаток углеводов в растениях наблюдается в начале их вегетации, когда ассимиляционная поверхность листьев не развилась настолько, чтобы удов-

летворить потребность растений в углеводах. Поэтому аммиачный азот может быть токсичен для культур, семена которых бедны углеводами (свекла и др.). По мере развития ассимиляционной поверхности и синтеза углеводов эффективность аммиачного питания возрастает, и растения усваивают лучше аммиак, чем нитраты. В начальный период культуры должны обеспечиваться азотом в нитратной форме, а такие культуры, как картофель, клубни которого богаты углеводами, могут использовать азот в аммиачной форме.

При недостатке азота замедляется рост растений, сокращается вегетационный период, уменьшается содержание белка и снижается урожай. Азот из всех элементов питания оказывает наибольшее влияние на урожайность и качество продукции.

Наибольшие трудности для агрохимической диагностики представляет оценка обеспеченности растений азотом. Быстрая минерализация почвенного азота, связывание его почвенными микроорганизмами, передвижение нитратов по вертикальному профилю почвы и их потери с грунтовыми водами не позволяют использовать для диагностики азотного питания методы, аналогичные тем, которые применяют при обследовании почв на содержание подвижных фосфора и калия. Во-первых, это связано с тем, что при проведении агрохимического обследования анализируется только пахотный слой и в редких случаях пахотный и подпахотный, и поэтому полученные данные не могут дать полного представления об обеспеченности почв азотом, поскольку растения используют нитраты из всего корнеобитаемого слоя. Во-вторых, периодическое обследование один раз в 4–7 лет, как это принято в агрохимической службе, не может учесть всего многообразия круговорота азота и тех скоротечных изменений азотного режима, которые происходят в почве под влиянием различных факторов. Сезонная динамика нитратов на одном и том же участке изменяется по годам в зависимости от температурных условий и количества осадков и сильно меняется по срокам проведения обследования. Поэтому для целей диагностики приемлемо только ежегодное и оперативное обследование, охватывающее основной корнеобитаемый слой.

Главное внимание должно быть уделено диагностике азотного режима почвы и питания растений с целью определения доз азотных удобрений, восполняющих разницу между потребностью сельскохозяйственных культур в азоте для создания планируемых урожаев и способностью почвы обеспечить эти культуры доступным азотом (Никитин, 2013).

Азот в различных типах почв представлен в основном органическими соединениями. Минеральный азот составляет 1–2% от общего его количества в почве. В состав минерального азота входят нитраты, обменный и необменный аммоний. Содержание и соотношение этих форм минерального азота зависит от целого комплекса факторов как природного, так и антропогенного происхождения.

Содержание минерального азота в почве является динамичной величиной, ввиду его зависимости от действия множества разнонаправленных факторов. Именно из-за своей динамичности минеральный азот представляет наибольший интерес при оценке азотного режима тех или иных почв.

Наибольшей подвижностью органических соединений азота отличаются каштановые, черноземные и серые лесные почвы (табл. 25).

Таблица 25

Содержание различных форм азота в важнейших типах почв России

Почвы	Азот, % от общего содержания		
	легкогидролизующий и минеральный	трудногидролизующий	негидролизующий
Дерново-подзолистые	8–11	10–20	69–82
Торфяно-глеевые	2–3	18–20	77–80
Дерново-аллювиальные	6–10	20–25	64–73
Лугово-карбонатные	9–12	8–10	78–82
Серые лесные	8–13	10–24	60–79
Черноземы	5–14	12–28	62–82
Каштановые	12–15	15–19	66–73

Низкая подвижность органического азота характерна для торфяно-глеевых почв северо-западных регионов России. Для этих почв характерна высокая доля негидролизующей формы органического азота. Это же относится и к лугово-карбонатным почвам.

Колебания содержания различных форм азота в дерново-подзолистых и серых лесных почвах находятся в следующих пределах: минеральный азот – 1,3–1,4%, легкогидролизующий азот – 5,7–9,3%, трудногидролизующий азот – 14,4–16,0% и негидролизующий азот – 67,1–77,2% (Безносиков, 2000). Содержание азота как в органической, так и в минеральной формах с глубиной почвенного профиля снижается, в то же время происходит относительное понижение легкогидролизующей фракции в иллювиальных горизонтах.

В органических горизонтах соотношение C : N, характеризующее относительное богатство гумуса азотом, колеблется в пределах 8,5–15,4%, существенно снижаясь до 3,5–5,0 в гор. A₂B₁ (табл. 26).

Накопление органического вещества и аккумуляция азота в подзолистых почвах под лесом идет более медленными темпами, чем в освоенных аналогах.

В нашей стране для диагностики азотного питания сельскохозяйственных культур (в основном зерновых) наибольшее распространение получило определение минерального азота (нитратного + аммонийного). В условиях континентального климата (Сибирь, Зауралье, Нижнее Поволжье) предпочтение было отдано нитратному азоту. Помимо этого, в ряде случаев успешно использовались и другие методы определения доступных форм азота в почвах.

В связи с этим, в России были разработаны зональные системы диагностики азотного питания зерновых и других культур с учетом специфики поведения азота в различных природно-климатических условиях. Научной основой для таких систем послужили опыты Геосети ВНИИА и агрохимической службы, в которых изучалась зависимость урожайности зерновых культур и эффективности азотных удобрений от содержания доступных форм азота в почвах, определенного различными методами.

Запас минерального азота в почве оказывал существенное влияние на эффективность азотных удобрений. При его содержании более 17 мг/кг прибавка урожая озимой пшеницы отсутствовала, тогда как при содержании ниже 10 мг/кг прибавка в зависимости от дозы азота составляла 9,3–11,5 ц/га (Шафран, 2000). Подобная закономерность прослеживалась и в других почвенно-климатических зонах. Так, на типичных черноземах Центрального округа наибольшая прибавка урожая озимой пшеницы отмечалась при запасе минерального азота 88 кг/га (Акулов, Доманов и др., 1990; Сычев, Шафран, 2017). На черноземах и темно-каштановых почвах засушливого Поволжья азотные удобрения лучше всего действуют при запасе нитратного азота 10–29 кг/га в слое 0–40 см (Чуб, 1989; Тимергалиев, Хакимов и др., 2010).

Таблица 26

Состав азотного фонда дерново-подзолистых и серых лесных почв (Безносиков, 2000)

Горизонт	Глубина взятия, см	Азот, мг/кг					C : N
		общий	минеральный	легко-гидролизуемый	трудно-гидролизуемый	негидролизуемый	
Подзолистая среднекультуренная							
A _{пах}	0–25	1300	17,7 (1,4)	156,8 (12,1)	284,9 (20,4)	860,6 (66,1)	9,9
A ₁ B ₂	30–40	450	21,5 (4,8)	71,9 (16,0)	151,8 (33,7)	204,8 (45,5)	7,6
B ₁	53–63	339	21,7 (6,4)	59,9 (17,7)	8,6 (26,4)	167,6 (49,5)	5,6
Подзолистая слабокультуренная							
A _{пах}	0–18	693	8,0 (2,5)	44,9 (6,5)	209,4 (30,2)	421,2 (60,8)	9,7
A ₁ B ₂	30–40	339	15,3 (4,5)	37,2 (11,0)	129,6 (38,2)	156,9 (46,3)	7,3
B ₁	55–65	239	5,0 (2,1)	34,2 (4,3)	91,8 (38,4)	107,0 (45,2)	5,4
Подзолистая вновь освоенная							
A _{пах}	0–15	817	21,9 (2,7)	47,6 (5,8)	276,2 (33,8)	470,9 (57,7)	9,2
A ₁ B ₂	25–35	347	7,5 (2,2)	32,5 (9,4)	147,3 (42,4)	159,2 (46,0)	7,5
B ₁	57–67	323	0,0 (0,0)	58,8 (18,2)	124,9 (38,6)	139,3 (43,2)	5,3
Подзолистая целинная							
A _{пах}	3–10	368	3,1 (0,8)	58,2 (15,8)	48,2 (13,1)	258,5 (70,3)	8,5
A ₁ B ₂	15–20	258	4,7 (1,8)	44,4 (17,2)	64,1 (4,8)	144,8 (56,2)	7,3
B ₁	50–60	240	2,7 (1,1)	24,1 (10,0)	52,1 (21,7)	161,1 (67,2)	5,0
Дерново-подзолистая							
A _{пах}	0–25	2150	62,4 (2,9)	152,7 (7,1)	378,4 (17,6)	1556,5 (72,4)	12,4
A ₁ B ₂	30–40	982	24,6 (2,5)	53,0 (5,4)	314,2 (32,0)	590,2 (60,1)	6,8
B ₁	45–55	812	4,1 (0,5)	83,6 (10,3)	291,5 (35,9)	432,8 (53,3)	3,5
Серая лесная							
A _{пах}	0–27	3995	123,8 (3,1)	355,6 (8,9)	551,3 (13,8)	264,3 (74,2)	15,4
A ₁ B ₂	30–40	1240	29,8 (2,4)	121,8 (9,8)	244,0 (19,6)	844,4 (68,1)	7,1
B ₁	45–55	913	7,3 (0,8)	64,5 (7,1)	310,7 (34,0)	530,5 (58,1)	3,9

Примечание: в скобках дан процент от общего азота.

В почвах Сибири и Зауралья, характеризующихся резкой континентальностью климата, для целей диагностики азотного питания яровой пшеницы, используется определение нитратного азота. Результаты исследований свидетельствуют о том, что эффективность азотных удобрений хорошо коррелирует с содержанием нитратного азота в почвах. С повышением его содержания снижалась прибавка урожая яровой пшеницы. Это отчетливо видно как на выщелоченных черноземах Зауралья, так и на оподзоленных и выщелоченных черноземах Сибири (табл. 27).

Таблица 27

Влияние содержания нитратного азота в почвах на эффективность применения азотных удобрений под яровую пшеницу

Содержание N-NO ₃ , мг/кг	Урожай без удобрений, ц/га	Прибавка урожая, ц/га			
		N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀
Черноземы обыкновенные и южные Приволжского округа					
≤ 5	10,0	1,7	1,7	1,8	1,8
5,1–10	10,5	1,4	1,4	1,5	1,5
> 10	13,6	0,4	0,4	0,5	0,4
Черноземы выщелоченные Уральского округа					
< 8	16,5	4,7	5,1	5,2	5,1
8–12	18,0	3,7	4,0	4,1	4,0
> 12	18,3	2,8	3,0	3,1	3,0
Черноземы выщелоченные и оподзоленные Сибирского округа					
< 10	14,0	4,2	4,4	4,6	4,6
10–20	16,4	3,5	3,7	3,8	3,8
> 20	16,5	0,7	0,7	0,8	0,8

По мнению сибирских ученых, потребность яровой пшеницы в азоте отсутствует при содержании нитратного азота в сезонно-мерзлотных почвах Западной Сибири и Зауралья в слое 0–40 см – более 15 мг/кг, а в мерзлотных и сезонно-мерзлотных почвах Средней и Восточной Сибири в слое 0–20 см – более 20 мг/кг (Гамзиков, 2000, 2004, 2013).

Для установления степени обеспеченности почв азотом в опытах агрохимической службы использовались также и другие методы определения доступных форм азота в почвах: щелочно-гидролизуемого – по Корнфилду, легкогидролизуемого – по Тюрину–Кононовой, нитрификационной способности – по Кравкову.

Результаты исследований (Шафран, 1996) показали, что качественный и количественный запасы минерального азота, а также его распределение по профилю почвы в значительной степени изменялись под влиянием изучаемых факторов. В среднем за все годы проведения исследований менее обеспеченными по содержанию минерального азота оказались супесчаные почвы. Более высоким запасом азота характеризовались среднесуглинистые почвы (табл. 28).

Таблица 28

**Запас минерального азота в дерново-подзолистых почвах
в среднем за годы исследований**

Слой почвы, см	Почва		
	супесчаная	среднесуглинистая	тяжелосуглинистая
Минеральный азот, кг/га			
0–30	22	50	80
0–60	45	98	237
0–90	66	135	370
Нитратный азот, кг/га			
0–30	11	37	23
0–60	23	74	85
0–90	29	100	127
Доля нитратного азота в запасе минерального азота, %			
0–30	50	74	29
0–60	50	75	36
0–90	44	74	34
Доля минерального азота от его запаса в слое 0–60 см, %			
0–30	49	51	34
Доля нитратного азота от его запаса в слое 0–60 см, %			
0–30	58	50	27
Доля минерального азота от его запаса в слое 0–90 см, %			
0–30	38	37	22
0–60	68	73	64
Доля нитратного азота от его запаса в слое 0–90 см, %			
0–30	42	37	18
0–60	79	74	67

Имеющийся в настоящее время объем информации позволяет в определенном приближении описать эффективность азотных удобрений в пределах не только зон, но и большинства провинций, а в некоторых случаях выделить внутри провинции группы округов. В качестве основного показателя используется величина прибавки урожая. Этот показатель был использован в подавляющем большинстве предшествующих работ по почвенно-агрохимическому районированию территории Союза (Аникст, 1992; Аникст, Тюрюканов, 1992, 1994). Действие азотного удобрения при основном его внесении испытывали на фосфорно-калийном фоне.

Действие азотных удобрений на урожай зерновых культур

Полевые эксперименты в основной своей массе проведены на полях учреждений, входящих в Географическую сеть опытов с удобрениями – это сельскохозяйственные опытные станции, научные и учебные сельскохозяйственные институты. Поля эти как правило располагаются на почвах

или преобладающих, или достаточно хорошо представленных в пределах конкретных областей, краев или республик. Именно эту цель преследовали в свое время организаторы опытных учреждений – по аналогии с размещением на территории России точек Госсортсети.

Основная масса полевых опытов с дозами азотных удобрений относится к периоду 1970–1990 гг. Данные эти не следует считать устаревшими, поскольку в последние годы в нашей стране и применение удобрений, и проведение соответствующих полевых опытов значительно уменьшилось. При этом нет никаких оснований полагать, что за прошедший период эффективность азотных удобрений изменилась вследствие каких-либо серьезных сдвигов в агротехнике или введении новых сортов зерновых культур (Сычев, Шафран и др., 2017). Кроме того, при исследовании географии действия удобрений большое внимание уделяется природным особенностям территорий, которые в обозримом промежутке времени можно считать стабильными.

Дозы фоновых удобрений в подавляющем большинстве случаев составляли 30–60 кг/га д.в. В опытах чаще всего вносили аммиачную селитру.

Экспериментальных данных по яровой пшенице значительно больше, чем по ячменю. Посевы яровой пшеницы распространены во всех зонах и провинциях умеренного пояса, и они весьма удобны для изучения географии действия удобрений. Поэтому в рамках настоящей работы материалы по яровой пшенице приняты за основу. Для того чтобы оценить эффективность азотных удобрений, предлагается ряд градаций, каждая из которых соответствует определенному интервалу величин прибавок от азотного удобрения (табл. 29).

Таблица 29

**Градация эффективности азотных удобрений,
внесенных под яровую пшеницу**

Эффективность азота	Доза N_{60}		Рассчитанные по окупаемости прибавки от доз N_{30} и N_{40} , ц/га	
	Прибавки урожая, ц/га	Окупаемость 1 кг N прибавкой зерна, кг	N_{30}	N_{40}
Очень низкая	< 1,5	< 2,5	< 0,7	< 1,0
Низкая	1,5–3,0	2,5–5,0	0,7–1,5	1,0–2,0
Средняя	3,1–4,5	5,1–7,5	1,6–2,2	2,1–3,0
Повышенная	4,6–6,0	7,6–10,0	2,3–3,0	3,1–4,0
Высокая	6,1–8,0	10,1–13,3	3,1–4,0	4,1–5,3
Очень высокая	> 8,0	> 13,3	> 4,0	> 5,3

Эта шкала построена на основании всей совокупности экспериментальных данных по эффективности дозы N_{60} в посевах яровой пшеницы. Прибавки от доз N_{30} и N_{40} рассчитаны для этой шкалы по окупаемости 1 кг азота удобрений прибавкой зерна. Предлагаемой шкалой можно пользоваться применительно только к яровой пшенице. Реакция ярового ячменя на азотное удобрение чаще всего бывает несколько иной (табл. 30).

Здесь и далее используются принятые в природно-сельскохозяйственном районировании обозначения зон, провинции, подпровинции, округов.

Таблица 30

Эффективность азотных удобрений в посевах яровых пшеницы и ячменя, ц/га

Провинция (округ)	Культура	Прибавка урожая от N_{60}	Число опытов/пунктов
4-3 а*	Пшеница	7,5	13/3
	Ячмень	4,3	12/2
4-3б	Пшеница	9,8	20/3
	Ячмень	9,9	21/4
5-2	Пшеница	3,8	93/16
	Ячмень	5,0	48/8
5-4 (4,6)	Пшеница	7,0	84/10
	Ячмень	9,2	27/5

На дерново-подзолистых почвах западной подпровинции Среднерусской южнотаежно-лесной провинции (4-3а) ячмень реагирует на азотное удобрение слабее, чем яровая пшеница. На аналогичных почвах восточной части этой же провинции (4-3б) азот обеспечивает одинаковое повышение урожая у обеих культур. В Среднерусской (5-2) и Западносибирской (5-4 в пределах 4 и 6 округов) лесостепных провинциях, где широко распространены выщелоченные черноземы, прибавки от N_{60} у ячменя выше, чем у яровой пшеницы. Причиной этих различий являются, по-видимому, биологические особенности культур. В благоприятных почвенных и климатических условиях лесостепной зоны могла сыграть роль большая сила кущения ячменя.

Таким образом, градации эффективности азотных удобрений, разработанные на экспериментальном материале по яровой пшенице, вряд ли пригодны применительно к ячменю. Построение аналогичной шкалы для ячменя пока не предпринималось, поскольку данных по этой культуре значительно меньше, чем по яровой пшенице. Тем не менее, сведения по эффективности азота в посевах ячменя должны быть использованы при описании географии действия удобрений.

Для того чтобы при помощи шкалы эффективности азота (табл. 29) описать общую картину географии действия этого элемента, остановимся в первую очередь на прибавках урожая от N_{60} (и от N_{30-40} в тех случаях, когда доза N_{60} в эксперименте не фигурировала).

В среднетаежной зоне в эксперименте Якутского НИИСХ с яровой пшеницей эффективность азота может быть охарактеризована как средняя (прил. 1).

В Прибалтийской южнотаежно-лесной провинции, судя по данным Северо-западного НИИСХ, наблюдалось повышенная эффективность азота. Не противоречат такой оценке и результаты опытов с ячменем (прил. 2).

В западной подпровинции Среднерусской южнотаежно-лесной провинции (4-3а) проявилось, в основном, повышенное и высокое действие азота. Следует особо отметить восточную подпровинцию (4-3б), где влияние азота в посевах яровой пшеницы было высоким и очень высоким (прил. 1). Эта подпровинция заметно выделяется и при рассмотрении материалов по яровому ячменю.

Прибавки урожая яровой пшеницы от N_{60} в Западносибирской и Среднесибирской южнотаежно-лесных провинциях свидетельствует о повышенной и высокой эффективности азота (прил. 3). В опытах, проведенных в Дальневосточно-Амуру-Уссурийской провинции, яровые культуры высевались преимущественно после сои. Возможно, бобовый предшественник повлиял на действие азота, которое колеблется между средним и повышенным (прил. 3).

Таким образом, в пределах южнотаежно-лесной зоны наибольшая эффективность азота наблюдалась в пределах западной подпровинции Среднерусской провинции. Здесь же были получены наиболее высокие урожаи яровой пшеницы.

Наибольшее количество опытов с яровой пшеницей проведено в лесостепной зоне, поскольку здесь размещается более 40% всех посевов этой культуры в Российской Федерации и применение минеральных удобрений дает весьма ощутимые результаты.

В принятом нами за основу природно-сельскохозяйственном районировании Среднерусская лесостепная провинция делится на три подпровинции: Западную, Центральную и Восточную. Применительно к этому делению сгруппированы результаты полевых опытов с яровой пшеницей и ячменем. Судя по величинам прибавок урожая от N_{60} , эффективность азота в значительной мере зависит от почвенно-климатических условий, которые в пределах лесостепной зоны Европейской части изменяются весьма значительно. Самые низкие прибавки урожая яровой пшеницы получены на слабощелоченных и выщелоченных черноземах Курской и Ульяновской областей (прил. 4, 5). Ячмень в ряде случаев реагировал на внесение азота более активно и это соответствует приведенным выше материалам (прил. 6). Не исключено, что дальнейшее накопление экспериментальных данных позволит обозначить на территории Среднерусской лесостепной провинции выдел с повышенной эффективностью азота (предположительно – в пределах Рязанской, Липецкой и Тамбовской областей).

В Предуральской лесостепной провинции высокая эффективность азота проявилась на темно-серых лесостепных почвах и оподзоленных черноземах Пермской области (прил. 7).

Западносибирская лесостепная провинция в природно-сельскохозяйственном районировании не подразделяется на подпровинции, и все же следует отметить значительную неоднородность ее почвенного покрова, которая заметно сказывается на действии азотных удобрений. Здесь вполне определенно выделяются округа, прилегающие к восточным склонам Уральского горного массива в пределах Тюменской, Челябинской и Курганской областей, где эффективность азота колеблется от повышенной до очень высокой (прил. 7, 8). Результаты опытов с ячменем подтверждают это положение: прибавки от N_{60} составляют здесь 6–12 ц/га (прил. 9).

Совершенно иная ситуация складывается на территории в той части провинции, которая приурочена к центральной лесостепи Западно-Сибирской низменности (Омская область): здесь эффективность азота низкая и очень низкая (прил. 10).

Северопредалтайская лесостепная провинция также весьма неоднородна в отношении действия азотных удобрений. Для Новосибирской области и Алтайского края характерна средняя эффективность азота.

Полевые опыты Алтайского НИИ земледелия и селекции и Алтайского СХИ, проведенные недалеко от города Барнаула, приурочены к переходу от лесостепной к степной зоне, и с этим, по-видимому, связано слабое действие азотных удобрений.

Северная часть Северопредалтайской лесостепной провинции, которая расположена в Томской области, отличается повышенной и высокой эффективностью азота.

Здесь распространены серые лесостепные почвы и оподзоленные черноземы. Южная часть этого округа приходится на лесостепь Кемеровской области. Судя по данным полевых опытов Кемеровского НИИСХ с яровой пшеницей, эффективность азота здесь низкая. Остается не ясным, чем объясняется слабое действие азота в этих опытах – спецификой почвенных условий или выбросами расположенного неподалеку от Кемеровского НИИСХ азотно-тукового завода. Поэтому весьма желательно проведение серии аналогичных опытов в других пунктах лесостепи Кемеровской области.

Среднесибирская лесостепная провинция отличается высокой и очень высокой эффективностью азота, что подтверждается и результатами экспериментов с ячменем. Это относится к наиболее широко распространенным в Среднесибирской лесостепи серым лесостепным почвам и выщелоченным черноземам. Для дерново-карбонатных почв, занимающих около 40% пашни Иркутской области, характерно слабое действие азота.

Итак, результаты полевых опытов с яровыми зерновыми культурами, выполненных в лесостепной зоне России, позволяют прийти к следующему заключению.

В лесостепи Европейской части эффективность азота в целом близка к средней. Сильное его действие наблюдается в примыкающих к Уралу округах Западносибирской и значительной части Среднесибирской провинции, наиболее слабое в Центральной части Западносибирской провинции.

Для большей части степной зоны характерна низкая эффективность азота, и лишь в Восточносибирской провинции она поднимается до средней (юг Красноярского края) и до высокой (Бурятская республика).

Сухостепная зона отличается низким и очень низким действием азота.

Весьма значительные площади посевов яровых зерновых культур располагаются на территории Южносибирской горной области. Заслуживающие внимания данные получены в полевых экспериментах, выполненных в Южно-Забайкальской горно-лесостепной провинции: в Бурятии наблюдалась повышенная и высокая эффективность азота, а в пределах Читинской области от очень низкой до средней. При этом ячмень отзывался на внесение азотных удобрений более активно, чем яровая пшеница.

Таким образом, обобщение и географическая систематизация результатов полевых опытов позволяют осуществить районирование земледельческой территории России по действию удобрений. В данном случае удалось получить лишь первое приближение общей схемы районирования эффек-

тивности азота. Более подробное и фундаментальное построение возможно при условии привлечения аналогичных экспериментальных материалов по ряду других сельскохозяйственных культур. Приведенные выше сведения позволяют судить и о действии возрастающих доз азота на урожай яровых зерновых культур в разных природно-сельскохозяйственных зонах и провинциях России.

Особое внимание обращено на территории, достаточно четко различающиеся по эффективности азота. Так, в южнотаежно-лесной зоне очень высокой эффективностью отличается восточная окраина Среднерусской провинции, и именно здесь наибольшие прибавки урожая получены не только от средней, но и от повышенных доз. В лесостепной зоне выделяются территории, приуроченные к Зауралью.

Высокое и очень высокое положительное действие азота в Среднесибирской лесостепной провинции не означает, что здесь должны быть рекомендованы повышенные дозы этого удобрения, поскольку применение его может способствовать затягиванию созревания, а это в условиях Средней Сибири крайне нежелательно.

Наиболее низкие в лесостепной зоне прибавки урожая получены в пределах Западносибирской провинции и увеличение дозы выше 30–40 кг/кг д.в. не дало дополнительного эффекта. Среднерусская и Северопредалтайская лесостепные провинции в данном случае характеризуются средней эффективностью азота, но первая отличается от второй тем, что увеличение дозы до N_{80-90} сопровождается дополнительным ростом урожая.

Следует отметить, что согласно природно-сельскохозяйственному районированию Среднерусская лесостепная провинция подразделяется на три подпровинции: западную (а), центральную (б) и восточную (в), а в приложении б приведены усредненные данные по всей провинции, поскольку группировка имеющихся материалов по подпровинциям не дана достаточных оснований для аналогичного деления в отношении действия азота.

Можно полагать, что дальнейшее накопление экспериментальных сведений, а также использование данных по другим культурам, позволит сделать более детальное описание действия азота в пределах Среднерусской лесостепной провинции. Однако и в этом случае вряд ли можно ожидать полного совпадения выделов агрохимического базового (в данном случае – природно-сельскохозяйственного) районирования.

Обобщение результатов полевых опытов, выполненное по типам и подтипам почв, еще нагляднее подтвердило закономерности, установленные применительно к природно-климатическим зонам и провинциям. Представилось возможность обобщить всего 589 опытов с яровой пшеницей и 240 с яровым ячменем (табл. 31).

Полученные данные свидетельствуют о том, что урожайность этих культур без внесения удобрений вначале повышалась при продвижении с севера на юг. Самый низкий урожай яровой пшеницы был зафиксирован в зоне распространения дерново-подзолистых и серых лесных почв. На черноземах выщелоченных и обыкновенных был достигнут максимум урожайности, и далее продуктивность этой культуры значительно снизилась, особенно на каштановых почвах. Урожайность ярового ячме-

ня изменялась по типам почв гораздо в меньшей степени по сравнению с пшеницей, за исключением черноземов предкавказских, где получили максимальную продуктивность, а также каштановых почв, на которых урожай зерна оказался самым низким. На дерново-подзолистых, серых лесных почвах и черноземах обыкновенных урожайность ярового ячменя превышала урожайность яровой пшеницы, а на каштановых почвах продуктивность этих культур была близка к ним. Влияние фосфатно-калийного фона на урожайность яровых пшеницы и ячменя проявилось в гораздо меньшей степени, чем азотного. Особенно это было заметно в отношении пшеницы на черноземных и каштановых почвах, ячменя – на дерново-подзолистых и черноземах обыкновенных. Следовательно, доля участия азота в формировании урожая была выше суммы фосфора и калия. Предположительно объяснением этого может быть высокая обеспеченность почв фосфором и калием на экспериментальных участках. Однако эти данные не были учтены при обобщении.

Таблица 31

Действие азотных удобрений на прибавку урожая пшеницы яровой

Почвы	Урожай, ц/га		Прибавка урожая, ц/га				Число опытов
	без удобрений	РК	N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	
Дерново-подзолистые	13,0	17,2	6,4	8,1	9,5	10,6	38
Серые лесные	14,0	16,3	5,1	6,3	8,2	7,9	129
Черноземы выщелоченные	19,3	20,3	2,9	4,2	5,6	6,4	300
Черноземы обыкновенные	16,7	18,7	1,0	1,1	–	–	55
Черноземы южные	13,0	14,4	1,1	1,3	0,7	–	25
Каштановые	10,8	12,0	1,8	4,6	6,4	–	42

Наиболее высокая прибавка урожая яровой пшеницы от азота отмечена на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, а также черноземах выщелоченных и каштановых почвах. Действие азотных удобрений на прибавку урожая ярового ячменя проявилось более заметно на нечерноземных почвах и выщелоченных черноземах, но в отличие от яровой пшеницы эффект от внесения азота был достаточно ощутимым и на черноземах предкавказских и обыкновенных, а на каштановых оказался невысоким (табл. 32).

Таблица 32

Действие азотных удобрений на прибавку урожая ячменя ярового

Почвы	Урожай, ц/га		Прибавка урожая, ц/га				Число опытов
	без удобрений	РК	N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	
Дерново-подзолистые	19,0	21,0	5,2	7,6	8,0	8,2	69
Серые лесные	21,2	24,0	3,1	5,9	7,2	6,2	30
Черноземы выщелоченные	18,3	21,8	6,0	8,7	10,6	7,4	46
Черноземы предкавказские	26,3	28,9	0,2	3,1	4,0	2,7	76
Черноземы обыкновенные	18,7	20,2	2,2	4,4	7,1	7,3	6
Каштановые	10,5	13,7	1,0	2,6	–	–	13

Наряду с данными о прибавках урожая, полученных от внесения удобрений, важным показателем в оценке их эффективности является окупаемость от внесенных питательных веществ приростом урожая. Согласно приведенной шкале эффективности азотных удобрений, внесенных под яровую пшеницу, наиболее высокая окупаемость отмечена на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, которая для дозы N_{60} оценивается как высокая, на выщелоченных черноземах и каштановых почвах – как средняя, в остальных случаях – очень низкая.

Если оценивать окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая ярового ячменя по шкале яровой пшеницы, можно отметить, что на дерново-подзолистых почвах и выщелоченных черноземах оплата каждого килограмма внесенного азота превышала 10 кг/кг, т.е. относилась к высокой категории, на серых лесных почвах к повышенной, на предкавказских и обыкновенных черноземах к средней и на каштановых – к низкой.

С повышением доз азота закономерно снижалась его окупаемость прибавкой урожая, что было характерным для обеих культур. Самая высокая отдача от азотных удобрений наблюдалась при внесении N_{30} на всех почвах за исключением черноземов предкавказских (табл. 33).

Таблица 33

**Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая
яровых зерновых культур, кг/кг**

Почвы	Доза азота, кг/га			
	30	60	90	120
Пшеница				
Дерново-подзолистые	21,3	13,5	10,6	8,8
Серые лесные	17,0	10,5	9,1	6,6
Черноземы выщелоченные	9,7	7,0	6,2	5,3
Черноземы обыкновенные	3,3	1,8	–	–
Черноземы южные	3,7	2,0	0,8	–
Каштановые	6,0	7,7	7,1	–
Ячмень				
Дерново-подзолистые	17,3	12,7	8,9	6,8
Серые лесные	10,3	9,8	8,0	5,2
Черноземы выщелоченные	20,0	14,5	11,8	6,5
Черноземы предкавказские	0,7	5,2	4,4	2,3
Черноземы обыкновенные	7,3	7,3	7,9	6,1
Каштановые	3,3	4,3	–	–

Наряду с изучением эффективности применения азотных удобрений под яровые пшеницу и ячмень, ареал возделывания которых довольно широк, несомненный интерес представляет изучение данных по действию азотных удобрений на урожайность озимой пшеницы, являющейся ведущей зерновой культурой в Европейской части страны.

Опыты с озимой пшеницей были проведены агрохимической службой на основных типах и подтипах почв России. Исследования проводились по единым программам и методикам, что в конечном итоге позволило получить достаточно представительный материал, позволяющий с высокой степенью достоверности оценить эффективность азотных удобрений на обширной территории страны.

Результаты опытов говорят о том, что наибольшая прибавка урожая озимой пшеницы получена на дерново-подзолистых почвах. В зависимости от дозы удобрения она составила 8,1–15,5 ц/га (табл. 34).

Таблица 34

**Эффективность азотных удобрений
на озимой пшенице при основном внесении**

Тип почвы	Урожайность, ц/га	Прибавка урожая, ц/га					Число опытов
		N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	N ₁₅₀	
Дерново-подзолистые	18,9	–	8,1	11,2	14,1	15,5	24
Серые лесные	23,4	1,9	2,3	5,2	6,2	4,7	29
Черноземы выщелоченные и оподзоленные (без Северного Кавказа)	27,1	2,1	2,7	2,8	2,2	3,0	48
Черноземы типичные	34,7	–	2,3	2,5	3,2	2,8	19
Черноземы обыкновенные	28,9	2,3	2,5	1,9	2,8	3,1	22
Черноземы южные	34,0	0,7	1,6	3,1	–	–	6
Темно-каштановые	27,3					3,3	47
Черноземы мицеллярно- карбонатные и предкавказские	36,1	1,4	2,6	3,5	4,6	2,0	80
Черноземы выщелоченные Северного Кавказа	34,0	–0,2	4,1	2,0	7,2	–	60
Черноземы луговые	34,8	0,8	2,4	4,1	2,0	4,7	14
Горные лесные бурые	36,2	–	2,6	4,9	0,5	–	3

Применение азота в дозе 30 кг/га было неэффективным или малоэффективным на черноземах выщелоченных Северного Кавказа, черноземах южных и черноземах луговых. На большей части почв, кроме дерново-подзолистых, прирост урожая от N₆₀ составил 2,3–2,9 ц/га. Доза азота 90 кг/га обеспечила прибавку урожая от 1,9 ц/га на черноземах обыкновенных до 11,2 ц/га на дерново-подзолистых почвах. Высокие дозы азота 120–150 кг/га позволили получить наибольшие прибавки урожая озимой пшеницы на дерново-подзолистых, серых лесных почвах и на черноземах выщелоченных Северного Кавказа.

Для некоторых типов почв прослеживалась прямая зависимость роста прибавки урожая от дозы основного внесения азотных удобрений. Сюда относятся дерново-подзолистые почвы, черноземы обыкновенные и черноземы луговые. На серых лесных почвах, черноземах типичных, мицеллярно-карбонатных и предкавказских, черноземах выщелоченных Северного Кавказа и темно-каштановых внесение N₁₅₀ не способствовало приросту

урожая в отличие от дозы N_{120} . На горных бурых лесных почвах наибольшая прибавка урожая была получена от внесения N_{90} .

Следует отметить, что практически на всех почвах повышение дозы с 90 до 120 кг/га сопровождалось незначительным приростом урожая в пределах 0,6–0,9 ц/га. В то же время внесение 30 кг/га азота на серых лесных почвах, черноземах выщелоченных (без Северного Кавказа) и темно-каштановых почвах обеспечивало весомую прибавку урожая 1,9–2,4 ц/га.

Максимальная окупаемость азотных удобрений прибавка урожая озимой пшеницы зафиксирована на дерново-подзолистых почвах в дозе 60 кг/га (табл. 35).

Таблица 35

Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы при основном внесении

Тип почвы	Окупаемость N прибавкой урожая, кг/кг				
	N_{30}	N_{60}	N_{90}	N_{120}	N_{150}
Дерново-подзолистые	–	13,5	12,4	11,7	10,3
Серые лесные	6,3	3,8	5,7	5,2	3,1
Черноземы выщелоченные и оподзоленные (без Северного Кавказа)	7,0	4,5	3,1	1,8	2,0
Черноземы типичные	–	4,3	2,7	2,6	1,9
Черноземы обыкновенные	6,0	4,1	2,1	2,3	2,1
Черноземы южные	2,3	4,3	3,4	–	–
Темно-каштановые	7,0	4,7	4,0	3,4	2,2
Черноземы мицелиарно-карбонатные и предкавказские	4,7	4,3	3,9	3,8	1,3
Черноземы выщелоченные Северного Кавказа	–	6,8	7,1	6,0	–
Черноземы луговые	2,7	4,0	4,5	1,7	3,1
Горные лесные бурые	–	4,3	5,4	0,4	–

Увеличение дозы азота до 90 кг/га влекло повышение его окупаемости на серых лесных почвах, черноземах луговых, черноземах выщелоченных Северного Кавказа и на бурых лесных почвах. На остальных типах почв наибольшая окупаемость азота получена при внесении его в дозе 30 кг/га.

Влияние применения азотных удобрений под озимую рожь менее эффективно по сравнению с озимой пшеницей на дерново-подзолистых и серых лесных почвах при одних и тех же дозах азота (табл. 36, 37).

Таблица 36

Влияние азотных удобрений на прибавку урожая озимой ржи

Почвы	Урожай по фону РК, ц/га	Прибавка урожая, ц/га					Число опытов
		N_{30}	N_{60}	N_{90}	N_{120}	N_{150}	
Дерново-подзолистые	15,8	1,4	5,2	2,4	3,0	4,6	31
Серые лесные	15,9	0,5	3,1	1,9	2,8	9,2	32
Черноземы выщелоченные	16,8	1,5	6,0	3,9	3,8	–	7

Таблица 37

**Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая
озимой ржи*, кг/кг**

Почвы	Прибавка урожая, ц/га				
	N ₃₀	N ₆₀	N ₉₀	N ₁₂₀	N ₁₅₀
Дерново-подзолистые	4,6	4,0	3,3	3,4	3,1
Серые лесные	1,7	3,1	3,1	3,2	6,1
Черноземы выщелоченные	2,0	6,5	4,2	2,5	–

Примечание: * – число опытов соответствует данным таблицы 36.

Так, прибавка урожая озимой пшеницы от N₆₀ на дерново-подзолистых почвах составила 8,1 ц/га, озимой ржи лишь 2,4 ц/га. На серых лесных почвах применение 90 кг/га азота обеспечило прирост урожая озимой пшеницы 5,2 ц/га, озимой ржи – 2,8 ц/га. Соответственно изменилась и окупаемость азота прибавкой урожая этих культур (табл. 35).

Одним из способов повышения эффективности применения азотных удобрений под озимую пшеницу является весенняя подкормка. Однако обобщение полевых опытов агрохимической службы показало, что весенняя подкормка не всегда и не везде имеет преимущество перед основным удобрением при одинаковых дозах внесения. Так на дерново-подзолистых почвах, мицеллярно-карбонатных черноземах и луговых черноземах окупаемость азота прибавкой урожая при поверхностной подкормке оказалось ниже, чем при основном внесении (табл. 38).

Таблица 38

**Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы
при разных способах внесении в дозе N₆₀**

Тип почвы	Основное внесение	Подкормка	
		поверхностная	прикорневая
Дерново-подзолистые	13,5	5,0	5,8
Серые лесные	3,8	4,0	5,8
Черноземы выщелоченные и оподзоленные	4,5	4,5	7,0
Черноземы типичные	4,3	3,5	5,0
Черноземы обыкновенные	4,1	7,7	11,0
Черноземы южные	4,3	10,1	9,7
Черноземы мицеллярно-карбонатные	4,3	1,8	8,5
Черноземы выщелоченные Предкавказья*	8,7	9,9	–
Темно-каштановые	4,7	–	5,5
Черноземы луговые	4,0	2,7	–
Черноземы слитые	12,2	15,1	–

Прикорневой способ внесения азота имел преимущество по сравнению с поверхностным практически на всех типах почв за исключением черноземов южных.

Детальное изучение факторов, влияющих на эффективность удобрений, было проведено агрохимической службой Краснодарского края (Попов, 2000). Результатами таких исследований установлено хорошо заметное влияние природно-климатических зон в пределах края на эффективность азотных удобрений. На карбонатном черноземе Северной и Северо-Восточной зон, занимающих почти третью часть края, подкормка посевов озимой пшеницы практически не способствовала увеличению урожая зерна, тогда как на слабовыщелоченных с переходом к выщелоченным черноземам Центральной и Южной зон действие азотных удобрений проявилось довольно значительно (табл. 39).

Таблица 39

Влияние минеральных удобрений, внесенных в подкормку, на урожай озимой пшеницы в Северной и Северо-Восточной зонах Краснодарского края, ц/га

Варианты опытов	Карбонатные черноземы*		Слабовыщелоченные черноземы**	
	Урожай	Прибавка	Урожай	Прибавка
Без удобрений	22,4	–	39,5	–
P ₂₀	22,5	0,1	40,5	1,0
N ₃₅	22,3	–0,1	42,6	3,1
N ₃₄ P ₂₀	22,3	–0,1	43,3	3,8
N ₃₄ P ₂₀ K ₂₀	23,1	–0,7	43,0	3,5
	НСП _{0,5} – 1,8		НСП _{0,5} – 2,4	

Примечание: * – в среднем за 1969–1971 гг., ** – в среднем за 1967–1976 гг.

Неэффективными оказались азотные удобрения, внесенные в подкормку, как поздней осенью, так и весной. Вместе с тем на слитом черноземе получен высокий эффект от применения азота (табл. 40).

Таблица 40

Влияние азотной подкормки на урожай озимой пшеницы на различных почвах Краснодарского края (в среднем за 1970–1992 гг.)

Варианты опытов	Карбонатные черноземы	Долинные черноземы	Урожай*	Прибавка
			Выщелоченные черноземы	Слитые черноземы
Урожай, ц/га				
Без удобрений	37,5	22,5	32,2	24,0
N ₃₄ осенью	38,6	23,5	35,8	28,5
N ₆₈ осенью	35,7	23,2	37,7	31,15
N ₃₄ весной	36,7	22,9	37,6	30,1
N ₆₈ весной	36,1	23,0	38,9	37,0
НСП _{0,5} ц/га	5,3		3,3	2,8
	1,8		НСП _{0,5} – 2,4	
Прибавка, ц/га				
N ₃₄ осенью	0,6	1,0	3,6	4,5
N ₆₈ осенью	–2,1	0,7	5,5	7,5
N ₃₄ весной	–0,9	0,5	5,4	6,1
N ₆₈ весной	–0,7	0,5	6,7	13,0

Примечание: * – опыт проведен в 1970–1973 гг.

Отсутствие эффективности действия азотных удобрений на почвах Северной и Северо-Восточной зон объясняется незначительным количеством осадков, выпадающих в весеннее время, и удобрения, внесенные в этот период, остаются на поверхности, недоступными для корневой системы пшеницы, как правило, используя сорняками. В отдельные годы после прошедших дождей удобрения усваиваются растениями и способствуют более интенсивному весеннему развитию вегетативной массы, что в дальнейшем в засушливых условиях негативно сказывается на формировании зерна.

В Центральной и Предгорной зонах, где выпадает достаточное количество осадков, подкормка озимой пшеницы высокоэффективна. Это можно объяснить вымыванием нитратов из корнеобитаемого слоя почвы в течение зимнего и ранневесеннего периода. Кроме того, почвы данной зоны являются тяжелыми по гранулометрическому составу, и из-за обильного переувлажнения заплывают и уплотняются, что замедляет микробиологические процессы, включая нитрификацию. В результате возникает азотное голодание, которое ликвидируется внесением азотных удобрений.

Таким образом, результаты исследований показывают, что эффективность действия азотных удобрений, внесенных под зерновые культуры, в значительной степени определяются природно-климатической зоной, а также типом и подтипом почв. В то же время внутри этих зон можно нередко встретить результаты экспериментальных данных опытов Географической сети и агрохимической службы, которые свидетельствуют о различном влиянии на прибавку урожая в одних и тех же природных зонах. По данным Д.А. Коренькова (1999) окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы, полученным в опытах Геосети на 3,8–4,6 кг/кг превышала аналогичные данные агрохимической службы (табл. 41).

Таблица 41

Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы по данным Геосети и агрохимической службы

Природная зона	Геосеть (Кореньков, 1999)		Агрохимическая служба (Державин, 1992)	
	Доза, кг/га	Окупаемость, кг/кг	Доза, кг/га	Окупаемость, кг/кг
Нечерноземная	70	10,0	60	6,2
Лесостепная	57	6,1	60	2,3
Степная	50	5,8	60	1,2

Аналогичные результаты получены нами при сравнении эффективности азотных удобрений в опытах Географической сети и агрохимической службы (табл. 42).

Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах в опытах Геосети в 2 раза превышала данные Агрохимической службы. На серых лесных почвах эта разница составила 30–40%. На черноземных почвах различия в окупаемости азотных удобрений были также заметны.

Ячмень, как и яровая пшеница, лучше отзывался на внесение азотных удобрений в опытах Географической сети, но в отличие от пшеницы эффективность азота между типами почв была менее заметна.

Таблица 42

Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая яровых пшеницы и ячменя по данным Геосети и агрохимической службы, кг/кг

Почвы	Дозы азота, кг/га					
	30		60		90	
	1	2	1	2	1	2
Пшеница						
Дерново-подзолистые	21,3	8,3	13,5	6,3	10,6	5,3
Серые лесные	17,0	10,2	10,5	7,4	9,1	6,1
Черноземы выщелоченные	9,7	7,7	7,0	5,2	6,2	4,0
Черноземы обыкновенные	3,3	2,0	1,8	1,3	-	1,1
Ячмень						
Дерново-подзолистые	17,3	11,7	12,7	8,2	8,9	6,7
Серые лесные	10,3	9,3	9,8	6,3	8,0	5,0
Черноземы выщелоченные	20,0	8,3	14,5	5,8	11,8	4,8

Примечание: 1 – данные Геосети, 2 – данные Агрохимслужбы.

Л.М. Державин (1992) объясняет это тем, что почвы сельскохозяйственных предприятий, на которых проводила опыты агрохимическая служба, характеризовались более низким уровнем плодородия и агротехники возделывания культур по сравнению с полями научных учреждений, входящих в Географическую сеть. Такое положение сложилось благодаря более высокому уровню обеспеченности ОПХ научных учреждений минеральными удобрениями в сравнении со среднерегиональными, что позволило за короткий срок генетически низкоплодородные почвы перевести в высокоплодородные.

Такое объяснение оправданно, но не обосновано научно, поскольку в приведенных нами данных отсутствуют сведения об уровнях плодородия почв и степени их окультуривания как в опытах Геосети, так и в опытах агрохимической службы. Известно, что окультуренность почв не является каким-то абстрактным понятием, а определяется вполне конкретными показателями, основными из которых являются: содержание гумуса, содержание подвижных форм макро- и микроэлементов, реакции почвенной среды. Все эти факторы непосредственно участвуют в формировании биологического урожая, а остальные – агрофизические и биологические – только способствуют формированию урожая (Сычев, 2003, 2005; Романенков, 2011).

Для установления географических закономерностей действия азотных удобрений недостаточно констатировать изменения их эффективности, которые имеют место в пределах земельных территорий. Необходимо дать им объяснение, найти основные факторы, определяющие действие азота на урожай сельскохозяйственных культур.

Природные и хозяйственные условия, влияющие на эффективность азотных удобрений, весьма многообразны. Агрохимические свойства почв относятся к тем и другим, находясь в тесной взаимосвязи друг с другом.

Влияние природных и антропогенных факторов на действие азотных удобрений

В меньшей степени изучены и описаны природные факторы, формирующие географические закономерности действия удобрений. Рассмотрение их следует начать с условий увлажнения. В таблице 43 приведены величины парных корреляций между прибавками урожая яровой пшеницы от N_{60} и тремя показателями атмосферного увлажнения.

Таблица 43

Зависимость между прибавками урожая яровой пшеницы от азотного удобрения (ц/га) и среднемноголетней суммой активных температур в лесостепной и степной зонах

Зона	Число наблюдений	Числовые значения: средняя/колебания		$R_{\text{факт}}$	$R_{\text{табл. 0,01}}$
		Прибавки от N	Сумма активных температур		
Лесостепная России	47	4,9/0,8–9,1	2041/1618–2544	–0,48	0,37
Лесостепная Европейской территории	19	4,2/1,6–7,3	220/1879–2544	–0,40	0,58
Лесостепная Зауралья и Сибири	28	5,3/0,8–9,1	1919/1618–2210	–0,48	0,48
Степная России	21	2,8/0,4–7,7	2293/1726–2959	–0,64	0,55

Примечание: * Опыты проведены в Курганской, Челябинской, Оренбургской, Тюменской, Омской, Кемеровской, Новосибирской, Иркутской областях, Алтайском и Красноярском краях. Бурятия – каждый в течение трех и более лет.

Величины прибавок урожая колебались в пределах 0,4–12,4 ц/га и составили в среднем 4,6 ц/га. Среднемноголетние климатические показатели заимствованы из справочной литературы.

Результаты математического анализа свидетельствуют о наличии корреляционной зависимости между эффективностью азота и показателями увлажнения за период со среднесуточной температурой выше 10 °С, причем связь с гидротермическим коэффициентом более тесная, чем с суммой осадков (табл. 44).

Поскольку характер азотного цикла в значительной мере определяется деятельностью почвенной микрофлоры, которая весьма чувствительна к температурному режиму, интересно исследовать зависимость между действием азотных удобрений и теплообеспеченностью территорий.

Таблица 44

Зависимость между прибавками урожая яровой пшеницы от азотного удобрения и показателями увлажнения (n = 87; $R_{0,01} = 0,28$)

Показатели увлажнения	Числовые значения: средняя/колебания	$R_{\text{факт}}$
Осадки за год, мм	425/225–612	0,27
Осадки за период с $t > 10^\circ$, мм	215/154–308	0,47
ГТК	1,06/0,49–1,63	0,67

Таблица 45

**Зависимость между прибавками урожая зерновых культур
от азотного удобрения (ц/га) и среднемноголетней суммой активных
температур на территории России**

Культура	Число наблюдений	Числовые значения: средняя/колебания		R _{факт}	R _{табл. 0,01}
		Прибавки от N	Сумма активных температур		
Яровая пшеница	87	4,6/0,4–12,4	2105/1568–3266	–0,62	0,28
Яровой ячмень	36	6,6/1,5–12,3	2101/1500–3238	–0,51	0,42

В таблицах 43 и 45 приведены результаты вычисления парных корреляций между прибавками от азота и среднемноголетними показателями теплообеспеченности.

В качестве последних использованы сумма температур за период со среднесуточными температурами выше 10 °С, то есть суммы активных температур, заимствованные из справочной литературы применительно к каждому из пунктов экспериментирования.

Сопоставление величин прибавок от азота, полученных в разных зонах, с суммами активных температур позволило установить достоверную зависимость между этими показателями (табл. 45). Такой же тип корреляционной связи обнаружен при аналогичном анализе в пределах отдельных зон (табл. 43).

Одна из причин обратной зависимости между эффективностью азота и теплообеспеченностью территории заключается во влиянии температур на продолжительность и интенсивность процессов минерализации: чем продолжительнее и теплее период, в течение которого могут накапливаться подвижные формы азота, тем меньше растения нуждаются в дополнительном азотном питании. Это положение подтверждается и результатами корреляционного анализа материалов 20 полевых опытов, выполненных на серых лесных и черноземных почвах Зауралья и Сибири, приведенными в таблице 46.

Таблица 46

**Корреляционная зависимость между прибавками урожая яровой пшеницы
от азотного удобрения, показателями теплообеспеченности и весенними
запасами нитратов в слое 0–40 см (число пунктов наблюдения 20,
 $R_{0,05} = 0,44, R_{0,01} = 0,56$)**

Корреляция между		R _{факт}
Прибавка урожая от N ₆₀	Среднемноголетняя сумма активных температур	– 0,44
	Сумма температур в годы учета урожая	– 0,55
	N-NO ₃ в почве	– 0,85

Прибавки от азотного удобрения находятся в обратной зависимости и от среднемноголетней суммы активных температур, и от сумм температур за май–июль в годы учета урожая. В этих же опытах проявилась характерная для лесостепной зоны Сибири обратная зависимость между прибавками от азота и весенним содержанием нитратов в слое почвы 0–40 см ($R = -0,85$).

На пахотных почвах Сибири, Зауралья, Предуралья, Поволжья, как и в ряде других регионов, для которых характерны резкая континентальность климата, длительное значительное промерзание почв и непромывной водный режим, четко прослеживается зависимость обеспеченности полевых культур азотом от накопления в них нитратного азота (Кочергин, Гамзиков, 1972; Гамзиков, 1981; Чуб, 1989). Накопление в почвах подвижного минерального азота (нитратов и обменного аммония) зависит от количества в них неспецифических органических веществ (пожнивные и корневые остатки растений, биомасса микроорганизмов и др.) и гидротермических условий для их разложения. В зависимости от предшественников наиболее благоприятные условия для минерализации органических остатков складываются в паровом поле, наименее – под культурами сплошного сева. При этом для накопления нитратов исходное содержание гумуса в почвах не имеет значения, так как азот гумусовых веществ вовлекается в процессы разложения незначительно, а если часть их мобильных соединений и минерализуется, то баланс гумуса практически вновь восстанавливается в процессе гумификации тех же неспецифических органических веществ.

Наиболее активно процессы нитрификации развиваются в паровом поле. При соблюдении технологии подготовки пара в почве в течение теплого периода под влиянием естественного увлажнения и периодических механических обработок создаются благоприятные условия для минерализации накопленных за севооборот неспецифических органических веществ (корни и их выделения, биомасса микроорганизмов, пожнивные и послеуборочные остатки и др.). На черноземах, темно-серых лесных, темно-каштановых и лугово-черноземных почвах в полуметровом слое парового поля в течение лета может накапливаться до 120–210 кг нитратного азота на 1 га пашни. Такого количества азота в этих почвах при наличии других элементов питания достаточно для формирования урожая зерновых до 30–40 ц/га. При урожайности 18–25 ц/га запасов нитратов парового поля с учетом текущей нитрификации хватает для двух последующих культур севооборота.

Следовательно, на почвах с высоким эффективным и потенциальным плодородием при посеве по пару даже при интенсивных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур необходимости в применении азотных удобрений не возникает.

Роль парового поля как накопителя нитратов снижается на почвах с более низким содержанием запасов свежего органического вещества. Несмотря на то что в результате парования в каштановых и светло-каштановых, светло-серых лесных и дерново-подзолистых почвах содержание нитратного азота всегда выше за счет разложения растительных остатков, чем в других полях севооборота, тем не менее его не хватает для формирования высокого урожая. На этих почвах под культуры, высеваемые по пару, обычно вносят органические или минеральные азотные удобрения.

Существенное влияние на накопление нитратного азота оказывает основная обработка почвы. Систематические безотвальные обработки в сравнении со вспашкой приводят к снижению содержания в почве нитратов примерно в 1,5 раза. Ранняя зябь способствует более интенсивному прохождению процессов минерализации, а следовательно, и повышению запа-

сов доступного азота в почвах. Как правило после уборки зернобобовых, однолетних трав и донника ранняя зяблевая обработка (в августе–сентябре) позволяет запасти достаточное количество нитратов для обеспечения азотом последующей культуры севооборота. Аналогично ранняя распашка многолетних трав (июль–август), в отличие от позднего подъема пласта (сентябрь–октябрь), позволяет создать благоприятные условия для прохождения процессов минерализации органических азотсодержащих веществ и образования высоких запасов в почвах минерального азота.

Под культурами сплошного сева в процессе текущей нитрификации (нетто–минерализация) накопление нитратного азота небольшое – обычно в пределах 20–40% к исходному его содержанию перед посевом. Под воздействием междурядных обработок под пропашными культурами процессы мобилизации азота проходят в 1,3–1,6 раза интенсивнее, что приводит к оптимальному обеспечению растений доступным азотом.

На увеличение содержания минеральных соединений азота в почвах существенное влияние оказывают органические и минеральные удобрения. Хорошо приготовленный подстилочный навоз крупного рогатого скота, лошадей и овец, торфонавозные компосты, птичий помет, жидкий и полужидкий навоз содержат значительные количества минерального (в форме нитратов и аммония) и легко минерализуемого органического азота. Внесение этих удобрений способствует значительному улучшению азотного питания растений.

Органические удобрения, содержащие азот в связанном состоянии (торф, солома, свежий подстилочный навоз, сидераты), обычно в меньшей мере улучшают азотный режим в год их внесения. Эти удобрения для лучшего высвобождения закрепленного азота в процессе минерализации эффективнее вносить в паровое поле. Хорошей сидеральной культурой для Сибири, например, является донник, подсеваемый под замыкающую культуру севооборота (зернофуражные, однолетние травы). После уборки покровной культуры донник хорошо укрывается, весной рано отрастает и активно набирает надземную и подземную биомассу. Ранняя запашка (во второй половине июня) биомассы этой культуры позволяет обрабатывать сидеральный пар по типу чистого. Это позволяет увеличить накопление продуктов минерализации при разложении свежего органического вещества, возместить израсходованную влагу донником за счет летне-осенних осадков и успеть очистить поле от сорняков, что практически выравнивает эффективность сидерального пара с чистым по продуктивности (Берзин, 2002; Лошаков, 2015, 2017).

Принято считать, что все промышленные азотные удобрения не только повышают содержание минерального азота, но и способствуют дополнительному накоплению подвижных его соединений (экстра-азот) за счет более активной минерализации почвенных азотсодержащих веществ.

Таким образом, изучение особенностей азотного режима зональных почв регионов с непромываемым водным режимом, вклада антропогенных факторов в мобилизацию и накопление мобильных соединений азота в полях севооборотов позволили разработать подходы к диагностике азотного питания полевых культур. Для практических целей наиболее

перспективны два направления почвенной диагностики: агротехническое и агрохимическое.

Потенциальное плодородие почв, запасы и накопление неспецифических органических веществ, климатические и погодные особенности обуславливают, несмотря на варьирование по годам, довольно устойчивые пределы обеспеченности почв доступным для растений азотом по предшественникам севооборотов (прил. 11). На малогумусных дерново-подзолистых, светло-серых лесных, светло-каштановых и каштановых почвах практически во все годы и по всем предшественникам складывается неблагоприятный азотный режим. Исключение составляют только те поля, где при подготовке пара внесены органические удобрения (навоз, компосты, сидераты) или систематически применялись удобрения в предшествующие годы (окультуренные почвы).

Обычно на серых лесных, черноземах южных и темно-каштановых почвах высокая обеспеченность растений азотом возможна только при посеве по удобренному пару. В паровом поле без внесения органических удобрений в этих почвах накапливается доступного азота лишь на уровне средней (после других предшественников – низкой) обеспеченности. Следовательно, преобладающая доля пашни, расположенной на дерново-подзолистых, серых лесных и каштановых почвах, а также южных черноземах, характеризуется слабой обеспеченностью нитратным азотом.

Наиболее высокое накопление доступного азота для растений характерно для обыкновенных и выщелоченных черноземов, темно-серых лесных и лугово-черноземных почв. Около половины полей севооборотов имеют высокоую и среднюю обеспеченность почв азотом. На другой половине (после зернофуражных и пласта многолетних трав поздней распашки, злаковых многолетних трав и др.) требуется применение азотных удобрений.

Уровни продуктивности предшествующей культуры, степень ее удобренности, засоренность посевов и некоторые другие факторы могут вносить существенные коррективы в предлагаемую схему. При высокой урожайности культур, поздней уборке урожая, сильной засоренности посевов, запоздалой зяблевой обработке и на весенней вспашке запасы азота в почвах для культур будущего года обычно в 1,5 раза ниже нормативных уровней его содержания. И наоборот, при низком уровне продуктивности, ранней уборке и своевременной основной обработке пашни, хорошем увлажнении и тепловом режиме во вторую половину лета и осенью обеспеченность нитратным азотом будущего урожая будет более высокой.

Методы прогноза обеспеченности полевых культур азотом и дозы внесения азотных удобрений

Определение содержания в почве минерального азота является наиболее достоверным методом прогноза обеспеченности полевых культур азотом и установления потребности их в азотных удобрениях. Для этого следует проводить ежегодное агрохимическое обследование на содержание в по-

чвах подвижного минерального (сумма $N-NO_3$ и $N-NH_4$) или только одного нитратного ($N-NO_3$) азота. Метод широко освоен агрохимслужбой в Сибири, Зауралье, Поволжье и др. регионах страны на почвах с непромывным водным режимом.

На основании полевого отбора почвенных образцов, аналитического определения содержания азота в образцах и камеральной обработки материалов составляются рекомендации по применению азотных удобрений под полевые культуры. Для каждой почвенно-климатической зоны дается информация об обеспеченности почв полей севооборотов нитратами или суммарным количеством подвижного минерального азота. Одновременно рекомендуются приемы и дозы внесения азотных удобрений на полях и под культуры, где выявлена недостаточная обеспеченность почвенным азотом.

Выбор формы азота и глубины взятия образцов зависят от зональных и провинциальных особенностей почвенного покрова, гидротермического режима и интенсивности биологической активности почв той территории, где намечается проводить обследование (Гамзиков, 1981, 2000; Никитишен, 1984).

В Сибири, Зауралье, Поволжье и Предуралье агрохимическое обследование почв достаточно проводить по содержанию $N-NO_3$. При этом в Восточной Сибири содержание нитратного азота допустимо определять только в пахотном слое, а в Западной Сибири, Предуралье и Поволжье – в слое 0–40 см.

Прогноз обеспеченности нитратным азотом яровых культур на сезонно–мерзлотных почвах Сибири, Урала, Поволжья и Зауралья можно проводить в два срока: поздней осенью или весной до посева. Содержание нитратов в течение периода осень–зима–весна остается, как правило, в пределах одного класса обеспеченности. Организационно агрохимическое обследование удобнее вести осенью, поскольку в течение осенне-зимнего периода отобранные образцы анализируются в лаборатории и к весне хозяйства всех категорий получают рекомендации по размещению азотных удобрений по полям севооборотов и земельным участкам. Осеннее агрохимическое обследование проводят после торможения процессов минерализации, то есть при затухании микробиологической деятельности. Такой период наступает при опускании среднесуточной температуры на глубине пахотного слоя ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В каждой природной зоне начало осеннего агрохимического обследования по обеспеченности азотом уточняется на основании данных метеостанций.

В условиях Нечерноземья, ЦЧО и Северного Кавказа более достоверные результаты для прогноза обеспеченности растений азотом дает сумма подвижного минерального азота ($N-NO_3 + N-NH_4$). В этих регионах оптимальная глубина взятия почвенных образцов обычно составляет 0–60 см. При разных погодных условиях (засуха, переувлажнение и т. д.) глубина отбора образцов может меняться от 0–40 до 0–100 см в зависимости от характера распределения минерального азота по профилю почв. Контрольный отбор образцов перед массовым обследованием позволяет определить форму азота и наиболее оптимальную глубину их взятия с учетом сложившихся

гидротермических условий года. Оптимальным для агрохимического обследования считается тот слой, в котором средневзвешенное содержание подвижного минерального (или нитратного) азота превышает 50% от его количества в слое 0–100 см.

Агрохимическое обследование с целью диагностики обеспеченности растений подвижным минеральным или нитратным азотом под озимые культуры во всех регионах проводят перед посевом. В европейской части страны, где почвы промерзают на небольшую глубину и на короткий период, более объективную информацию дают весенние сроки агрохимического обследования.

Уровни обеспеченности культур доступными соединениями минерального азота за счет почвенных запасов и потребности в дополнительном внесении азотных удобрений устанавливают в соответствии с предлагаемыми грациями (табл. 47).

Таблица 47

Индексы обеспеченности растений минеральными соединениями почвенного азота (мг/кг) и определения потребности полевых культур в азотных удобрениях (Гамзиков, 2013)

Обеспеченность азотом	0–20 см	0–40 см	0–60 см	Потребность в удобрении
N-NO ₃				
Очень низкая	< 10	< 5	< 3	Очень высокая
Низкая	10–15	5–10	3–8	Высокая
Средняя	15–20	10–15	8–12	Средняя
Высокая	> 20	> 15	> 12	Отсутствует
N-NO ₃ +N-NH ₄				
Очень низкая	< 15	< 7	< 5	Очень высокая
Низкая	15–30	7–15	5–10	Высокая
Средняя	30–50	15–25	10–20	Средняя
Высокая	> 50	> 25	> 20	Отсутствует

В диагностических целях содержание минеральных соединений азота в слое 0–20 см используется на мерзлотных и сезонно-мерзлотных почвах Средней и Восточной Сибири, в слое 0–40 см – на сезонно-мерзлотных почвах Западной Сибири, Зауралья, Предуралья и Поволжья, в слое 0–60 см – на почвах Нечерноземья, ЦЧО и Северного Кавказа. Для диагностики азотного питания полевых культур на территориях с мерзлотным и сезонно-мерзлотным режимом почв целесообразнее использовать исходное содержание только нитратного азота, на территориях с коротким периодом и неглубоким промерзанием почв – более надежна сумма нитратного и аммонийного азота.

На основании информации, полученной в результате агрохимического обследования, определяется потребность культур севооборота в азотных удобрениях. В зависимости от культуры, планируемой продуктивности и технологии их применения корректируются нормы внесения азота. Дозы удобрений, сроки и способы внесения определяют в каждом конкретном

случае, исходя из планируемой продуктивности, технологических и экономических возможностей хозяйства.

В экстенсивных технологиях улучшение азотного режима проводят в основном за счет мобилизации почвенного плодородия: увеличения площадей под чистыми парами, ранней зяблевой обработки почв, августовской распашки многолетних трав, междурядных рыхлений пропашных культур. Переход в степи и лесостепи на короткоротационные севообороты (3–4-польные), а в некоторых хозяйствах – на двухполку (пар–посев), как временная мера, не только дает возможность очистить поля от сорняков, но и позволяет создать благоприятные условия азотного питания. В значительной мере улучшению обеспеченности почв азотом способствуют сидеральные культуры (донник, рапс, однолетние бобовые и др.), пожнивные посевы, запашка соломы и других послеуборочных остатков, насыщение севооборотов бобовыми однолетними и многолетними культурами. Минеральные азотные удобрения при экстенсивной системе вносят в виде комплексных удобрений при посеве в рядки.

В нормальных технологиях, наряду с улучшением азотного режима за счет биологических ресурсов, допускают применение азотных удобрений на всех полях недостаточной обеспеченности минеральными соединениями азота. Дозы внесения азотных удобрений невысокие, рассчитанные на поддержание азотного питания растений.

При интенсивных технологиях азотные удобрения, как и другие туки, вносятся из расчета на бездефицитный баланс элементов питания и максимальную оплату продукцией единицы питательного вещества.

Широкое освоение изложенных подходов почвенной диагностики азотного питания полевых культур позволит за счет правильного распределения азотных удобрений по полям севооборота оптимизировать питание растений, исключить непродуктивный расход почвенного и промышленного азота, предотвратить загрязнение окружающей среды. Затраты времени, труда и финансов на агрохимическое обследование и составление планов применения удобрений, включая азотные, экономически оправдываются. Рациональное использование азотных удобрений дает возможность повысить урожайность полевых культур, повысить оплату 1 кг азота внесенных туков – с 3–4 до 8–10 кг зерна улучшить качество растениеводческой продукции, обеспечить ее безопасность увеличить в 1,5 раза выход белка.

Зональные особенности влияния доз азотных удобрений на содержание белка в зерне пшеницы

Природные факторы, формирующие географические закономерности действия азотных удобрений, многообразны и нередко взаимосвязаны. Более детальное и глубокое их исследование является непременным условием построения эффективных и экологически обоснованных зональных систем земледелия.

Наличие определенных географических закономерностей в действии азотных удобрений вполне очевидно. В рассмотренных выше материалах шла речь об урожаях, то есть о количестве зерна. Не менее значима и другая сторона проблемы, связанная с накоплением азота в растениях, в том числе – белковых веществ в зерне.

Исследования действия доз азотных удобрений на содержание белковых веществ в зерне полезны не только для обоснования, рекомендаций по производству высококачественной продукции. Интересен и другой аспект: уточнение верхнего предела дозы азота в связи с экономической ее оценкой.

Влияние природных условий на содержание белка в зерне пшеницы давно привлекает внимание исследователей. В отечественной агрономической науке история этой проблемы насчитывает более сотни лет: еще в 1865 г. Н.Э. Ляковским была опубликована работа «О химическом составе пшеничного зерна», в которой автор приходит к такому заключению: «... состав зерна, несомненно, зависит от следующих 4 факторов: от породы, почвы, удобрения, климатических условий».

Важнейшим этапом в развитии проблемы стало проведение в течение 1923–1926 гг. «географических посевов» пшеницы. Работа эта была организована Н.И. Вавиловым. В 110 пунктах, охватывающих всю территорию Союза, высевался ряд сортов пшеницы, причем использовался чистотелинейный материал. «Географические посева» производились по единой методике в условиях крестьянских хозяйств. Результаты были обобщены и опубликованы Н.Н. Ивановым в 1929 г. Они свидетельствуют об увеличении белковости пшениц при передвижении в южном и восточном направлении. Автор отмечает, что влияние природных условий на химический состав зерна очень велико: недостаток влаги и хорошие условия азотного почвенного питания вызывают почти двукратное увеличение содержание белка у одних и тех же сортов пшеницы, высеянной в разных зонах Союза. Следует особо отметить весьма высокую по нашим современным представлениям белковость яровой пшеницы в этих опытах: очень часто содержание белка достигает 18–20%, особенно в пределах Черноземной зоны России и Украины, а также на Среднем и Нижнем Поволжье. Не случайно Н.Н. Иванов писал о том, что характерной чертой наших пшениц является высокое содержание в них белка, но хорошие качества, покупается дорогой ценой, так как они связаны с низкой урожайностью. И далее: «Большой процент пшениц не искупает тех значительных понижений урожая, которые наблюдаются при недостатке воды».

В соответствии с этими воззрениями и практическими нуждами страны все дальнейшее развитие земледелия было направлено на повышение урожайности. В результате белковость наших пшениц стала ниже, но основные пространственные закономерности, обнаруженные при проведении серии «географических посевов» 1923–1926 гг. сохранились.

Эта тема получила дальнейшее развитие в исследованиях Географической сети опытов с удобрениями, организованной в 1950-х гг. П.Г. Найдным. В результате появился ряд работ обобщающего характера, в которых

рассматривалось влияние удобрений на качество пшеницы в различных природных условиях, и было установлено, что практически во всех зонах возделывания этой культуры наблюдается повышение белковости зерна при внесении азота (Аникст, Тюрюканов, 1994).

Накопившийся к настоящему времени экспериментальный материал позволяет обобщить данные полевых опытов, которые касаются зональных особенностей влияния доз азотного удобрения на содержание белка в зерне пшеницы.

В представленную здесь монографию включены достоверные результаты полевых экспериментов с сортами мягкой яровой пшеницы (опыты с удобрениями твердых пшениц были в данном случае исключены в целях более строгого географического сравнения). Пшеницу высевали по зерновым и пропашным предшественникам, после которых действие азота проявляется наиболее сильно. Фоном служили фосфорно-калийные удобрения. В большинстве случаев азот вносили в виде аммиачной селитры. Были использованы результаты только краткосрочных опытов, закладку которых ежегодно осуществляли на новом месте в пределах одного опытного учреждения. Непременным условием включения в обобщение было наличие по каждому пункту данных по урожаю зерна, и по его белковости не менее, чем за 3 года. В подавляющем большинстве случаев речь идет о сыром белке.

Данные, приведенные в таблице 48, свидетельствуют о том, несмотря на смену сортов и технологий возделывания, можно наблюдать явление, обнаруженное еще в начале прошлого столетия: при передвижении от южнотаежно-лесной зоны к лесостепной и степной содержание белка в зерне пшеницы увеличивается. Определенная географическая закономерность прослеживается не только на контроле (в табл. 48, 49 это фосфорно-калийный вариант), но и при внесении азотных удобрений.

Таблица 48

Действие доз азотных удобрений на урожай зерна яровой пшеницы и содержание в нем белка

Зона	Доза N (кг/га)					Число	
	0	30–40	60	90	120	пунктов	опыто-лет
Урожай, ц/га							
Южнотаежно-лесная	20,7	29,3	29,4	32,0	30,2	4	12
	21,2	27,2	30,7	31,7	30,1		
Лесостепная	21,1	26,1	25,4	26,1	27,2	26	106
	21,9	24,0	25,3	27,0	28,7		
Степная и сухостепная	14,5	15,8	15,0	–	–	5	16
Содержание белка в зерне, %							
Южнотаежно-лесная	11,4	11,8	12,5	13,0	13,2	4	12
	11,4	11,9	12,4	12,9	13,4		
Лесостепная	12,2	13,0	13,5	13,7	14,2	26	106
	12,4	13,0	13,4	14,0	14,5		
Степная и сухостепная	14,3	15,2	14,8	–	–	5	16

Таблица 49

**Действие доз азотного удобрения на сбор белка
с урожаем зерна яровой пшеницы**

Зона	Доза N, кг/га				
	0	30–40	60	90	120
Сбор белка, кг/га					
Южнотаежно-лесная	236	345	367	416	399
	269	309	349	389	429
Лесостепная	258	339	342	359	385
	269	310	338	372	407
Степная и сухостепная	208	240	222	–	–
Прибавка сбора белка, кг/га					
Южнотаежно-лесная	–	109	131	180	163
Лесостепная	–	81	84	101	127
Степная и сухостепная	–	32	14	–	–
Количество дополнительного белка на 1 кг азота, кг					
Южнотаежно-лесная	–	3,6	2,2	2,0	1,4
Лесостепная	–	2,3	1,4	1,1	1,1
Степная и сухостепная	–	0,8	0,2	–	–

На дерново-подзолистых почвах южнотаежно-лесной зоны рост урожая зерна прекращается при внесении N_{60-90} , эти же дозы можно считать достаточными для достижения содержания белка в зерне, равного 13%, и наиболее высокой прибавки сбора белка (табл. 48, 49). Если же говорить об окупаемости 1 кг азота удобрений дополнительной (по сравнению с предшествующей дозой азота) прибавкой от сбора белка, то оптимум находится в пределах N_{60-90} .

На серых лесостепных почвах и выщелоченных черноземах лесостепной зоны и урожай, и процент белка постепенно увеличиваются вплоть до дозы N_{90} , но наибольшее количество дополнительного белка, приходящегося на 1 кг азотных удобрений, получено при N_{40-60} .

В более засушливых условиях степной и сухостепной зон увеличение дозы азота сверх N_{30-40} не способствовало увеличению содержания белка.

Разумеется, речь здесь идет о самых общих оценках. В конкретных хозяйственных ситуациях отклонения от приведенных данных могут быть весьма заметными. Тем не менее, материалы таблиц 48, 49 свидетельствуют о наличии определенных географических закономерностей в изменениях белковости зерна яровой пшеницы под влиянием разных доз азотных удобрений.

Вопрос об экономическом оптимуме доз решается в каждом конкретном случае исходя из цены на зерно с учетом его качества и стоимости удобрений (вместе с затратами на транспортировку и внесение). Что касается агроэкологических ограничений, то для южнотаежно-лесной и лесостепной зоны дозы, не превышающие N_{60} , могут считаться вполне допустимыми, поскольку они находятся в пределах накопления азота фитомассой яровой пшеницы при урожаях зерна 20–30 ц/га.

В этой связи следует особо отметить, что при внесении азотных удобрений в агроценозах диапазон экономически эффективных и экономически

допустимых решений довольно узок. Это представляется вполне логичным. В каждом конкретном случае, в зависимости от условий произрастания, сельскохозяйственные растения (в нашем случае – яровая пшеница.) способны усвоить и реализовать определенное количество азота. Если оно превышает (в частности при внесении завышенных доз азотных удобрений), в почве остается неиспользованный азот, а это невыгодно экономически и опасно в экологическом отношении.

Результаты регрессионного анализа данных по влиянию доз азотного удобрения на урожай зерна, процент, белка и его сбор приведены в таблице 50.

Таблица 50

Уравнения регрессии, выражающие действие доз азотного удобрения (N, кг/га) на урожай зерна яровой пшеницы (Y, ц/га), содержание в нем белка (Б, %) и сбор белка (СБ, кг/га)

Зона	Уравнение регрессии	R _{факт}	R _{табл. 0,01}
Южнотаежно-лесная	$Y = 21,247 + 0,242N - 0,001N^2$	0,72	0,59
	$Б = 11,379 + 0,017N$	0,50	0,59
	$СБ = 269,386 + 1,332N$	0,70	0,59
Лесостепная	$Y = 21,881 + 0,057N$	1,35	0,28
	$Б = 12,381 + 0,018N$	0,47	0,28
	$СБ = 269,251 + 1,146N$	0,47	0,28

Для степной и сухостепной зон аналогичные регрессионные зависимости получить не удалось: коэффициенты парной корреляции между дозами азота и урожаями, содержанием и сбором белка недостоверны.

Поскольку большинство исследователей сходятся во мнении о зависимости качества зерна пшеницы от климатических особенностей территории, было предпринято вычисление коэффициентов парной корреляции между процентным содержанием белка в зерне и несколькими показателями атмосферного увлажнения. При этом использованы усредненные за ряд лет данные, по отдельным пунктам экспериментирования и среднееголетние показатели увлажнения применительно к этим же точкам, заимствованные из справочной литературы. Результаты корреляционного анализа приведены в таблице 51.

Таблица 51

Коэффициенты парной корреляции между содержанием белка в зерне яровой пшеницы и показателями атмосферного увлажнения (n = 39, R_{теор.} 0,05 = 0,31)

Вариант	Осадки за год, мм	Период с t° > 10°С	
		Осадки, мм	ГТК
Без удобрений	0,02	-0,30	-0,36
РК	-0,01	-0,32	-0,34
НРК	0,03	-0,34	-0,34

Связь между среднегодовым количеством осадков и содержанием белка в зерне не установлена. Накопление белка в зерне зависит от условий увлажнения вегетационного периода: оно коррелирует и с количеством осадков,

и с гидротермическим коэффициентом по Селянинову (ГТК). Коэффициенты корреляции не очень высокие, но достоверные на 5%-м уровне значимости. Таким образом, степень влияния условий атмосферного увлажнения на содержание белковых веществ в зерне пшеницы поддается измерению, и определенная доля территориального варьирования белковости должна быть отнесена на счет именно этого фактора.

Таким образом, можно говорить не только о несомненном влиянии почвенно-климатических условий на содержание белковых веществ в зерне, но и о существовании определенных географических закономерностей в отношении действия на белковость азотных удобрений.

Изложенные выше экспериментальные материалы касались мягких пшениц.

Немалое практическое значение может иметь сравнение мягкой и твердой пшеницы в отношении их способности усиливать накопление белка в зерне под влиянием азотных удобрений. С этой точки зрения интересно рассмотреть результаты полевых опытов, в которых одновременно высевали мягкую и твердую пшеницу. Предшественниками были зерновые и пропашные культуры, после которых действие азота должно проявиться более отчетливо. Контролем служил вариант с фосфорными и калийными удобрениями. Каждый опыт повторен в течение 3–4 лет.

На выщелоченных черноземах Татарстана содержание белка в зерне без азотных удобрений составило у мягкой пшеницы 12,8%, у твердой – 15,2%. Внесение азота в дозах 60, 90 и 120 кг/га д.в. сопровождалось повышением белковости зерна мягкой пшеницы до 13,4; 14,3 и 14,6%, твердой – соответственно до 16,3; 17,0 и 17,7%. Прирост процента белка по отношению к контролю в первом случае равнялся 0,6; 1,5 и 1,8%, во втором 1,1; 1,8 и 2,5%, то есть у твердой пшеницы усиление накопления белковых веществ под влиянием азотных удобрений происходило более активно.

На слабовыщелоченных черноземах Курской области различия в качестве зерна мягкой и твердой пшеницы проявились следующим образом: без внесения азота первая содержала 10,9%, вторая 11,6% белка, N_{60} и N_{120} повысили белковость мягкой пшеницы до 13,0 и 13,2% (на 2,1 и 2,3%), твердой – до 14,0 и 14,4% (на 2,4 и 2,8%).

В условиях сухостепной зоны заметной разницы в действии азотных удобрений не наблюдалось. На светло-каштановых почвах Волгоградской области в зерне неудобренной мягкой пшеницы обнаружено 13,2% белка, твердой – 13,5%. Внесение $N_{40}P_{60}$ повысило белковость мягкой пшеницы до 14,7%, твердой – до 14,8%, то есть прирост в первом случае составил 1,5%, во втором – 1,3%. Такой результат, обусловленный засушливостью климата и особенностями почвенных условий, вполне соответствует воззрениям Н.М. Тулайкова, одного из первых исследователей влияния природных факторов на белковость русской пшеницы. Он полагал, что в засушливых условиях Поволжья может происходить стирание ботанических особенностей разновидностей пшеницы, так как благодаря высокому осмотическому давлению почвенного раствора вся пшеница дает почти одинаковое содержание белка в зерне (Сычев, 2003).

Интересно, что в этих же засушливых условиях сухостепного Поволжья полив значительно меняет картину, приближая ее к той, которая наблюдается в более благоприятных по увлажнению зонах. Так, на орошаемых светлокаштановых почвах Саратовской области (Киселева, 1983) без азотных удобрений зерно мягкой пшеницы содержало 12,8%, твердой – 12,0% белка. При внесении N_{60} и N_{120} белковость мягкой пшеницы составила 12,2 и 14,2%, твердой – 13,2 и 15,1%.

Аналогичное явление наблюдалось на темно-каштановых орошаемых почвах той же области: применение азота в дозах 60, 90 и 120 кг/га д.в. сопровождалось повышением содержания белка у мягкой пшеницы до 14,0; 14,0 и 14,5% (без азота 13,7%), у твердой – до 14,4; 14,8 и 15,1% (без азота 12,8%).

Совокупность приведенных данных о влиянии азотного удобрения на качество зерна пшеницы позволяют прийти к следующему заключению. В условиях достаточного увлажнения преимущество твердых пшениц в отношении их способности повышать белковость зерна под влиянием азотных удобрений проявляется достаточно четко: при одних и тех же дозах азота твердая пшеница обычно дает зерно более высокого качества, чем мягкая. Отсюда следует, что для получения зерна определенной белковости твердая пшеница потребует меньшего количества азотных удобрений, по сравнению с мягкой. Конечно, в каждом конкретном случае придется учитывать действие удобрений не только на качество, но и на величину урожая, а, в конечном счете – на общий сбор белка. Тем не менее, правильный выбор сорта сельскохозяйственной культуры при решении конкретных хозяйственных задач может способствовать снижению азотных нагрузок на пашню, что весьма существенно в экологическом отношении.

В отечественной агрохимической литературе имеется довольно много сведений о хозяйственном выносе питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур. В нашем случае речь идет об отчуждении с поля азота с зерном и соломой. Данных об общем накоплении биофилов во всей фитомассе, включая корневую систему, значительно меньше.

Существует ряд работ обобщающего характера, в которых рассматривается изменение выноса питательных веществ в зависимости от почвенно-климатических условий и удобрения. Приведенные в таблице 52 данные свидетельствуют о том, что в пределах Европейской территории России вырисовывается вполне определенная географическая закономерность: при перемещении от районов распространения дерново-подзолистых почв к лесостепной, степной и сухостепной зонам вынос азота плавно нарастает, причем это прослеживается как на контрольных, так и на удобренных вариантах.

Таблица 52

Вынос азота яровой пшеницей на разных почвах европейской территории России, кг на 1 ц зерна с соответствующим количеством соломы

Почвы	Без удобрений	НПК
Дерново-подзолистые	2,55	3,04
Выщелоченные черноземы	3,21	3,82
Обыкновенные и южные черноземы	3,93	4,02
Каштановые	4,36	5,06

Внесение полного минерального удобрения во всех случаях сопровождается увеличением этого показателя. Это явление вполне объяснимо с точки зрения сведений, изложенных выше: мы уже видели, как в том же направлении падают прибавки от азотных удобрений, и увеличивается содержание белковых веществ в зерне, а обусловлено это изменениями и климатических условий, и зональными особенностями почвенного питания растений.

Сведения о размерах отчуждения питательных веществ с поля при уборке урожая, которые обычно используются в балансовых расчетах различных уровней, могут быть весьма полезны и при решении задач экологического плана. Еще более интересны в этом отношении данные по общему содержанию биофилов во всей фитомассе сельскохозяйственных культур. Вполне очевидно, что тот азот, который связан в биоорганические формы и тем самым удержан от активного передвижения в почве и ландшафте, наименее опасен в экологическом отношении.

Способность агроценозов увеличивать свою фитомассу и повышать количество связанного ею азота зависит, как мы видели и от природных, и от антропогенных факторов. Но не следует забывать и о природе самих растений, поскольку каждому виду свойственен определенный химический состав. Он может изменяться в зависимости от условий произрастания, но во вполне определенных пределах, присущих данному виду. Это положение заслуживает особого внимания, поскольку оно является одной из теоретических предпосылок, необходимых для разработки методических основ нормирования антропогенных нагрузок на пашню.

В известной работе А.Н. Виноградова, посвященной геохимии живого вещества (1932), сформулирован тезис о том, что «...химический элементарный состав растений ведет себя так же, как любой другой признак организмов. В целом, он всегда остается типичным для данного организма». Далее речь идет о возможной географической изменчивости этого признака: «... наряду с однообразными изменениями морфы у ряда организмов происходят аналогичные им изменения химического состава». И в заключение: «... этот признак связывает между собой не только все организмы и все живое вещество в целом, но и ближайшим образом связывает все организмы с химией земной коры с историей ее атомов». Эти воззрения в значительной мере были предопределены работами В.И. Вернадского, в частности идеей о постоянстве среднего состава, живого вещества на нашей планете: «... не только количество, но и средний химический состав живого вещества должен быть неизменным не только в историческое, но и в геологическое время. С геохимической точки зрения это постоянство еще более, несомненно, чем постоянство количества живого вещества» (Сычев, Шафран и др., 2009).

Представление о видовом постоянстве химического состава растений и о связи последнего с морфологическим строением позволило предположить, что между размерами урожая и выноса зерном и соломой с одной стороны, и накоплением питательных веществ всей фитомассой растений – с другой – должна существовать весьма тесная количественная связь и вполне целесообразен поиск соответствующих регрессионных зависимостей. С этой целью был проведен сбор литературных сведений, как разность между общим его накоплением в фитомассе и хозяйственным выносом.

Все эти сведения могут быть весьма полезны для разработки зональных систем практических мероприятий по регулированию азотного цикла в агроценозах.

Итак, каждый ботанический вид (в нашем случае – это яровая пшеница и ячмень) обладает определенным, свойственным лишь ему потенциалом наращивания фитомассы и, соответственно, включения в нее азота. При внесении азотных удобрений этот потенциал будет реализован по-разному в зависимости от условий произрастания – и географических, и антропогенных.

Интересным и важным представляется и более широкий аспект круговорота биофилов. Поскольку каждому виду растений свойственно свое содержание и соотношение входящих в его состав элементов, различен и количественный «вклад» разных видов в общий круговорот веществ. Это должно проявиться в пределах поля, ландшафта, провинции, зоны и, в конечном счете на планетарном уровне. Так проблема, которая казалась бы, относится к области земледелия, перерастает, перетекает в область геоэкологии. Практическое ее приложение в любом случае зависит от наличия количественных оценок, поэтому создание соответствующей базы данных является сейчас одной из наиболее важных задач.

При формировании информационной базы, предназначенной для практического решения экологических проблем земледелия, во главу угла должна быть поставлена концепция зональности, плодотворность которой как в теоретическом, так и в прикладном аспектах была доказана неоднократно. Целесообразность зонального (и «провинциального») подхода обусловлена огромным разнообразием природных (и соответственно – хозяйственных) условий в пределах земледельческой территории России.

Удобными для практического использования могли стать, по-видимому, схемы, построенные на основе одного из существующих в настоящее время фундаментальных районирований. Если основным содержанием агрохимического районирования является эффективность отдельных видов удобрений, то для решения экологических проблем также могут быть созданы специальные схемы, посвященные совершенно конкретным задачам. В частности, если речь идет об ограничении азотных нагрузок на 1 га пашни, следует говорить о построении одной из схем, входящих в общий пакет эколого-агрохимического районирования земледельческой территории России. Этот пакет в свою очередь может быть составной частью эколого-агрономического или эколого-агрогеохимического (Башкин, 1990) деления территории. Иерархия схем районирования и соответствующая терминология требуют специального обсуждения и разработки. Очередность их построения должна определяться внутренней логикой и актуальностью проблемы.

Ограничение азотных нагрузок на единицу площади пашни по праву считается в настоящее время одной из наиболее актуальных экологических проблем земледелия. Поскольку нельзя не учитывать необходимость производства достаточных объемов сельскохозяйственной продукции, следует говорить об агроэкологическом нормировании применения азотных удобрений.

Для успешного решения задач, связанных с таким нормированием, необходимо целенаправленное накопление экспериментальных материалов

и формирование на их основе соответствующей информационной базы. При этом нужно ориентироваться не только на постановку и проведение новых экспериментов, но и на возможно более полное использование уже имеющихся сведений. Агрономическая литература последних десятилетий содержит немалые объемы фактических материалов, которые первоначально предназначались для других целей, но могут быть интерпретированы и использованы в агроэкологических аспектах.

В настоящее время мы располагаем большим объемом материалов, полученных в «географических», (то есть массовых, охватывающих определенные территории и проведенных по единым заранее разработанным методикам) полевых экспериментов.

Для решения задач экологического плана особый интерес представляют опыты с возрастающими дозами азотных удобрений под отдельные сельскохозяйственные культуры и севооборотные эксперименты с разной насыщенностью азотом.

При решении проблемы агроэкологического нормирования применения азотных удобрений необходимо привлечь результаты исследований по действию туков на качество получаемой продукции, в частности – на дополнительное накопление белковых веществ в зерне.

Но еще важнее учитывать возможность накопления в продукции вредных веществ вследствие неправильного применения азотных удобрений.

Вполне очевидно, что для реализации определенных капиталовложения не только в само сельскохозяйственное производство, но также и в науку, и в подготовку агрономических кадров, способных воспринять и применить на практике сведения, добытые в научной сфере. Другого разумного пути попросту нет, и раньше или позже он должен быть реализован.

Изучение географии действия удобрений имеет непреходящее значение именно вследствие очень большого разнообразия природных условий земледельческой территории нашей страны. Задача заключается в том, чтобы в каждом конкретном пункте, применительно к его индивидуальным условиям, достичь определенного уровня продуктивности земледелия и при этом свести к минимуму отрицательные последствия использования удобрений.

ФОСФАТНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЯХ

Одним из важных признаков плодородия почв является степень обеспеченности их доступными формами фосфора. Достаточное количество усвояемых форм фосфора в почве не только способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур, но и повышает устойчивость растений к высоким и низким температурам, ускоряет их созревание, улучшает качество продукции.

Эффективность фосфорных удобрений в значительной степени зависит от структуры фосфатного фонда почвы, изменение которой подчиняется определенным географическим закономерностям при смене почвенных зон с севера на юг, а в пределах каждой зоны – по почвенно-климатическим районам с запада на восток.

В различных типах почв России содержание валового фосфора колеблется от 0,01 до 0,35% P_2O_5 и определяется главным образом содержанием фосфора в материнской породе, процессами выветривания и генетическими особенностями почвообразования. Исследованиями установлено, что запасы фосфора в почвах увеличиваются при смене почвенно-климатических зон с севера на юг. Как видно из таблицы 53, в слое почвы 0–20 см различных генетических типов почв они колеблются от 1,7 до 4,6 т/га, в слое 0–100 см – от 8,5 до 20,0 т/га P_2O_5 и закономерно повышаются от зоны дерново-подзолистых почв до черноземов и каштановых почв. При этом в почвах более тяжелого гранулометрического состава запасы валового фосфора заметно больше, чем в легких почвах. В серых лесных почвах они возрастают от светло-серых к темно-серым. В черноземных почвах наиболее высокие запасы наблюдаются в выщелоченных и типичных подтипах (табл. 53).

Соотношение между органическими и минеральными формами в различных генетических типах почв зависит от интенсивности биологических процессов в различных природно-климатических условиях.

В почвах России органические фосфаты занимают 10–80% валового их содержания. В дерново-подзолистых почвах они составляют около 26–27%, в серых лесных – 45%, в черноземах выщелоченных – 72%, в черноземах типичных, обыкновенных, карбонатных – 46–51%. Каштановые почвы бедны органическими фосфатами, где их доля составляет около 23%.

Таблица 53

Запасы валового фосфора в различных типах почв России, т/га P_2O_5
(Адрианов, 2004)

Почвы	Слой почвы			
	0–20	0–50	0–100	0–150
Дерново-подзолистые легкосуглинистые, супесчаные	1,7–2,0	4,0–6,1	8,5–11,0	13,3–16,1
Дерново-подзолистые суглинистые	2,1–2,9	3,4–5,0	9,4–13,0	15,0–18,0
Светло-серые лесные	3,0	5,0	–	–
Серые лесные	3,5	6,0	13,0	–
Темно-серые лесные	3,1	8,0	15,0	–
Черноземы оподзоленные	3,5	8,5	16,0	20,5
Черноземы выщелоченные	4,6	11,4	20,0	–
Черноземы типичные	4,4	10,8	20,0	–
Черноземы обыкновенные	3,7	7,3	13,5	19,8
Черноземы карбонатные	3,7	11,0	–	26,8
Черноземы южные	3,5	8,3	15,0	–
Темно-каштановые	3,6	9,7	18,0	24,4
Каштановые	4,2	–	14,9	–
Светло-каштановые	4,1	11,1	19,0	24,0

Таблица 54

Содержание валового и органического фосфора в различных типах почв по почвенно-агрохимическим районам, мг/кг P_2O_5
(Сычев, Шафран и др., 2010)

Почвы	Западный район		Центральный район		Восточный район	
	валовой фосфор	органический фосфор	валовой фосфор	органический фосфор	валовой фосфор	органический фосфор
Дерново-подзолистые легкосуглинистые, супесчаные, песчаные	990–1230	190	1000–1330	290–350	670–1230	770
Дерново-подзолистые суглинистые	870–1310	190–210	1000–1470	350–430	680–1490	380
Светло-серые, серые, темно-серые лесные	960–1240	410	1350–1800	430–700	1450–2010	750–920
Черноземы выщелоченные, оподзоленные	1560–1700	610–810	1660–2200	810–890	2000–2400	1160–1300
Черноземы типичные, обыкновенные	1720–1830	530–770	1350–2100	870–900	1690–2020	660–1100
Черноземы южные, карбонатные	960–1530	390–670	1470–1640	350–820	1690–2020	660–1100
Темно-каштановые, каштановые, светло-каштановые	1150–1490	250–530	–	–	1200–1830	410–600

В пределах одного и того же генетического типа почвы в направлении с запада на восток по мере увеличения континентальности и засушливости климата, снижения промачивания почвенного профиля, сокращения вегетационного периода, в течение которого более интенсивно происходят процессы фотосинтеза и наблюдается усиление биологической активности в почве, увеличивается содержание валового фосфора, его органических форм и различных минеральных фракций (табл. 54).

Состав минеральных форм фосфатов зависит от генетического типа почв, их минералогического состава и реакции среды. В дерново-подзолистых почвах, ненасыщенных основаниями, преобладают фосфаты полуторных окислов, в почвах лесостепной и степной зон – фракции фосфатов кальция и магния, в почвах сухих степей – в основном фосфаты кальция в труднорастворимых формах (табл. 55).

Таблица 55

**Фракции минеральных фосфатов по Чангу–Джексону
в различных типах и подтипах почв**

Опытное учреждение, почва	Рыхлосвяз. фосфаты		Al – P		Fe – P		Ca – P		Сумма фракций, мг/кг P ₂ O ₅
	мг/кг P ₂ O ₅	%	мг/кг P ₂ O ₅	%	мг/кг P ₂ O ₅	%	мг/кг P ₂ O ₅	%	
Люберецкое оп. поле НИУИФ, дерново-подзолистая супесчаная	–	–	220	48	142	31	94	21	456
ВНИПТИОУ, дерново-подзолистая супесчаная	5	2	47	19	135	56	55	23	242
СЗ НИИСХ, дерново-подзолист. Легкосуглинист	8	2	188	48	80	20	116	30	392
ВИУА, дерново-подзолистая легкосуглинистая Брянской обл.	2	1	87	28	159	50	67	21	315
НИИСХ СВ, дерново-подзолистая среднесуглинист	9	2	127	27	217	46	120	25	473
Смоленская оп. станция ВИУА, дерново-подзолистая среднесуглинист	1	0,5	50	16,5	128	42	125	41	304
Новгородский НИИСХ, дерново-подзолистая тяжелосуглинистая глееватая	5	1	60	12	338	71	75	16	478
Орловская оп. станция, выщелоченный чернозем	*	–	52	24	26	12	139	64	217
Алтайское Приобье, выщелоченный чернозем	6	1	32	5	17	2	618	2	673
Эрастовская оп. станция, обыкновенный чернозем	*		38	14	43	15	200	71	281
Донской СХИ, обыкновенный легкосуглинистый чернозем	0,5	0,1	46	10,9	37	9	340	80	423,5
ФГУ САС «Кавказский», карбонатный легкосуглинистый чернозем	1,2	0,2	42	7,8	25	5	473	87	541,2
Ставропольский НИИСХ, карбонатный чернозем мощный	2,9	1	22	7,4	1	0,3	270	91,3	295,9

Примечание: * – определение не проводилось.

Во всех подтипах почв лесостепной и степной зон в направлении с запада на восток увеличивается относительное содержание фосфатов полуторных окислов.

Характеристика пахотных почв основных природно-сельскохозяйственных зон и федеральных округов по содержанию подвижного фосфора

Одним из важных признаков плодородия почв является степень обеспеченности их доступными формами фосфора. По состоянию на 01.01.2007 г. преобладают пахотные почвы со средним (35,2%) и повышенным (21,4%) содержанием подвижного фосфора. Доля пашни с очень низким и низким содержанием составляет 22,2%, а с высоким и очень высоким – 21,2% (рис. 5).

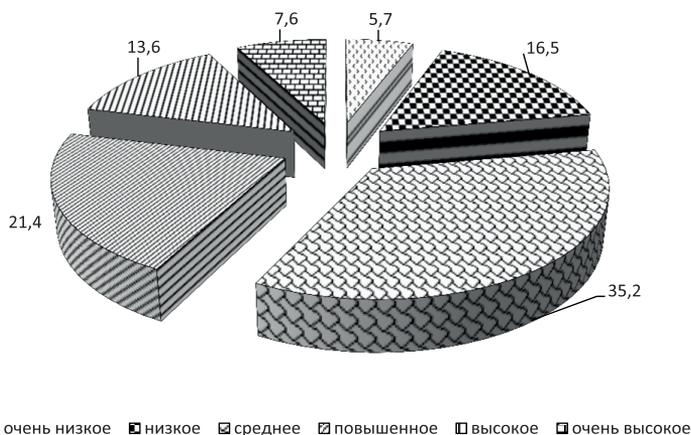


Рис. 5. Распределение пахотных почв Российской Федерации с различным содержанием подвижного фосфора на 01.01.2007 г. (%)

Для природно-сельскохозяйственных зон и провинций, расположенных в северной и центральной части России, общим является преобладание пахотных почв с высоким содержанием подвижного фосфора (табл. 56).

В среднетаежной и южнотаежной-лесной зонах доля пашни с высоким содержанием подвижного фосфора составляет, соответственно, 58,7% и 51,0%, в лесостепной зоне – 47,5%.

В степной и сухостепной зонах большая часть обследованной пашни характеризуется средним содержанием подвижного фосфора (соответственно 41,8% и 42,7%).

Следует отметить, что агрохимическая характеристика пахотных почв внутри зоны при продвижении с запада на восток изменяется в связи с климатическими условиями, с изменением тепло- и влагообеспеченности.

В среднетаежной зоне Европейской провинции преобладают пахотные почвы с высоким содержанием фосфора (63,6%), в Западно-Сибирской провинции – с низким содержанием (62,2%), а в Центрально-Якутской – со средним содержанием (39,1%).

Таблица 56

**Характеристика пахотных почв природно-сельскохозяйственных зон
по содержанию подвижного фосфора**

Зона	Обследованная площадь, тыс. га	Группировка почв с различным содержанием фосфора					
		очень низкое	низкое	среднее	повышенное	высокое	очень высокое
Среднетаежная	767,3	25,0	84,4	207,2	138,6	206,2	105,9
		3,3%	11,0%	27,0%	18,0%	26,9%	13,8%
Южнотаежно-лесная	17596,0	1454,4	2556,0	4605,8	3315,8	3754,3	1909,7
		8,3%	14,5%	26,2%	18,8%	21,3%	10,9%
Лесостепная	42105,7	1450,4	6208,9	14459,5	10380,4	6106,9	3499,6
		3,4%	14,8%	34,3%	24,7%	14,5%	8,3%
Степная	31116,7	2264,3	5841,5	13002,3	6051,5	2629,2	1327,9
		7,3%	18,8%	41,8%	19,4%	8,4%	4,3%
Сухостепная	9369,8	801,8	1653,9	4002,2	1666,3	763,0	482,6
		8,6%	17,6%	42,7%	17,8%	8,1%	5,2%
Полупустынная	1352,4	73,9	212,8	563,2	274,6	130,8	97,1
		5,5%	15,7%	41,6%	20,3%	9,7%	7,2%
Пустынная	163,7	6,1	10,2	44,8	38,6	30,4	33,6
		3,7%	6,2%	27,4%	23,6%	18,6%	20,5%
Уральская горная обл.	657,0	69,7	130,5	224,1	122,1	64,2	46,4
		10,6%	19,8%	34,1%	18,6%	9,8%	7,1%
Южносибирская горная обл.	1537,7	124,8	303,4	464,8	254,8	166,3	223,6
		8,1%	19,7%	30,2%	16,6%	10,8%	14,6%
Кавказско-Крымская горн. обл.	465,6	49,4	90,4	160,6	78,7	43,0	43,5
		10,6%	19,4%	34,5%	16,9%	9,2%	9,4%

В южнотаежно-лесной зоне дерново-подзолистых и бурых лесных почв агрохимическое обследование пахотных земель проведено на площади 17596,0 тыс. га. Здесь почвы с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора занимают лишь 22,8% от обследованной площади. Преобладают такие почвы в Дальневосточной южнотаежно-лесной и Дальневосточно-Амуро-Уссурийской провинциях, где доля пашни с низким содержанием фосфора составляет, соответственно 65,2 и 57,4%. А площадь пахотных почв с высоким содержанием фосфора в этих провинциях не превышает 23,5%.

Более 50,0% пахотных почв провинций южнотаежно-лесной зоны в Европейской части России и в Сибири характеризуются высоким содержанием подвижного фосфора (Прибалтийская – 65,0%, Среднерусская – 55,8%, Среднесибирская – 56,8%). В Западно-Сибирской провинции таких почв 42,3% (рис. 6).

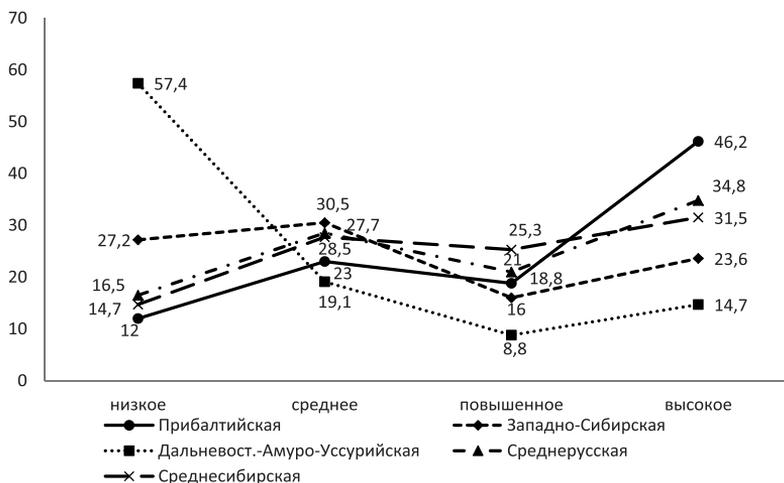


Рис. 6. Содержание подвижного фосфора в пахотных почвах провинций Южнотаежно-лесной зоны (%)

В лесостепной зоне серых лесных почв, выщелоченных и типичных черноземов, где обследованная площадь пашни составляет 42105,7 тыс. га, в отличие от зон, расположенных севернее, увеличивается удельный вес площадей пахотных почв со средним и повышенным содержанием подвижного фосфора (59%), а доля почв с высоким и очень высоким содержанием составляет 22,8%. Такая ситуация характерна для всех провинций этой зоны, кроме Северопресдалтайской лесостепной провинции, где 52,1% пахотных почв имеют высокое и очень высокое содержание подвижного фосфора (рис. 7).

В эту провинцию входит северо-восточная часть Алтайского края, северо-западная часть Кемеровской области, юго-восточная часть Новосибирской области, а также Томский административный район и восточная часть Кривошеинского района Томской области.

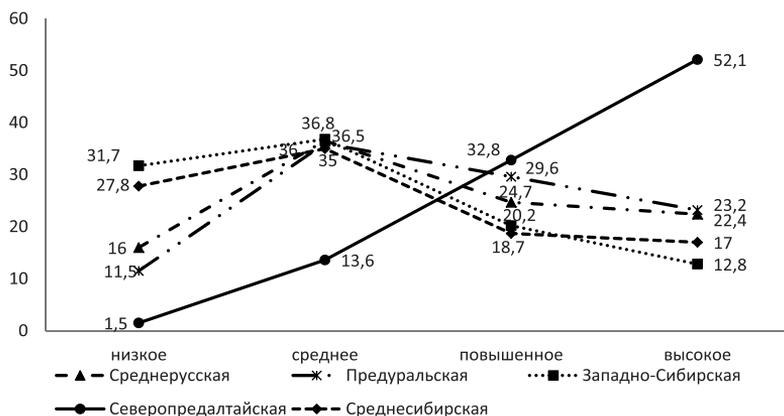


Рис. 7. Содержание подвижного фосфора в пахотных почвах провинций Лесостепной зоны (%)

В Западнопредалтайской степной провинции, куда входит центральная часть Алтайского края (3036,1 тыс. га), преобладают пахотные почвы с высоким содержанием фосфора – 76,3%. Доля почв со средним содержанием – 22,2% и только 1,5% площадей пахотных земель имеют низкое содержание фосфора.

В Восточносибирской степной провинции (центральная и южная часть Республики Бурятия, восточная часть Республики Хакасия, Краснотуранский, Минусинский и Новоселовский районы Красноярского края, центральная и восточная часть Читинской обл.) из 1303,9 тыс. га пахотных земель 38,7% почв пашни характеризуются очень низким и низким содержанием подвижного фосфора, а доля пахотных почв со средним и повышенным содержанием составляет 39,7%.

В Сухостепной зоне каштановых и темно-каштановых почв было обследовано 9369,8 тыс. га пахотных земель. Как в целом по зоне, так и в двух провинциях (Манычско-Донской и Заволжской) преобладают пахотные почвы со средним содержанием подвижного фосфора (соответственно 42,7%, 47,8%, 37,8%). В этих провинциях расположены в основном пахотные почвы Ставропольского края, Волгоградской и Саратовской областей. Доля пашни с высоким и очень высоким содержанием подвижного фосфора в Манычско-Донской и Заволжской провинциях не превышает 15,0% (соответственно 10,3% и 14,1%).

Пахотные почвы Казахстанской сухостепной провинции, куда входят южная часть Оренбургской области и юго-западная часть Алтайского края характеризуются средним (33,4%) и повышенным (23,1%) содержанием фосфора. Доля пашни с низким содержанием фосфора составляет 21,8% и высоким – 21,7%.

В Полупустынной зоне светло-каштановых и бурых почв наибольшая доля пашни со средним (41,6%) и повышенным (20,3%) содержанием фосфора, а с высоким содержанием – всего лишь 16,9% от обследованной площади пахотных земель (1352,4 тыс. га).

В 2010 г. было проведено агрохимическое обследование почв сельскохозяйственных угодий. По результатам агрохимического обследования была представлена полная информация почв всех категорий и о содержании в них основных агрохимических показателей и фосфора в частности. К 2010 г. пахотные почвы России характеризовались в основном средней обеспеченностью подвижного фосфора. Доля пашни со средним и повышенным содержанием подвижного фосфора составляет 57,4% от обследованной площади. Вместе с тем, еще имеются отдельные регионы, где преобладают пахотные почвы с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора. Всего на 01.01.2010 г. пахотные почвы с низким содержанием подвижного фосфора занимают 22,95 млн га, что составляет 22,7% от обследованной площади (рис. 8). За прошедший год площадь пашни с низким содержанием подвижного фосфора в целом по России увеличилась на 428,2 тыс. га, а доля таких почв от общей площади пашни увеличилась на 0,4%.

Обеднены подвижным фосфором пахотные почвы всех субъектов Дальневосточного округа, где в целом по округу доля почв с низким содержанием фосфора составляет 53,8%.

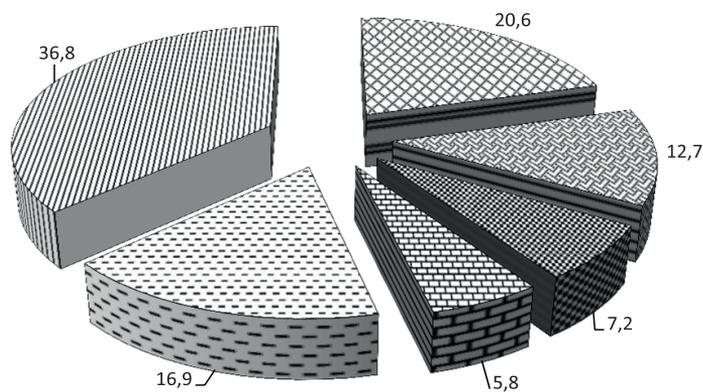


Рис. 8. Распределение пахотных почв Российской Федерации различным содержанием подвижного фосфора на 01.01.2010 г. (%)

Свыше 40% площадей с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора имеют следующие субъекты: Чеченская республика (83,1%), Республика Дагестан (46,1%), Республика Хакасия (54,1%), Приморский (46,3%), Забайкальский (60,3%) и Хабаровский (49,9%) края, Ростовская (43,9%), Курганская (58,1%), Челябинская (64,3%) и Амурская (59,8%) области.

Более 30% площадей пахотных почв с низким содержанием подвижного фосфора имеют Чеченская Республика (34,1%), Республика Хакасия (40,1%), Республика Тыва (35,0%), Забайкальский край (42,3%), Пензенская (32,1%), Курганская (49,7%), и Челябинская (47,1%) области. Значительные площади пахотных почв с очень низким содержанием подвижного фосфора выявлены в Чеченской республике (49,0%), Республике Дагестан (32,0%), Республике Хакасия (14,0%), Хабаровском крае (23,7%), Приморском крае (19,8%), Красноярском крае (12,9%), Забайкальском крае (18,0%), Сахалинской (14,9%), Челябинской (17,2%) и Амурской (33,6%) областях.

В ряде субъектов, расположенных в лесостепной и степной зонах с преобладанием черноземных почв, наличие пашни с низким содержанием подвижного фосфора не превышает 10% от обследованной площади. В некоторых субъектах этой зоны доля пашни с высоким и очень высоким содержанием фосфора менее 35% (Курская область – 31,6%, Тульская – 28,1%, Белгородская область – 21,7%, Рязанская – 22,0%, Липецкая – 15,1%, Орловская – 14,8%, Воронежская – 5,9%, Тамбовская – 5,3%), что свидетельствует об отсутствии мероприятий по воспроизводству почвенного плодородия черноземных почв.

За период 2008–2009 гг. в этих субъектах доля пашни с высоким и очень высоким содержанием фосфора сократилась на 0,1–1,1%.

Хорошо обеспечены подвижным фосфором пахотные почвы субъектов Северо-Западного и Сибирского округов, где свыше 50% площадей пашни с повышенным, высоким и очень высоким содержанием фосфора.

В Центральном округе таких почв – 49,8%, Приволжском – 38,6%, Южном – 28,4%, Северо-Кавказском – 20,2%, Дальневосточном – 25,0%, Ураль-

ском – 18,0%. По сравнению с 2005 г. площади пахотных почв с высоким содержанием фосфора в этих округах практически не изменились.

Все субъекты Северо-Западного округа, кроме Калининградской области, где преобладают дерново-подзолистые почвы, имеют значительные площади пахотных почв с высоким и очень высоким содержанием подвижного фосфора (от 41,9% в Псковской обл. до 80,7% в Республике Карелия).

Устойчивое улучшение фосфатного режима пахотных почв наблюдается лишь в Вологодской и Псковской областях, где в последние 3 года происходит заметное ежегодное сокращение площадей пашни с низким содержанием подвижного фосфора.

В целом по России площадь пашни с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора за период 2005–2010 гг. сократилась, соответственно, на 6,5 и 14,1 тыс. га. В Приволжском федеральном округе сокращение площадей пашни с низким содержанием подвижного фосфора связано с сокращением обследованных площадей и выходом из сельскохозяйственного оборота менее плодородных земель.

В Южном и Северо-Кавказском федеральных округах за прошедшие 5 лет площадь пахотных почв с низким содержанием фосфора значительно увеличилась (соответственно на 231,0 и 115,0 тыс. га), а обследованная площадь пашни при этом сократилась (соответственно на 902,5 и 427,3 тыс. га). Это, видимо, связано с недостаточным внесением фосфорных удобрений.

На 01.01.2016 г. распределение пашни по содержанию подвижного фосфора представлено в таблице 57.

Таблица 57

Распределение площади пашни по содержанию питательных веществ по состоянию на 1 января 2016г., % от обследованной пашни

Федеральный округ	Содержание подвижного фосфора в почве					
	очень низкое	низкое	среднее	повышенное	высокое	очень высокое
Российская федерация	6	16	38	21	12	7
Центральный	2	10	35	26	18	9
Северо-Западный	2	8	22	21	30	17
Южный	4	16	47	19	8	5
Северо-Кавказский	9	23	47	13	5	2
Приволжский	7	17	39	19	11	7
Уральский	12	40	31	9	4	4
Сибирский	3	10	34	28	15	11
Дальневосточный	36	23	22	9	7	3

В целом по Российской Федерации произошло увеличение площадей пашни со средним содержанием фосфора (табл. 58).

Процесс химизации сельскохозяйственного производства дал положительный результат в восстановлении плодородия пахотных почв. Во всех природно-сельскохозяйственных зонах прослеживается тенденция сокращение площадей пахотных земель с низким содержанием и увеличение со средним содержанием подвижного фосфора.

Таблица 58

**Распределение площади пашни Российской Федерации, %
от обследованной пашни**

Годы обследований	Содержание подвижного фосфора в почве					
	очень низкое	низкое	среднее	повышенное	высокое	очень высокое
2010	5,8	16,9	36,8	20,8	12,7	7,2
2016	6,0	16,0	38,0	21,0	12,0	7,0

Наибольшие изменения произошли в среднетаежной и южнотаежно-лесной зонах, где площади пахотных почв с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора за истекший период сократились, соответственно, на 46,1 и 43,1% и увеличилась площадь пашни с повышенным, высоким и очень высоким содержанием фосфора на 40,3–38,0%.

В других природно-сельскохозяйственных зонах эти изменения менее значительные. Сокращение площадей пашни с низким содержанием подвижного фосфора колеблется от 1,7% в лесотундровой зоне до 24,7% в лесостепной зоне.

Однако в провинциях различных зон в зависимости от их территориального расположения динамика плодородия пахотных почв по содержанию подвижного фосфора неоднозначна. В Западносибирской провинции Среднетаежной зоны сократились площади пахотных почв со средним содержанием подвижного фосфора на 19,1%. При этом площадь пашни с высоким содержанием фосфора увеличилась лишь на 5,1%, а с низким содержанием – на 14,0%, что указывает на низкий уровень применения фосфорных удобрений в этом регионе.

Во всех провинциях южнотаежно-лесной зоны наблюдаются позитивные изменения по содержанию подвижного фосфора в пахотных почвах. Наибольшие изменения концентрации подвижного фосфора в пахотных почвах произошли в Среднерусской провинции (в основном регионы Центрального федерального округа), где площади пахотных почв с низким содержанием подвижного фосфора сократились на 51,8%, а с высоким – увеличились на 45,4% (рис. 9).

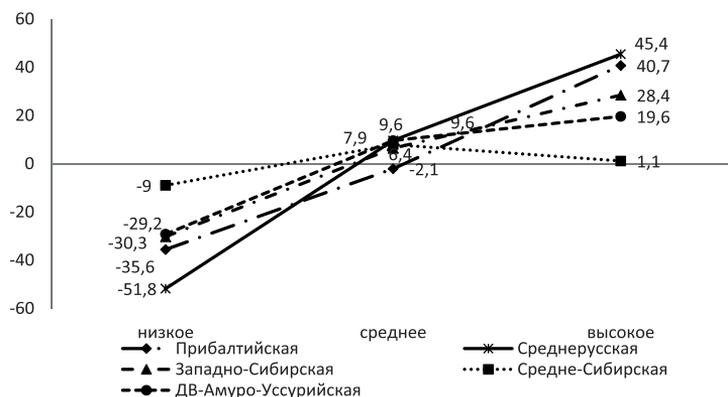


Рис. 9. Динамика содержания подвижного фосфора в пахотных почвах провинций южнотаежно-лесной зоны (1972–2007 гг.)

В других провинциях южнотаежно-лесной зоны эти изменения менее значимые. В Среднесибирской провинции (Красноярский край, Иркутская область) сокращение площадей пахотных почв с низким содержанием фосфора составило 9,0%, перейдя в группу среднего содержания.

Лесостепная зона серых лесных, оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов является основной зоной производства сельскохозяйственной продукции. В этой зоне 42105,7 тыс. га пахотных земель. Во всех провинциях зоны наблюдается положительная динамика по содержанию подвижного фосфора. Наилучшие показатели положительной тенденции по фосфору в Среднерусской провинции (это в основном регионы Центрального и части Приволжского федеральных округов), где площадь пашни с высоким содержанием подвижного фосфора увеличилась на 6091,3 тыс. га (34,4%) (рис. 10).

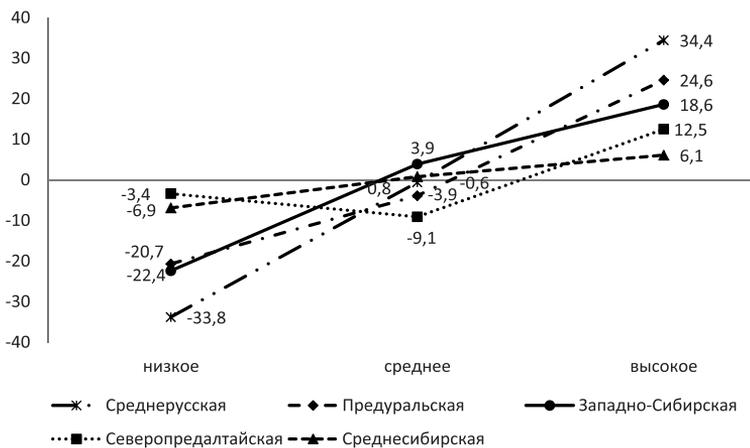


Рис. 10. Динамика содержания подвижного фосфора в пахотных почвах провинций лесостепной зоны (1972–2007 гг.)

Менее значительные изменения в динамике подвижного фосфора в пахотных почвах произошли в Северопресдалтайской и Среднесибирской провинциях (Алтайский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская и Новосибирская области). Однако тенденция остается положительной. Площадь пахотных почв с высоким содержанием подвижного фосфора увеличилась в Северопресдалтайской провинции на 535,6 тыс. га, в Среднесибирской провинции – на 345,6 тыс. га.

В степной зоне обыкновенных и южных черноземов площадь пахотных земель по состоянию на 1.01.2007 г. составляла 31116,7 тыс. га. За период 1972–2007 гг. площадь пашни сократилась на 3113,3 тыс. га. При этом пахотные почвы с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора сократились на 7777,7 тыс. га (20,5%), что указывает на интенсивное применение фосфорных удобрений в этой зоне. Площадь пахотных угодий с высоким содержанием фосфора увеличилась на 14,6% (3987,7 тыс. га).

Значительные изменения фосфатного режима пахотных почв произошли в Предкавказской степной (Краснодарский и Ставропольский края и часть Ростовской области) и Заволжской степной (Самарская и Оренбургская области) провинциях, где площади пахотных почв с низким содержанием подвижного фосфора сократились, соответственно, на 40,4 и 30,2% (рис. 11).

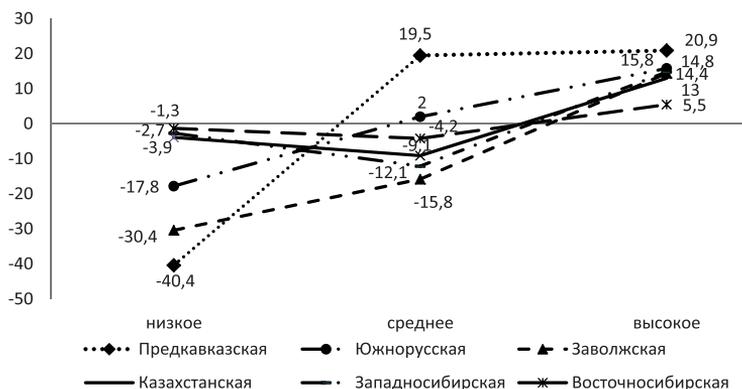


Рис. 11. Динамика содержания подвижного фосфора в пахотных почвах провинций Степной зоны (1972–2007 гг.)

В Южнорусской степной провинции, в зоне обыкновенных и южных черноземов (большая часть Ростовской и Саратовской областей, а также части Воронежской и Волгоградской областей), изменения фосфатного режима пахотных почв менее значительные (–17,8%).

Следует отметить, что в Казахстанской, Западнопредалтайской и Восточносибирской провинциях площади пахотных земель с низким содержанием подвижного фосфора сократились незначительно (на 1,3%–3,9%). Однако в этих провинциях также отмечается сокращение площадей пашни со средним содержанием подвижного фосфора на 4,2%–9,1%.

В Сухостепной зоне темно-каштановых и каштановых почв в 1972 г. преобладали пахотные почвы с низким (41,4%) и средним (40,4%) содержанием подвижного фосфора, а по состоянию на 1.01.2007 г. преобладают пахотные угодья со средним (42,7%) и высоким (31,1%) содержанием фосфора (рис. 12).

Общая площадь пашни в этой зоне за истекший период сократилась незначительно (на 775,0 тыс. га) по отношению к другим зонам. Это указывает на то, что улучшение фосфатного режима пахотных почв происходит не за счет вывода из оборота менее плодородных земель, а за счет внесения необходимого количества фосфорных удобрений.

Содержание подвижных соединений фосфора в почвах, определяющее эффективное плодородие их при движении в направлении с запада на восток закономерно уменьшается, что, по-видимому, связано с малой подвижностью фосфатов.

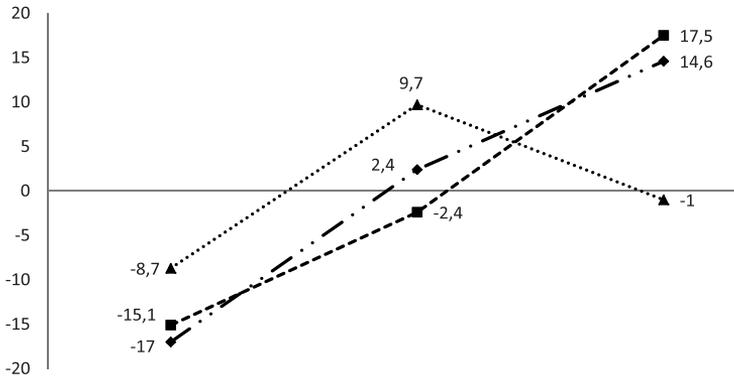


Рис. 12. Динамика подвижного фосфора в пахотных почвах провинций засушливой зоны (1972–2007 гг.)

Градации обеспеченности содержания подвижных форм фосфора в почве

К результатам агрохимического обследования почв предъявляются исключительно высокие требования, так как на основании этих отдельных параметров строятся модели, позволяющие судить о процессах, происходящих в почве в динамике и в перспективе. В этом плане актуальной задачей является стандартизация методов. Сейчас актуальность пересмотра методик наиболее велика, так как набор параметров и методов не менялся в течение длительного времени.

Градации определения обеспеченности почв подвижными формами фосфора разработаны и внедрены в Агрохимслужбу в начале 1960-х гг. Исследования, проведенные в последнее время, показали, что принятые градации не всегда отражают действительную обеспеченность растений фосфором (Чендев, Лицуков, 1997; Кирпичников, Адрианов и др., 2004; Кирпичников, Адрианов, 2007).

Доступные для растений фосфаты – это «теоретически то количество фосфатов, которое может быть усвоено растениями». В настоящее время их определение производится с помощью различных экстракционных методов. Критерием является высокая корреляция между экстрагируемым из почвы количеством фосфора и выносом фосфора растениями (при оптимальном сочетании всех других факторов роста в строго одинаковых условиях).

При оценке доступности растениям почвенных фосфатов важны следующие показатели:

- интенсивность (степень подвижности почвенных фосфатов, выражаемая концентрацией фосфат-ионов в водных или слабосолевых вытяжках);
- емкость (количество подвижного фосфора, способного переходить из твердой фазы почвы в раствор);
- скорость перехода фосфатов из твердой фазы в раствор (концентрации фосфора при многократном экстрагировании солевым раствором);

- буферная емкость почв (способность почвы противостоять изменению величины показателя интенсивности при внесении фосфорного удобрения или выносе фосфора растениями).

Практически в научных исследованиях по агрохимии фосфора в комплексе все эти показатели не изучались. В первую очередь это касается скорости перехода фосфатов из твердой фазы в раствор и фосфатно-буферной емкости, вследствие, как пишут И.П. Дерюгин и В.В. Прокошев, «из-за неразработанности проблемы» (1997).

Значительно чаще в научных исследованиях по оценке доступности растениями почвенных фосфатов определялись «емкость» (подвижный фосфор) и «интенсивность» (концентрация в слабосолевых вытяжках), а также основные формы фосфора в почве по Чангу–Джексону и др.).

В Агрохимслужбе при оценке доступности растениям почвенных фосфатов определяется подвижный фосфор («емкость»), принятыми в шестидесятые годы методами – в слабокислотных вытяжках (0,2н НСl и 0,5н CH_3COOH) для некарбонатных почв и в слабовыщелоченной вытяжке (1% $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) – для карбонатных почв.

Однако опыты показали, что очень часто единые градации содержания фосфора почв, определяемые методами Кирсанова и Чирикова, не отражают действительной обеспеченности растений фосфором. Так, в некоторых районах лесостепной и степной зон Сибири на почвах с повышенным и высоким содержанием доступного фосфора наблюдается высокая эффективность фосфорных удобрений. В районах Зауралья, напротив, эффект от внесения фосфорных удобрений отсутствует уже при содержании 50 мг/кг почвы, что соответствует низкой обеспеченности почвы фосфором. Это дало основание работникам сельскохозяйственных научных учреждений и Агрохимической службы разработать региональные градации содержания фосфора в почвах.

По мере накопления научной информации стало очевидно, что зональные градации также не отражают в полной мере способность почв обеспечивать растения питательными веществами. Исследования показали, что доступность питательных веществ растениям зависит от многих факторов, к важнейшим из которых относятся генетические особенности почв, их минералогический и гранулометрический состав, степень кислотности, зональные особенности почв и континентальность климата в пределах зоны, биологические особенности культур и др.

Как указывают, основываясь на своих исследованиях, Ю.И. Берхин, Е.Б. Чагина и др. (1989) попытки решить вопрос об обеспеченности почв фосфором путем адаптации градаций доступного фосфора для однородных территорий малоперспективны, поскольку даже в пределах одного хозяйства имеются генетические разности почв. Известно, например, что доступность подвижного фосфора возрастает от тяжелых почв к легким. Установлено, что подвижность фосфора зависит не только от генетически обусловленных факторов, но и от свойств, приобретенных в процессе сельскохозяйственной эксплуатации земель. Так, например, в нечерноземной зоне наибольшей подвижностью доступного фосфора характеризуются почвы с рН от 5,5 до 6,0. За указанными интервалами подвижность фосфора снижается.

Поэтому наряду с уточнением градаций содержания фосфора в почве, определяемого методом Чирикова и Кирсанова, необходимы поиски дополнительных методов для характеристики способности почв обеспечивать растения этим элементом в течение вегетации.

Многие исследователи (Минеев, Ивлев, 1975; Наконечная, 1985; Карпинский, Глазунова, 1993) предлагают, наряду с определением так называемого фактора емкости в отношении доступного фосфора (методы Кирсанова и Чирикова), учитывать для некарбонатных почв также фактор интенсивности, характеризующий способность доступного фосфора переходить в почвенный раствор. Эта форма фосфора диагностируется с помощью слабосолевых вытяжек ($0,02\text{н CaCl}_2$ и $0,03\text{н K}_2\text{SO}_4$) и отражает степень подвижности фосфора почвы.

Установлено, что степень подвижности доступного фосфора в некультуренных и окультуренных почвах различна: в первом случае она очень широка ($0,01\text{--}0,02$ мг P_2O_5 в 1л $0,02\text{н CaCl}_2$) и слабо связана с содержанием доступного фосфора ($r = 0,17\text{--}0,44$) (Носко, 1982; Христенко, 1993).

При систематическом применении удобрений повышается как содержание доступного фосфора, так и степень его подвижности, причем последняя увеличивается более интенсивно. Коэффициент корреляции между этими показателями в окультуренных почвах достигает $0,7\text{--}0,8$.

В связи с этим подходы к решению вопроса о совершенствовании почвенной диагностики фосфорного питания в регионах с преобладанием естественных и окультуренных почв могут быть разными.

М.А. Наконечная (1985) для дерново-подзолистых почв установила, что степень подвижности коррелирует с содержанием подвижного фосфора, когда увеличение содержания подвижного фосфора определяется окультуренностью. Для почв с высоким содержанием природных фосфатов ($200\text{--}250$ мг/кг почвы) степень подвижности низкая ($0,03\text{--}0,06$ мг/л в $0,01\text{н CaCl}_2$). Для таких почв предложено в дополнение к методу Кирсанова определение подвижности фосфатов.

Э.А. Бабарина и В.С. Павлова (1974), сравнивая урожайность и эффективность удобрений при определении содержания фосфора в почве различными методами, пришла к выводу, что солянокислая вытяжка на почвах с высоким содержанием фосфатов железа и алюминия не извлекает часть доступных фосфатов. Ею предлагается использовать фторидные вытяжки, в частности, метод Брейя–Куртца ($0,03\text{н NH}_4\text{F} + 0,025\text{н HCl}$).

В регионах (кроме лесостепи и степи Сибири), где используются методы Чирикова и Кирсанова, как правило, преобладают почвы с естественно низким содержанием фосфора. Во многих районах (нечерноземная и лесостепная зоны Европейской части РФ) различия в содержании фосфора обусловлены, в основном, остаточными запасами фосфорных удобрений. Здесь, в виду сильной корреляции между доступным фосфором и степенью подвижности фосфатов, наблюдается и достоверная отрицательная связь между содержанием фосфора в кислотнорастворимых вытяжках и эффективностью фосфорных удобрений (Михайлов, Книпер, 1971; Карманов, Клопотовский, 1976). Однако и в этих регионах исследователями выявлен ряд факторов, которые существенно влияют на подвижность фосфатов.

К ним в нечерноземной и лесостепной зонах можно отнести: рН почвы и гранулометрический состав, степной – условия выращивания культур (при орошении или на богаре): степень влагообеспеченности на неорошаемых землях и гранулометрический состав почв.

Поэтому в этих регионах необходимо наряду с определением содержания кислотнорастворимых фосфатов проводить исследования почв на степень подвижности фосфатов.

В нечерноземной и лесостепной зонах Европейской части России можно при отсутствии данных о степени подвижности фосфатов использовать группировки обеспеченности, разрабатываемые с учетом факторов, влияющих на подвижность фосфатов. Этот подход используется в Белоруссии (Кулаковская, Поздняк и др., 1972; Кулаковская, Кораблева, 1985; Кирпичников, Адрианов и др., 2004; Кирпичников, Адрианов, 2007).

Для условий нечерноземной и лесостепной зон наиболее целесообразно иметь в виду градации с учетом наиболее важного для фосфора фактора – степени кислотности почв. Для засушливых районов юга России – условий влагообеспеченности.

Применение удобрений, несколько увеличивая содержание подвижного фосфора, резко увеличивает его подвижность. Так, в длительном опыте на типичном черноземе внесение 300 кг/га P_2O_5 увеличило содержание фосфора с 15,2 до 18,6 мг $P_2O_5/100$ г почвы. Подвижность фосфора увеличилась с 0,095 до 0,184 мг/л, что дало основание автору сделать вывод, что уже по степени подвижности можно судить об обеспеченности растений фосфором и даже разработать градации обеспеченности, что косвенно говорит о несовершенстве принятого в Агрохимслужбе метода Чирикова. Как и в случае анализа почв нечерноземной зоны, большая вариабельность содержания фосфора в $CaCl_2$ – вытяжке также является препятствием при агрохимическом обследовании, но совершенно необходима при обследовании эродированных земель.

Для почвенной диагностики фосфорного питания в южных районах России, где преимущественно распространены карбонатные почвы, используется метод Мачигина.

Многочисленные авторы (Зверева, Батьков и др., 1980; Зверева, 1982, 1994; Касицкий, Карцева и др., 1986; Зверева, Бортникова, 1998) считают, что этот метод достаточно хорошо характеризует способность почв обеспечивать растения фосфором. Основным фактором, влияющим на степень подвижности фосфатов в засушливых районах, является уровень влагообеспеченности. Чем более жесткие условия увлажнения, тем выше значение оптимального содержания фосфора. Так, для озимой пшеницы в черноземах достаточно влагообеспеченного Краснодарского края оптимальное содержание фосфора по Мачигину составляет около 30 мг/кг, в более засушливых районах Ростовской области – около 40 мг/кг.

Известно, что оптимальное содержание питательных веществ не является постоянной величиной, так как зависит от уровня обеспеченности растений другими факторами. В период разработки градаций в нечерноземной зоне рост урожая, а, следовательно, и оптимальное содержание фосфора в значительной мере лимитировалось повышенной кислотностью почв

и невысоким потенциалом имеющихся сортов. В настоящее время реакция почвенной среды, вследствие проведенного до 1990 г. известкования, не всегда является лимитирующим фактором, произошла также замена сортов на более интенсивные, поэтому оптимальные уровни содержания подвижных форм фосфора в почве, обеспечивающие максимальный урожай или минимальный эффект от вносимых удобрений, требуют в ряде случаев корректировки.

Сравнительно незначительное увеличение содержания подвижного фосфора в почве за счет внесения минеральных и органических удобрений сопровождается значительно большими возможностями обеспечивать растения фосфором за счет повышения подвижности фосфатов, чем об этом можно судить по приросту подвижного фосфора в почве.

Определение степени подвижности фосфора в почвах обуславливается также необходимостью использования более объективного метода, отражающего изменения фосфатного режима почв в процессе землепользования, что позволит проводить своевременный контроль за состоянием плодородия почв.

Используемые в этих целях методы Чирикова и Кирсанова не всегда пригодны в связи со значительной буферностью почв в отношении этих форм фосфора.

Относительно быстрое изменение подвижности фосфора, как при внесении удобрений, так и при прекращении внесения, делают степень подвижности достаточно надежным диагностическим методом. Изменение степени подвижности может показывать, вносились ли удобрения между циклами обследования или использовался запас питательных веществ, внесенный в предыдущие годы.

Исследователями предложено немало градаций определения обеспеченности почв фосфором, однако использовать их трудно из-за неоднородности и даже противоречивости данных. Отсутствуют единые методологические подходы к их разработке.

Наиболее важными методологическими моментами являются:

- выбор метода и критерия определения оптимального уровня содержания элементов питания в почве;
- метод определения необходимого числа градаций.

Выбор числа групп является одним из сложных вопросов при разработке градаций. Число предлагаемых авторами групп в шкалах обеспеченности питательными веществами колеблется от 3 до 8. Сторонники снижения числа групп ссылаются на сильное варьирование агрохимических показателей в пределах отдельно обрабатываемых участков и в течение вегетационного периода и считают, что это вызывает большую ошибку в рассчитываемых дозах, поэтому больше трех градаций иметь нецелесообразно.

Другие авторы предлагают увеличить число градаций, аргументируя это статистически достоверными и экономически выгодными прибавками урожая в пределах вновь выделенных групп. Е.А. Зверева (1980, 1982, 1994, 1998) предлагает увеличить число групп по содержанию фосфора на основе собственных многолетних данных, подтверждающих значительное сезонное варьирование подвижного фосфора, считая, что для правильной

диагностики агрохимическое обследование следует проводить в конце вегетационного периода.

Таким образом, существуют две основные точки зрения по агрохимическому картированию почвы на обеспеченность фосфором: дополнение принятых методов определением степени подвижности фосфатов и использование новых методов.

По нашему мнению, там, где новые методы научно обоснованы и для них разработаны градации обеспеченности, необходимо их использование при агрохимическом обследовании. Там, где принятые методы дают удовлетворительные результаты, нужно продолжить их использование, дополняя определением степени подвижности фосфора, имея при этом в виду жесткие сроки взятия образцов, их подготовку и проведение анализа при определении подвижности почвенных фосфатов. Одновременно совместно с Геосетью полевых опытов с удобрениями должны быть проведены исследования для внедрения здесь одного достаточно чувствительного для периодической диагностики (желательно универсального) метода.

Содержание подвижных фосфатов в почве является важнейшим признаком ее плодородия. По мере увеличения в почвах подвижных фосфатов и улучшения фосфорного питания растений возрастает продуктивность агроценозов, повышается их устойчивость в различных неблагоприятных погодных условиях и кризисных ситуациях в экономике страны.

Длительные исследования показывают, что фосфаты в почвах оказывают положительное влияние только на продуктивность растений и эффективность фосфорных удобрений при увеличении их содержания до определенного предела. При обогащении почв выше этого предела их влияние становится несущественным, и эффективность фосфорных удобрений постепенно снижается.

В связи с этим проблема регулирования фосфатного режима почв в целях получения высоких и устойчивых урожаев с биологически полноценной продукцией хорошего качества требует определения оптимальных параметров фосфатного состояния почв и доз вносимых фосфорных удобрений, от правильного установления которых зависит построение всей системы удобрения в севооборотах, потребность в фосфорных удобрениях всей страны в целом. Занижение ее приводит к значительному недобору урожая, завышение – к неэффективному использованию дорогостоящих удобрений.

Эффективность фосфорных удобрений в зависимости от обеспеченности почв подвижными фосфатами

Исследования, проводимые в длительных и краткосрочных опытах Геосети ВИУА и агрохимической службы, дают возможность использовать результаты как отдельных опытов, так и обобщенные данные. Следует обратить особое внимание на результаты опытов с искусственно созданными фосфатными фонами. Только в таких экспериментах имелась возможность выделить действие содержания подвижного фосфора при всех прочих рав-

ных условиях. Такие фоны создавались за счет внесения высоких доз фосфорных удобрений (200–800 кг/га). Благодаря этому, на одном и том же участке поля достигалось различное содержание P_2O_5 , и имелась возможность вычленить его действие на урожайность и эффективность удобрений (Чумаченко, 1999). Серия таких опытов проведена агрохимической службой и Геосетью ВИУА, из которых наиболее полно обобщены данные Агрохимслужбы. Результаты опытов Геосети практически не обобщены.

Наиболее полное обобщение опытов агрохимической службы с искусственно созданными фосфатными фонами проведено А.Н. Аристарховым (2000). В его сводку вошли опыты с зерновыми культурами, которые возделывались на дерново-подзолистых и серых лесных почвах Центрального и Приволжского федеральных округов, черноземах выщелоченных и карбонатных Южного округа, черноземах обыкновенных Сибири. Результаты этих исследований позволили выявить уровни содержания подвижного фосфора в перечисленных типах почв, при которых достигается получение наиболее высоких урожаев и снижается эффективность фосфорных удобрений. По мнению автора, на эти уровни следует ориентироваться в практической работе.

Исследования по изучению эффективности фосфорных удобрений в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых почв подвижными фосфатами, показали, что наибольшая эффективность их применения в зернотравяном севообороте за 10 лет была при содержании P_2O_5 72–84 мг/кг, где окупаемость 1 кг фосфора составила 9–13 кг зерновых единиц. С повышением содержанием P_2O_5 в почве до 120–130 мг/кг окупаемость фосфора снизилась более чем в 2 раза (Сушеница, 2007).

Обобщение материалов длительных опытов с удобрениями, проведенных в различных районах Нечерноземной зоны, позволило установить довольно тесную корреляцию между продуктивностью севооборотов и содержанием подвижных фосфатов в почвах (Иванова, 1990; Сычев, Шафран и др., 2016).

Уравнения регрессии, рассчитанные на основе опытных данных в вариантах без удобрений и с внесением умеренных доз полного минерального удобрения (45–90 кг/га каждого элемента в год), показывают, что на дерново-подзолистых почвах различного гранулометрического состава и климатических условий отдельных районов зоны продуктивность севооборотов повышалась с увеличением содержания подвижных фосфатов в почве.

Показано, что для севооборотов средней интенсивности (12–25% пропашных культур) содержание подвижных фосфатов в пахотном слое почвы в пределах 150–200 мг/кг обеспечивает получение урожайности основной продукции с 1 га севооборотной площади без удобрений 26–28 ц з.е., при ежегодном применении полного минерального удобрения в дозах, не превышающих 90 кг/га каждого элемента, – 40–42 ц.

Дальнейшее увеличение запасов подвижного фосфора в почве до 250–300 мг/кг P_2O_5 на фоне небольших доз азотных и калийных удобрений, которые применялись в рассматриваемых опытах, а также при существующей культуре земледелия не обеспечивало ощутимого прироста урожайности.

На дерново-подзолистых почвах Северо-Востока Нечерноземной зоны наиболее отзывчивой на повышение содержания подвижных фосфатов в почве оказалась озимая рожь (Суров, 1973). С повышением содержания фосфора до 200–250 мг/кг (по Кирсанову) урожай ее возрастал на 17,1 ц/га зерна (табл. 59).

Таблица 59

Влияние на урожайность зерновых культур содержания подвижных фосфатов и эффективность удобрений на дерново-подзолистых почвах Северо-Востока Нечерноземной зоны

Содержание P_2O_5 в почве, мг/кг (по Кирсанову)	Число опытов	Урожай зерна на фоне НК, ц/га	Прибавка урожая от фосфора, ц/га			Урожай зерна на фоне РК, ц/га	Прибавка урожая от азота, ц/га		
			P_{30}	P_{60}	P_{90}		N_{30}	N_{60}	N_{90}
Озимая рожь									
20–30	3	9,8	5,7	5,8	10,6	8,9	4,3	5,2	5,0
70–90	10	16,2	3,2	4,8	6,0	15,7	4,2	6,0	6,0
120–150	9	19,9	2,1	3,2	3,3	15,0	4,1	8,0	12,5
200–250	6	26,9	2,6	2,2	2,2	21,8	7,2	9,6	14,9
Ячмень									
20–30	2	10,6	3,6	3,8	–	9,0	5,1	6,6	–
70–90	3	14,6	1,2	2,5	5,0	10,5	5,7	7,9	5,2
200–250	4	18,3	1,5	1,3	1,6	14,5	4,4	5,8	4,1
Овес									
20–30	2	17,3	3,5	3,8	4,1	12,2	8,0	8,2	8,2
120–150	3	20,2	2,1	1,4	–	12,3	8,0	10,5	–

Значительно слабее на содержание подвижных фосфатов в почве реагировали яровые зерновые культуры – ячмень и овес. С повышением обеспеченности почв фосфором эффективность фосфорных удобрений, особенно в повышенных дозах, резко падала (в 2–5 раз). В то же время прибавка от азотных удобрений значительно возрастала.

Обобщение результатов исследований по эффективности фосфорных удобрений, проведенных агрохимической службой в Волго-Вятском экономическом районе, показало, что с увеличением в почве подвижных фосфатов урожайность озимой пшеницы существенно возрастала (табл. 60).

Обобщение результатов опытов показало, что эффективность фосфорных удобрений в значительной степени зависит от предшественников изучаемой культуры. Они были высокоэффективными при посеве озимой пшеницы по чистому пару, после многолетних трав, гороха и викоовсяной смеси. Слабое действие фосфорных удобрений наблюдалось при размещении озимой пшеницы после яровых зерновых культур.

На дерново-подзолистых почвах в вариантах без удобрений с повышением содержания подвижных фосфатов от низкого до высокого уровня урожайность увеличивалась на 7 ц/га, на серых лесных почвах – на 7,6 ц/га, на черноземах выщелоченных и оподзоленных – на 9,1 ц/га (Лумако, 1981). На фоне азотно-калийных удобрений прибавки урожайности составили соответственно 3,9 ц/га; 5,0 ц/га и 6,0 ц/га.

Таблица 60

Эффективность фосфорных удобрений при внесении под озимую пшеницу на почвах с различным содержанием подвижных фосфатов (Ломако, 1981)

Содержание P_2O_5 в почве по Кирсанову, мг/кг	Число опытов	Урожайность, ц/га		Прибавка урожайности (ц/га) от доз P_2O_5			
		без удобрений	по фону НК	30	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы							
15–48	4	13,8	20,7	2,5	3,7	4,6	5,3
53–96	3	16,6	22,3	2,1	3,2	4,1	4,3
102–149	3	17,9	23,6	1,9	2,6	2,8	3,2
153–249	4	20,8	23,2	1,6	2,2	1,9	2,6
Серые лесные почвы							
20–49	6	15,6	21,9	3,1	4,9	5,5	6,6
51–97	10	17,5	23,6	2,5	3,6	4,9	5,1
101–148	6	19,3	25,7	2,1	2,9	4,3	4,7
152–217	5	22,6	26,4	1,8	2,3	1,5	1,4
253–296	3	23,2	26,9	1,0	2,2	1,8	1,3
Черноземы выщелоченные и оподзоленные							
26–45	3	16,2	22,8	3,3	4,1	4,9	5,8
52–96	5	19,9	25,5	2,2	3,7	4,2	4,6
107–144	4	21,9	27,7	2,0	3,1	4,0	4,3
154–247	3	24,4	28,8	1,4	2,1	2,3	1,7
258–303	4	25,3	28,5	1,2	1,9	1,0	1,1

Эффективность фосфорных удобрений наиболее высокой была на почвах с низким и средним содержанием подвижных фосфатов. При применении 30–120 кг/га P_2O_5 прибавки урожайности на них составили на дерново-подзолистых почвах 2,1–5,3 ц/га, на серых лесных – 2,5–6,6 ц/га, на черноземах – 2,2–5,8 ц/га. На почвах с более высоким содержанием фосфатов они были в 2–3 раза ниже.

На дерново-подзолистых почвах Республики Марий Эл особенно резкое увеличение урожайности озимой пшеницы отмечено при переходе от очень низкого (25 мг/кг) к среднему (50–80 мг/кг) содержанию подвижных фосфатов в почве (Трухан, 1974). Действие фосфорных удобрений прекращалось при содержании 130 мг/кг фосфатов, а эффективность азотно-калийных удобрений при этом значительно возрастала. Анализ опыта работы хозяйств Медведевского района Республики Марий Эл показал, что увеличение содержания подвижных фосфатов в почве с 60 до 99 мг/кг P_2O_5 сопровождалось повышением урожайности зерновых культур с 12 до 21 ц/га.

На выщелоченных черноземах Республики Мордовия наблюдалась значимая связь между урожайностью зерна озимой ржи и яровой пшеницы с содержанием подвижных фосфатов по Кирсанову (Сычев, Шафран и др., 2010). С повышением содержания P_2O_5 в почве от 30 до 88 мг/кг урожайность озимой ржи возрастала с 19,3 до 29,8 ц/га, а эффективность фосфорных удобрений снижалась более чем в 2 раза.

В серии микрополевых и полевых опытов на обыкновенных и южных черноземах степного Поволжья (Чуб, Штейн и др., 1973; Чуб, 1989). Установлено, что эффективность фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницу находится в обратной зависимости от обеспеченности почв подвижным фосфором. При содержании фосфатов в почве по Чирикову менее 70 и по Мачигину менее 15 мг/кг P_2O_5 прибавка урожайности от фосфорных удобрений была наиболее высокой и составляла 6,6–6,7 ц/га зерна. С повышением уровня обеспеченности подвижными фосфатами она резко снижалась и при содержании по Чирикову более 150 и по Мачигину более 35 мг/кг P_2O_5 полностью отсутствовала.

В опыте лаборатории фосфорных удобрений ВИУА на среднесуглинистой почве на искусственно созданных фосфатных фонах все культуры звена севооборота (озимая пшеница, картофель, ячмень) были отзывчивы на повышение содержания фосфатов в почве (Сдобникова, Касицкий, 1977). Максимальные урожаи были получены при содержании подвижных фосфатов 100–150 мг/кг P_2O_5 , созданном внесением единовременной дозы 600 кг/га P_2O_5 . При этом урожайность зерна озимой пшеницы возрастала более чем в 2,5 раза, картофеля – в 1,8 раза, ячменя – в 1,5 раза. В опыте четко проявилось положительное взаимодействие возрастающего уровня фосфорного и азотного питания растений. С улучшением обеспеченности почвы фосфором в среднем по вариантам урожайность озимой пшеницы повышалась на 4–10 ц/га. При этом на безазотном фоне увеличение содержания фосфора до повышенного уровня обеспечило прибавку 5,8–6,3 ц/га, на оптимальном фоне азотного питания – 13,8–17,1 ц/га. Внесение больших доз фосфорных удобрений позволило повысить урожайность с 10,2 до 16 ц/га, правильное сочетание азота и фосфора – до 34,9–36,6 ц/га. Общая продуктивность звена севооборота с ростом обеспеченности почвы фосфором на безазотном фоне повышалась на 33,9 ц/га з.е., на фоне внесения 120 кг/га N – на 57,3 ц/га з.е. В то же время при низком содержании фосфора в почве повышение доз азота свыше 60–90 кг/га было неэффективным, при повышенном содержании фосфора оптимальной становилась доза 120 кг/га N, обеспечивая прибавку зерна 18,9 кг/га.

В опыте Краснодарской агрохимической лаборатории на искусственно созданных фосфатных фонах (табл. 61) оптимальный фосфорный уровень почвы для озимой пшеницы Безостая 1 составил 26 мг/кг по Мачигину (Бунякин, 1988).

При этом уровне дальнейший рост урожайности зерна за счет фосфорных удобрений прекращался, эффективность азотных удобрений заметно возрастала. Оптимальными дозами азота при достаточной обеспеченности почвы фосфором стали 90–120 кг/га N.

В опытах ВИУА на орошаемых карбонатных черноземах Кабардино–Балкарии (Батьков, 1976) установлено, что оптимальное содержание подвижного фосфора в почве (по Мачигину) для получения зерна озимой пшеницы порядка 55 ц/га находится в пределах 30–35 мг/кг P_2O_5 и обеспечивается при низком их исходном содержании единовременным внесением 300 кг/га P_2O_5 . Увеличение содержания подвижных фосфатов от 30–35 до 55 мг/кг P_2O_5 не оказывало существенного влияния на урожайность. Дальнейший рост обеспеченности почвы фосфором приводил даже к снижению урожайности.

Таблица 61

Влияние уровней обеспеченности подвижным фосфором предкавказских карбонатных черноземов на урожайность озимой пшеницы и эффективность минеральных удобрений

Внесено P ₂ O ₅ для создания фосфатного фона	Содержание подвижных фосфатов по Мачигину, мг/кг P ₂ O ₅	Урожайность, ц/га			
		контроль	N	N + P ₆₀	N + P ₁₂₀
Чернозем карбонатный малогумусный сверхмощный, Краснодарский край					
0	10	30,6	32,0	37,7	41,0
200	26	41,2	44,9	44,8	45,6
400	42	41,8	45,6	46,2	45,8
600	65	40,9	47,0	45,8	47,6
Чернозем карбонатный орошаемый, Кабардино-Балкарская республика					
0	9–15	23,5	26,6	34,2	38,0
300	28–36	–	38,5	36,9	36,2
600	37–55	–	38,0	32,9	35,6
900	56–90	–	33,4	34,0	34,1

В опытах Донского ЗНИИСХ (Шапошникова, 1975) на мицеллярно-карбонатном среднемощном черноземе Ростовской области максимальная урожайность озимой пшеницы 55,6–57,2 ц/га получена при содержании подвижных фосфатов 38,9–41,3 мг/кг, что создавалось внесением 150–180 кг/га P₂O₅ при исходном содержании 16,7–17,2 мг/кг подвижных фосфатов. При более высоком уровне обеспеченности почвы фосфатами урожайность озимой пшеницы существенно не повышалась.

В исследованиях Т.Н. Кулаковской (1990) на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава связь между урожаем и содержанием в почве подвижного фосфора характеризовалось коэффициентами 0,31–0,78, которые увеличивались при переходе от рыхлых песчаных почв к суглинистым. Результаты опытов, проведенных И.М. Богдевичем, Л.П. Детковской и др. (1989), также указывают на высокую зависимость урожайности зерновых культур от запаса фосфора в почве.

Увеличение содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистых суглинистых почвах южнотаежной зоны и почвах лесостепной зоны от низкого (< 50 мг/кг) до среднего (50–100 мг/кг) повышало урожайность озимой пшеницы на 0,53–1,00 т/га, от среднего до повышенного (100–150 мг/кг) – на 0,24–0,52 т/га. На серых лесных почвах, оподзоленных и выщелоченных черноземах лесостепной зоны урожай зерновых также повышался с увеличением содержания подвижного фосфора (Державин, 1992).

Е.А. Зверевой (1982) установлено, что на темно-каштановой карбонатной почве при орошении наиболее значительные прибавки от фосфорных удобрений наблюдали при содержании подвижного фосфора менее 15 мг/кг (по Мачигину), а при высокой (более 25 мг/кг) обеспеченности почв этим элементом положительное действие фосфора затухает.

В.Г. Минеев и М.М. Ивлев (1975), Н.А. Кирпичников и В.Г. Сычев (2016) отмечают, что в подавляющем большинстве опытов Географической сети

наиболее эффективная доза фосфора для различных сельскохозяйственных культур в разных зонах страны – 60 кг/га. Прибавки урожая озимой пшеницы от указанной дозы фосфорных удобрений на дерново-подзолистых суглинистых почвах составляли 0,37–0,41 т/га, дерново-подзолистых супесчаных почвах – 0,10–0,23, серых лесных почвах Брянской и Рязанской областей – 0,06, Нижегородской области и Чувашии – 0,35, выщелоченных черноземах Воронежской области – 0,2 (от P_{40}), типичных и обыкновенных черноземах Белгородской, Воронежской и Тамбовской областей – 0,26, предкавказских карбонатных черноземах – 0,21 и на предкавказских черноземах – 0,29 т/га.

Действие фосфорных удобрений зависит от почвенно-климатических условий. При внесении P_{60} оплата 1 кг фосфора прибавкой урожая зерна озимой пшеницы в опытах Географической сети колебалась от 1,2 кг на светло-каштановых почвах Волгоградской области до 11,5 кг на лугово-черноземных почвах Краснодарского края (Минеев, Ивлев, 1975). Окупаемость фосфорных удобрений приростом урожая, как правило, снижается с увеличением их доз.

По данным П.Г. Кудели (1978), прибавки урожая картофеля на дерново-подзолистых почвах на фоне навоза и азотно-калийных удобрений при внесении P_{60} составляли 0,7–1,5, P_{90} – 0,3–1,6 т/га, а на фоне азотно-калийных удобрений без навоза – соответственно 0,8–1,5 и 0,8–2,8 т/га; на оподзоленных, выщелоченных, деградированных и обыкновенных черноземах лесостепной зоны на фоне навоза и азотно-калийных удобрений прибавки урожая составили при внесении P_{60} – 0,8–2,4, P_{90} – 0,5–4,5, на фоне азотно-калийных удобрений без навоза – соответственно 1,1–2,4 и 1,6–2,7 т/га.

По данным опытов Географической сети (Орлова, Прижукова и др., 1974), прибавки урожая озимой ржи при внесении 40 кг/га фосфорных удобрений на дерново-подзолистых почвах составили 0,06–0,15 т/га (1,5–3,8 кг зерна на 1 кг фосфора – P_2O_5).

Прибавки урожая неорошаемой сахарной свеклы в зависимости от почвенно-климатических условий при внесении P_{60} колебались от 1,2 до 4 т/га, P_{90} – от 1,2 до 4,8, P_{120} – от 1,1 до 4,9 т/га при оплате 1 кг фосфора (P_2O_5) соответственно 2,0–6,7; 1,1–5,3 и 0,9–4,1 кг. На орошаемых землях фосфор действовал сильнее, чем без орошения.

Доступность растениям почвенных фосфатов, а следовательно, и их положительный эффект в значительной мере обусловлены реакцией почвенной среды, содержанием органического вещества, состоянием почвенного поглощающего комплекса, количеством влаги и ее перемещением в почве, температурой почвы и другими факторами. Уровень обеспечения растений фосфором также связан с обеспеченностью их другими элементами питания. Низкая эффективность фосфора часто обусловлена неблагоприятным азотным питанием (Ниловская, Арбузова и др., 1984).

Результатами исследований показано, что при длительном систематическом применении фосфорных удобрений в почве накапливается такое количество фосфатов, в том числе и доступных растений, что дополнительное внесение фосфорных удобрений неэффективно (зафосфачивание). Однако отрицательное действие зафосфачивания почвы на продуктивность растений проявляется только в случаях недостаточной обеспеченности другими

элементами питания, низкой окультуренности почв (Gachon, 1977; Csatho, Arendas, 1998).

В различных почвенно-климатических зонах проведены исследования по установлению оптимальных уровней обеспеченности почв фосфором с учетом биологических особенностей возделываемых культур, вида севооборота и других условий (Vetter, 1977; Ryan, 1983; Гришин, Панасов, 1997; Лазарев, 1997). Критерием оптимального фосфорного режима почв принято считать такое содержание подвижных форм фосфора в почве, при котором получена наибольшая урожайность возделываемых культур, а фосфорные удобрения становятся экономически невыгодными. Как известно доступность фосфатов растениям зависит от ряда свойств почв, поэтому для каждой культуры существует определенная специфическая зона оптимума содержания фосфора, обусловленная взаимным влиянием сопутствующих свойств. По данным И.М. Богдевича, В.В. Лапы и др. (1989), урожайность озимой ржи на уровне 3,37–3,54 т/га формируется при содержании подвижного фосфора в дерново-подзолистой почве 12–26 мг на 100 г. По мере приближения реакции почвенной среды к оптимальной зоне оптимум содержания P_2O_5 сужается.

По результатам полевых опытов Географической сети оптимальные уровни содержания подвижного фосфора для дерново-подзолистых почв составляют 10–15 мг на 100 г (по Кирсанову), обыкновенных, оподзоленных и мощных черноземов – 10–15 мг на 100 г (по Чирикову), и для карбонатных черноземов, каштановых почв – 3,0–3,5 мг (по Мачигину) (Сдобникова, Илларионова, 1979; Vostal, Balik, 1988).

По данным Л.М. Державина (1986, 1992), оптимальные уровни содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистых суглинистых почвах и почвах лесостепной зоны находились в пределах 18,0–20,0 мг на 100 г почвы (по Кирсанову); обыкновенных черноземах – 14,0–16,0 мг (по Чирикову) и в карбонатных почвах – 3,0–3,4 мг на 100 г (по Мачигину).

На основании полевых опытов зональных агрохимических лабораторий, проведенных в нечерноземной зоне, Н.Н. Михайлов, В.П. Книпер (1971) пришли к выводу, что урожаи зерновых 25–30 ц и выше, картофеля > 250 ц, льноволокна 8–10 ц и сена многолетних трав 30–40 ц/га наиболее реальны в условиях нечерноземной зоны лишь при содержании подвижного фосфора 10–15 мг/100 г почвы.

И.И. Ельников и Х.Л. Аракелян (1985) обобщил результаты массовых опытов Агротехслужбы и определил взаимосвязь урожаев зерновых культур с содержанием подвижного фосфора (по методам Кирсанова и Чирикова) в ряде почвенно-климатических районов страны. Результаты корреляционного анализа в большинстве случаев показали, что эта связь статистически высокодостоверна. На почвах европейской части (в вариантах без удобрений) с переходом от низкого (2–4 мг/100 г) содержания подвижной формы P_2O_5 к повышенному (12–18 мг/100 г почвы) урожаи зерновых увеличились на 5,0–7,7 ц/га.

Значительное увеличение урожая и снижение прибавок от фосфора с повышением его содержания в почве наблюдали также на выщелоченных и оподзоленных черноземах и темно-серых лесных почвах Западной и Восточной Сибири.

С помощью эллиптической кривой отзывчивости озимой пшеницы на содержание подвижного фосфора в черноземах в зоне достаточного увлажнения показано, что максимум урожая зерна достигается при 13–17 мг P_2O_5 на 100 г почвы (по Чирикову), прибавка от фосфорных удобрений при этом падает до нуля.

На основании статистического анализа результатов И.И. Ельников приходит к выводу, что теоретически необоснованно планировать урожай озимых культур порядка 35 ц/га и яровых –20 ц/га для почв, имеющих уровень подвижных фосфатов < 10 мг/100 г почвы. Автор предложил математические формулы для интерполяции желательного «фосфатного уровня» почв. Согласно этим формулам в нечерноземной зоне по степени отзывчивости на фосфор почв (по Кирсанову) получен следующий убывающий ряд: озимая рожь–озимая пшеница–ячмень–картофель–лен. Оптимальный уровень (по методам Чирикова или Кирсанова) находится для озимой ржи, озимой и яровой пшеницы в пределах 12–18, ячменя – 20–25 и для льна – 35 мг/100 г почвы.

Б.С. Носко (1982) обобщил опыты, проведенные на различных почвах Украины. Максимальные прибавки урожая от фосфорных удобрений получены в зоне Украинского полесья и северной части лесостепи, где преобладают почвы с низким содержанием подвижного фосфора. При улучшении обеспеченности почв фосфором прибавки от фосфорных удобрений и их повышенных доз снижаются, а от азотно-калийных – возрастают. Однако имеется ряд необъяснимых отклонений от этих общих положений. По приведенным данным не представляется возможным проследить между содержанием подвижных фосфатов в почвах и урожаем, а тем более определить оптимальный уровень фосфатной обеспеченности.

В серии микрополевых и полевых опытов на обыкновенных и южных черноземах степного Поволжья (Чуб, Штейн и др., 1973) установлено, что эффективность фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницы находится в обратной зависимости от обеспеченности почв подвижным фосфором. При содержании фосфатов по Чирикову < 7 и по Мачигину < 1,5 мг/100 г почвы прибавка урожая зерна от фосфорных удобрений наиболее высокая и составляет 6,6–6,7 ц/га зерна. С повышением уровня подвижных фосфатов она резко снижается и при содержании по Чирикову > 15 и по Мачигину > 3,5 мг/100 г почвы полностью отсутствует.

В опытах Краснодарской областной агрохимической лаборатории (Бунякин, 1975) при низкой исходной обеспеченности почвы фосфором оптимальный фосфатный уровень для озимой пшеницы Безостая 1, равный 2,6 мг/100 г почвы (по Мачигину), создавался единовременным внесением P_{200} . При этом уровне дальнейший рост урожая за счет фосфорных удобрений прекращался, а эффективность азотных удобрений заметно возрастала. Оптимальными дозами азота при достаточной обеспеченности почвы фосфором становились N_{90} и даже N_{120} . Кукуруза резко отрицательно реагировала как на повышение содержания фосфора в почве, так и на внесение фосфорных удобрений даже в невысоких дозах.

На фосфорных фонах, созданных в указанном выше опыте, первоначальное содержание P_2O_5 в слое почвы 0–40 см практически сохранялось и че-

рез 4 года. Средний уровень содержания подвижного фосфора, полученный внесением P_{200} , был близок к оптимальному и для сахарной свеклы.

В опытах ВИУА на орошаемых карбонатных черноземах (Зверева, Батьков и др., 1980) установлено, что оптимальное содержание подвижного фосфора (по Мачигину) для получения урожаев зерна кукурузы порядка 90 ц/га и озимой пшеницы порядка 55 ц/га находится в пределах 3,0–3,5 мг/100 г почвы и обеспечивается при низком исходном содержании единовременным внесением P_{300} . Увеличение содержания подвижных фосфатов от 3,0–3,5 до 5,5 мг/100 г почвы не оказывает существенного влияния на урожай, а дальнейший рост фосфатной обеспеченности приводит к снижению урожая. Максимальный эффект на кукурузе достигается при внесении повышенных доз азота (N_{180}).

В опытах И.М. Шапошниковой (1987) на карбонатных почвах Ростовской области максимальные (55,6–57,2 ц/га) урожаи первой после пара озимой пшеницы в среднем за 4 года получены при содержании подвижного фосфора 3,9–4,1 мг/100 г почвы, что достигалось при исходном содержании 1,67 мг/100 г внесением в пару P_{150} – P_{180} . При высоком содержании фосфатов в почве фосфорные удобрения не повышали продуктивность пшеницы или даже снижали ее. В дальнейшем последствие фосфорных удобрений учитывалось на второй после пара озимой пшенице, кукурузе и озимой пшенице. Наибольшая эффективность фосфатов достигалась при внесении в дозах, обеспечивающих содержание подвижного фосфора в интервале 3–4 мг/100 г почвы. Такое содержание поддерживалось в течение 5 лет при единовременном внесении фосфорных удобрений в дозах P_{180} – P_{300} .

На темно-каштановых орошаемых почвах Северного Кавказа (Зверева, 1982, 1994) в длительном опыте с дозами фосфатов на урожае озимой пшеницы до 45–50 ц/га и сахарной свеклы до 650–700 ц/га установлена статистическая зависимость между содержанием подвижных фосфатов в почве и урожаями. При указанных величинах эффективность фосфорных удобрений проявляется при содержании подвижных фосфатов в почве ниже 2,5 мг/100 г. Увеличение содержания их от 2,5 до 5,5 мг/100 г не влияет на урожай, а при содержании P_2O_5 свыше 5,5 мг/100 г проявляется тенденция к снижению урожая.

Таким образом, до сих пор отсутствует единое мнение об уровнях оптимального содержания подвижного фосфора в почве. В этой связи наиболее убедительной характеристикой оптимального уровня содержания фосфора в почве может служить порог экономической окупаемости фосфорных удобрений.

И.М. Богдевич, Л.П. Детковская, В.В. Лапа и др. (1989), обобщив результаты опытов Агрохимической службы и Геосети за 12 лет, вычислили параметры содержания P_2O_5 в почве, при которых стоимость прибавки урожая равна затратам на применение фосфорных удобрений. Суммарные затраты на использование 1 кг P_2O_5 минеральных удобрений соответствуют стоимости 1,32 кг зерна озимой ржи, 1,74 кг зерна ячменя. На суглинистых почвах экономическую окупаемость фосфорных удобрений при дозе P_{60} наблюдали по всем диапазонам содержания подвижного фосфора в почве (3–30 мг P_2O_5 на 100 г почвы), а расчетный оптимум лежал за пределами 30 мг.

На супесчаных почвах внесение минеральных удобрений окупалось прибавками урожая озимой ржи при увеличении запаса фосфора в почве до 2,8 мг при дозе P_{60} и 2,1 мг – при P_{90} . Картофель, сахарная свекла и другие корнеплоды хорошо отзываются на внесение фосфора даже на фоне высоких доз органических удобрений при содержании подвижного фосфора 20–30 мг на 100 г почвы.

Учитывая большое разнообразие условий внешней среды, различий в степени влияния почвенных условий и фосфатного режима на продуктивность растений, экспериментальные работы по установлению оптимального содержания фосфора в почве необходимо постоянно совершенствовать.

Влияние реакции почвенной среды на эффективность фосфорных удобрений

Реакция почвенной среды, определяемая концентрацией ионов водорода, а на дерново-подзолистых почвах и алюминия, оказывает на рост и развитие растений разностороннее влияние. Прямое ее действие заключается в нарушении коллоидно-химических свойств протоплазмы растительных клеток, в изменении в неблагоприятную сторону концентрации органических кислот в клеточном соке, нарушении белкового обмена и торможении синтеза белка, изменении адсорбции и поглощения растениями ионов.

Реакция почвенной среды особенно сильное действие оказывает на фосфатные состояния дерново-подзолистых почв. На кислых почвах наблюдается неблагоприятное действие алюминия, при котором поступление фосфорнокислого алюминия в корневую систему растений подавляет способность последней перемещать фосфор в их надземные органы. В результате отмечается специфическое фосфорное голодание растений. Кроме того, в кислой среде алюминий образует с фосфором почвы слабо- и труднорастворимые фосфаты, которые плохо используются растениями. Таким образом, на кислых почвах происходит снижение усвояемости фосфора, которое является одной из главных причин вредного действия излишней кислотности на растения.

По мере снижения кислотности почвы все большая часть фосфатов алюминия и других полуторных окислов осаждается в виде гидрооксида с выделением фосфат-ионов в почвенный раствор, то есть происходит мобилизация фосфатов почв. При известковании почвы вследствие взаимодействия извести с фосфатами железа и алюминия образуется рыхлосвязанные фосфаты кальция, более подвижные и более доступные для растений. В результате усиливается потребление растениями фосфора и повышается продуктивность сельскохозяйственных культур.

Исследованиями установлено, что кислая реакция почвы сдерживает развитие корневой системы растений и снижает, как было указано выше, способность их усваивать фосфор. В связи с этим на таких почвах растения требуют более высокого содержания легкорастворимых фосфатов, чем на менее кислых. На слабокислых и близких к нейтральным почвах корни растений развиваются лучше и усваивают фосфор из большого объема по-

чвы. Это позволяет растениям формировать более высокую урожайность на почвах с более низкими параметрами фосфатного состояния.

Снижение степени кислотности при известковании почв способствует более экономному использованию фосфатов для формирования урожая.

В исследованиях лаборатории фосфорных удобрений ВИУА на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (Адрианов, 2004) при одних и тех же уровнях содержания подвижных и лабильных форм фосфатов, интенсивности концентрации P_2O_5 в почвенном растворе по мере снижения кислотности почвы урожайность однолетних трав повышалась (рис. 13). При этом формирование одинакового урожая достигалось при более низкой обеспеченности растений фосфором.

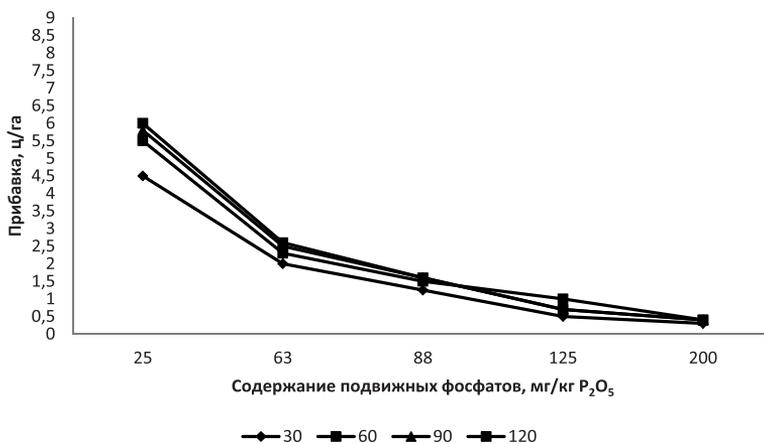


Рис. 13. Прибавка урожайности озимой пшеницы на серых лесных почвах Центрального округа в зависимости от содержания подвижных фосфатов в почве и доз фосфорных удобрений

Эффект взаимодействия рН почвенной среды и содержания подвижных фосфатов в почве и его влияния на продуктивность озимой пшеницы отмечен в опытах Агрохимической службы на дерново-подзолистых суглинистых почвах, выщелоченных черноземах Среднерусской провинции и на карбонатных черноземах Предкавказской провинции (Державин, 1992).

В опытах ЦОС ВНИИА на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве с низким содержанием подвижных фосфатов установлена количественная зависимость продуктивности культур полевого севооборота от pH_{KCl} почвы и дозы внесения фосфорных удобрений (Кирпичников, Адрианов, 2007). По мере снижения кислотности почвы значительно сокращалась потребность культур в применении фосфорных удобрений для выращивания одного и того же уровня урожая (рис. 14).

Например, для получения 40 ц/га з.е. в год на почве с рН 4,2 требовалось в течение 6 лет вносить по 190 кг/га P_2O_5 , с рН 4,5 – по 175 кг/га, с рН 5,0 – по 155 кг/га, с рН 5,5 – по 125 кг/га, с рН 5,9 – 95 кг/га P_2O_5 . Видимо, кислотность известкованной почвы с низким содержанием подвижного алюминия (около 50 мг/кг) не ограничивала получение указанного уровня урожайности культур при внесении высоких доз фосфорных удобрений.

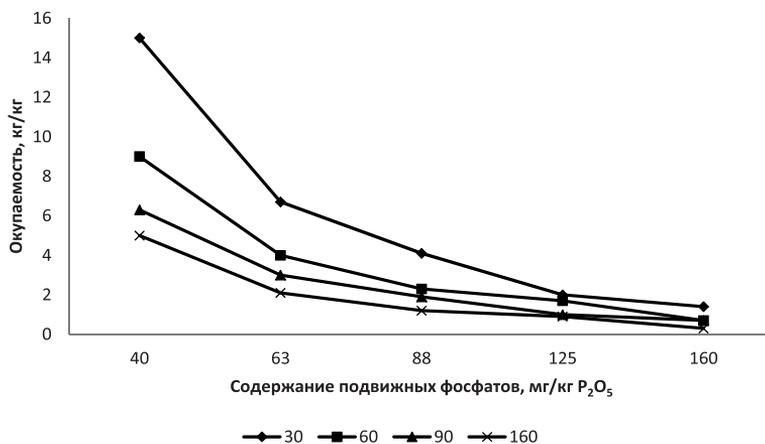


Рис. 14. Окупаемость фосфорных удобрений урожайностью озимой пшеницы на серых лесных почвах Центрального округа в зависимости от содержания подвижных фосфатов в почве и доз фосфорных удобрений

Таким образом, из приведенных данных следует, что на эффективность фосфорных удобрений большое влияние оказывает содержание подвижного фосфора в почвах. На одних и тех же типах и подтипах почв прибавка урожайности сельскохозяйственных культур колебалась в значительном диапазоне, подчиняясь общей закономерности, согласно которой с увеличением содержания подвижного фосфора в почве снижается окупаемость фосфорных удобрений. Представленный экспериментальный материал в свое время послужил хорошей научной основой для разработки программы повышения фосфатного уровня почв России и эффективности использования фосфорных удобрений. В настоящее время возникли новые задачи, которые заключаются в том, чтобы обеспечить агрохимическую службу и сельхозтоваропроизводителей более совершенной нормативно-справочной информацией, позволяющей более экономно использовать фосфорсодержащие удобрения, заботясь в первую очередь об окупаемости затрат на их применение и недопущение деградации почв по содержанию подвижного фосфора. Решение этих задач предполагает строгую дифференциацию доз фосфора в зависимости от агрохимических свойств почв.

В связи с тем, что содержание подвижного фосфора в почве является основным фактором, влияющим на эффективность фосфорных удобрений, возникает вопрос: каким должно быть оптимальное содержание P₂O₅ с агрохимической, экономической и экологической точек зрения. До настоящего времени еще не сложилось единого решения по данному вопросу.

Оптимальный фосфатный уровень в почве для рационального использования минеральных удобрений

Оптимальный фосфатный уровень в почве позволяет применять рациональные дозы азотных и калийных удобрений. Эффективность азота и калия на почвах, обеспеченных фосфором, повышается в 2–2,5 раза. При не-

достаточном обеспечении почв подвижным фосфором увеличение содержания в почве гумуса слабее влияет на урожайность сельскохозяйственных культур. Так, на выщелоченном черноземе Среднерусской провинции урожайность озимой пшеницы с повышением гумуса увеличивается при содержании в почве подвижного фосфора до 54 мг/кг.

Для нормального роста и развития растений должен быть создан в почве такой фосфатный уровень, чтобы он мог обеспечить высокую интенсивность высвобождения фосфат-ионов из твердой фазы в почвенный раствор и снабжение поверхности корней потоком ионов со скоростью, соответствующей скорости поступления фосфора в корни. Особенно важен оптимальный уровень содержания подвижного фосфора в почве в ранние фазы развития растений. Скорость поглощения фосфора молодыми растениями значительно выше скорости его перехода из твердой фазы в почвенный раствор даже в почвах с высокой обеспеченностью этим элементом. В наибольшей степени недостаток фосфора проявляется в начальный период вегетации при неблагоприятных погодных условиях. В засушливых условиях даже при высоком содержании в почве подвижного фосфора нарушается перенос его к корням в почвенном растворе.

Единого мнения ученых об уровнях оптимального содержания подвижного фосфора в различных типах почв Российской Федерации не имеется. По результатам обобщения данных полевых опытов Географической сети оптимальным уровнем содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистых почвах является 100–150 мг/кг (по Кирсанову), в обыкновенных, оподзоленных и мощных черноземах 100–150 мг/кг (по Чирикову), карбонатных черноземах, каштановых и сероземных почвах – 30–35 мг/кг (по Мачигину). Оптимальное содержание фосфора в дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси – 250–300 мг/кг (по Кирсанову), в супесчаных – 220–260, песчаных – 180–200, торфяно-болотных – 600–1000, в пойменных заболоченных почвах – 80–120 мг/кг. В то же время высокие урожаи сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах Центрального Нечерноземья (озимой пшеницы 55–60 ц/га, ячменя 40–50 ц/га, картофеля – 300–340 ц/га) достигаются в интенсивных технологиях при содержании подвижного фосфора в почве 75–100 мг/кг (по Кирсанову) и концентрации P_2O_5 в 0,02 н. $CaCl_2$ – вытяжке 0,10–0,15 мг/л. По данным С.Н. Адрианова (2004), на дерново-подзолистых и темно-серых лесных почвах уровень содержания подвижных фосфатов 100–110 мг/кг почвы является вполне достаточным для получения в благоприятные годы на фоне азотно-калийных удобрений урожайности зерновых культур порядка 5–6 т/га и сена многолетних трав 55–70 ц/га.

В технологиях, обеспечивающих урожайность зерна озимой пшеницы выше 6 т/га содержание подвижного фосфора должно составлять 220–300 мг/кг почвы, в интенсивных, гарантирующих урожайность зерна 4–5 т/га – 180–220 мг/кг почвы и для существующих при гарантированной урожайности зерна 2–2,5 т/га – 80–120 мг P_2O_5 кг почвы.

Анализ данных агрохимической службы, максимально приближенных к производственным условиям, позволяют разработать уравнения регрессии и установить количественную зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от содержания в различных почвах по зонам и про-

винциям подвижного фосфора и оптимальный уровень его содержания, взаимодействие его с другими показателями агрохимических свойств почв и погодными условиями.

Обобщение результатов полевых опытов показывает, что озимая рожь на внесение фосфорных удобрений реагирует слабее, чем озимая пшеница. На дерново-подзолистых почвах Центрального федерального округа с низким содержанием в них подвижных фосфатов прибавки урожайности от внесения 30–120 кг/га P_2O_5 составили 4,5–5,3 ц/га, окупаемость фосфатов в зависимости от дозы – 3,5–15,0 кг/кг, что соответственно на 1–2,2 ц/га и 3,3–2 кг/кг ниже, чем по озимой пшенице. На почвах со средним содержанием подвижных фосфатов эта разница заметно уменьшилась, с высоким содержанием – она практически отсутствовала.

Сравнение данных по эффективности фосфорных удобрений на почвах Нечерноземной зоны свидетельствует, что наиболее высокой она была в Центральном округе, в Северо-Западном и Приволжском округах заметно снижалась. При этом вышеназванные закономерности изменения прибавок урожайности от удобрений и их окупаемости в зависимости от уровня содержания подвижных фосфатов в почве сохранились (табл. 62).

Таблица 62

Эффективность фосфорных удобрений при внесении под озимую рожь на дерново-подзолистых и серых лесных почвах с низким содержанием подвижного фосфора

Федеральный округ	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
	30	60	90	120	150
Дерново-подзолистые почвы					
Прибавка, ц/га					
Северо-Западный	3,5	3,9	4,1	4,1	4,1
Центральный	4,5	5,0	5,3	5,3	5,3
Приволжский	2,4	2,7	2,8	2,8	2,8
Окупаемость, кг/кг					
Северо-Западный	11,7	6,5	4,6	3,4	2,7
Центральный	15,0	8,3	5,9	4,4	3,5
Приволжский	8,0	4,5	3,1	2,3	1,9
Серые лесные почвы					
Прибавка, ц/га					
Приволжский	2,5	3,1	3,5	3,6	3,6
Окупаемость, кг/кг					
Приволжский	8,3	5,2	3,9	3,0	2,4

Обобщение экспериментальных данных по яровой пшенице позволило выявить влияние содержания подвижного фосфора в почвах на эффективность применения фосфорных удобрений на обширной территории России, охватывающей основные типы и разновидности почв во всех зонах возделывания этой культуры. Результаты этой работы свидетельствуют о том, что, как и в опытах с озимой пшеницей, наибольшая эффективность фосфорных удобрений отмечена на почвах с низким содержанием P_2O_5 . Согласно данным, усредненным по всем изученным почвам, видно, что с увеличением в них содержания подвижного фосфора снижается прибавка урожая и оку-

паемость фосфорных удобрений. При низкой обеспеченности P_2O_5 прибавка урожая варьировала в зависимости от дозы от 3,0 до 4,1 ц/га, а при высокой приближалась к нулю. Окупаемость фосфора колебалась от 0,2 кг/кг при высоком содержании до 10,0 кг/кг при низком (табл. 63).

Таблица 63

Влияние содержания подвижного фосфора в почве на эффективность фосфорных удобрений при внесении под яровую пшеницу (в среднем по типам почв)

Содержание подвижного фосфора	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
	30	45	60	90	120
Прибавка урожая, ц/га					
Низкое	3,0	3,4	3,7	4,0	4,1
Пониженное	1,3	1,5	1,6	1,8	1,8
Среднее	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0
Повышенное	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6
Высокое	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Окупаемость фосфора прибавкой урожая, кг/кг					
Низкое	10,0	7,4	6,1	4,5	3,5
Пониженное	4,3	3,2	2,6	1,9	1,5
Среднее	2,4	1,8	1,5	U	0,8
Повышенное	1,4	1,2	0,8	0,6	0,5
Высокое	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2

Сравнение эффективности фосфорных удобрений на разных типах и подтипах почв показало, что разница в прибавке урожая яровой пшеницы в отдельных случаях достигала трехкратной величины, но все-таки существенно уступала разнице, обусловленной содержанием подвижного фосфора. Так, на серых лесных почвах при низкой обеспеченности их фосфором прибавка урожая яровой пшеницы при внесении 30 кг/га P_2O_5 составляла 4,8 ц/га, а при высоком содержании только 0,3 ц/га. Такая закономерность отмечалась и на других почвенных разностях (табл. 64).

Таблица 64

Влияние типа и подтипа почв на прибавку урожайности от внесения фосфорных удобрений под яровую пшеницу, ц/га

Тип и подтип почвы	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
	30	45	60	90	120
Низкое содержание подвижных фосфатов в почве					
Дерново-подзолистые	3,7	4,2	4,8	5,1	5,2
Серые лесные	4,8	5,3	5,7	6,2	6,4
Черноземы выщелоченные	3,9	4,4	4,8	5,3	5,5
Черноземы типичные и обыкновенные	1,6	1,8	1,9	2,1	2,1
Черноземы южные	2,3	2,6	2,8	3,1	3,2
Черноземы карбонатные и солонцеватые	1,6	1,9	2,0	2,3	2,4
Высокое содержание подвижных фосфатов в почве					
Дерново-подзолистые	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Серые лесные	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Черноземы выщелоченные	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Черноземы типичные и обыкновенные	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Черноземы южные	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Черноземы карбонатные и солонцеватые	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Увеличение доз с 30 до 120 кг/га не способствовало существенному росту урожайности. В связи с этим, окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая существенно снижалась. На почвах с низким содержанием P_2O_5 она уменьшалась примерно в 3 раза на всех представленных типах и подтипах почв. Наиболее окупаемыми оказались дозы 30–60 кг/га (табл. 65).

Таблица 65

Влияние типа и подтипа почв на окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая яровой пшеницы, кг/кг

Тип и подтип почвы	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
	30	45	60	90	120
Низкое содержание подвижных фосфатов в почве					
Дерново-подзолистые	12,3	9,2	7,6	5,6	4,4
Серые лесные	16,0	11,7	9,4	6,9	5,3
Черноземы выщелоченные	12,9	9,7	8,0	5,9	4,6
Черноземы типичные и обыкновенные	5,5	4,0	3,2	2,3	1,8
Черноземы южные	7,6	5,7	4,7	3,5	2,7
Черноземы карбонатные и солонцеватые	5,5	4,1	3,4	2,5	2,0
Высокое содержание подвижных фосфатов в почве					
Дерново-подзолистые	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2
Серые лесные	1,0	0,7	0,6	0,4	0,3
Черноземы выщелоченные	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Черноземы типичные и обыкновенные	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Черноземы южные	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2
Черноземы карбонатные и солонцеватые	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1

Сравнение величин окупаемости, полученных по этим дозам, с границей окупаемости фосфорных удобрений, которая сложилась из цен на удобрения и зерно, действующих в 2010 г. – 6,3 кг/кг, показывает, что применение фосфора, внесенного в форме аммофоса, было бы экономически целесообразно в дозах 30–60 кг/га на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, на черноземах выщелоченных, в дозе 30 кг/га – на южных черноземах. Во всех остальных случаях применение фосфора оказалось бы нерентабельным.

В практике сельскохозяйственного производства, особенно в настоящее время, когда соотношение цен на зерно и удобрения складывается далеко не в пользу первых, нередко возникает вопрос под какую культуру более целесообразно направить названные средства химизации, чтобы получить от их применения наибольшую отдачу. Ответить на поставленный вопрос помогут сравнительные данные по эффективности четырех наиболее распространенных зерновых культур, возделываемых на дерново-подзолистых почвах Центрального округа. Результаты такого сравнения показывают, что наиболее отзывчивой на фосфорные удобрения оказалась озимая пшеница, далее идут яровой ячмень и яровая пшеница. Наименьшая

прибавка урожая и окупаемость фосфора получены на озимой ржи, о чем упоминалось выше. Разница в прибавке по сравнению с озимой пшеницей составила 2,2–3,4 ц/га, а в окупаемости – 3,8–7,4 кг/кг (табл. 66).

Таблица 66

Отзывчивость зерновых культур на внесение фосфорных удобрений на дерново-подзолистых почвах Центрального округа, прибавка ц/га

Содержание P ₂ O ₅ , мг/кг	Дозы фосфора, кг/га							
	Прибавка, ц/га				Окупаемость, кг/кг			
	30	45	60	90	30	45	60	90
Озимая пшеница								
<50	5,7	6,3	6,8	7,5	19,0	14,0	11,3	8,3
51–100	1,9	2,1	2,3	2,5	6,5	4,6	3,8	2,8
101–150	0,8	0,9	0,9	1,0	2,7	2,0	1,5	1,1
>150	0,4	0,4	0,4	0,5	1,3	0,9	0,7	0,6
Озимая рожь								
<50	4,7	5,0	5,2	5,5	15,7	11,1	8,7	6,1
51–100	1,6	1,7	1,8	1,9	5,3	3,8	2,7	2,1
101–150	0,7	0,7	0,7	0,8	2,2	1,5	1,2	0,8
>150	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,7	0,5	0,4
Яровая пшеница								
<50	3,7	4,2	4,8	5,1	12,3	9,2	7,6	5,6
51–100	1,3	1,4	1,5	1,7	4,1	3,1	2,5	1,9
101–150	0,5	0,6	0,6	0,7	1,6	1,2	1,0	0,8
>150	0,2	0,2	0,3	0,3	0,7	0,5	0,4	0,3
Яровой ячмень								
<50	4,8	5,3	5,6	6,2	16,0	11,8	9,3	6,9
51–100	1,7	1,8	2,0	2,1	5,7	4,0	3,3	2,3
101–150	0,7	0,7	0,8	0,9	2,3	1,2	1,3	1,0
>150	0,3	0,3	0,3	0,4	1,0	0,7	0,5	0,4

Полученные данные, в отличие от ранее разработанных нормативов, могут быть использованы на всех уровнях управления сельскохозяйственным производством при планировании применения фосфорсодержащих удобрений под основные зерновые культуры практически на всей территории их возделывания.

Разработка соответствующих нормативов на основе представленного материала позволяет:

- устанавливать дозы фосфорсодержащих удобрений в зависимости от содержания подвижного фосфора и реакции почвенной среды на основных типах почв России;
- выделить поля, на которых применение фосфорсодержащих удобрений под зерновые культуры обеспечит максимальную экономическую эффективность;

- составлять ежегодный прогноз экономической эффективности фосфорсодержащих удобрений в зависимости от складывающихся цен на удобрения и зерновые культуры.

Оптимизация фосфорного питания зерновых культур будет способствовать повышению окупаемости фосфора прибавкой урожая, уменьшению удельных затрат на формирование урожая, повышению коэффициента использования фосфора из удобрений зерновыми культурами и, в конечном итоге, снижению себестоимости продукции.

Окупаемость фосфорных удобрений в зависимости от реакции почвенной среды и обеспеченности почв подвижными фосфатами

Эффективность применения удобрений оценивается рядом показателей, среди которых наиболее важным является их окупаемость прибавкой урожая. Для получения таких данных в масштабе страны необходимо обработать обширный экспериментальный материал.

Обобщение и статистическая обработка исходных данных были проведены по «Методике разработки нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая сельскохозяйственных культур» (Сычев, Завалин и др., 2009). Для этого использованы материалы Географической сети опытов с удобрениями, данные агрохимической службы, других научно-исследовательских учреждений, в схемах опытов которых вычленилось действие фосфора на урожайность сельскохозяйственных культур. В выборку вошли в основном результаты краткосрочных опытов и часть длительных, в которых имелась возможность выделить действие фосфорных удобрений в год их внесения. При этом для статистического анализа экспериментальных данных выбирались варианты, где величине урожайности соответствовал показатель агрохимической характеристики почвы: содержание гумуса, подвижного фосфора (обязательно), подвижного калия и реакции почвенной среды.

Влияние изучаемых факторов системы: почва – удобрения – прибавка урожая на изменчивость результативного признака оценивалась коэффициентом корреляции (r) и корреляционным отношением (\hat{r}), выражающих тесноту (силу) связи между расчетными и экспериментальными значениями выходной величины; по коэффициенту детерминации (d_{yx}) и индексу детерминации (\hat{r}^2) оценивалась доля изменчивости выходной величины, которая обуславливается колебаниями изучаемых факторов. Возможность использования линейной или криволинейной корреляции для описания связи факторов системы определялась по степени приближения криволинейной зависимости к прямолинейной по критерию линейности корреляции (F).

Далее на основании установленных связей каждый из изученных факторов, влияющих на эффективность фосфора, объединялся в единую неразрывно связанную систему в виде математической модели.

В обрабатываемых нами опытах агрохимическая характеристика почв была представлена в подавляющем большинстве реакцией среды, содержанием подвижных форм фосфора и калия и значительно реже содержанием гумуса.

Результаты статистической обработки данных опытов озимой и яровой пшеницы показали наличие четко выраженной зависимости изменчивости прибавки урожая этих культур от вариации содержания фосфора в почве. Она наблюдается на всех без исключения типах и подтипах почв, по которым проводилась статистическая обработка.

Значения коэффициентов корреляции, корреляционных отношений были, как правило, достаточно высокие. Так, в опытах с озимой пшеницей интервал колебаний коэффициентов корреляции составил от $-0,61$ до $-0,35$, корреляционного отношения – $0,51...0,89$, в опытах с яровой пшеницей от $-0,64$ до $-0,37$ и $0,56...0,90$ соответственно (табл. 67).

Значения корреляционных отношений, в большинстве случаев, были более устойчивыми, высокими и достоверными ($0,1\%$ -й уровень значимости). Именно поэтому оценка степени приближения криволинейной зависимости к прямолинейной по критерию линейности корреляции (F) показала, что для описания связи урожайности озимой и яровой пшеницы с содержанием подвижного фосфора в почве следует использовать криволинейную корреляцию ($P > F$). Исключение составляет для озимой пшеницы черноземы южные (Приволжский округ), для яровой пшеницы – черноземы мицеллярно-карбонатные (Южный округ). В этих случаях в расчетах использована линейная корреляция.

Статистический анализ зависимости эффективности фосфорных удобрений при внесении под озимую и яровую пшеницу от реакции почвенной среды свидетельствует о различном характере связи между этими признаками, который определяется особенностями культур, типом почв и климатическими условиями региона.

Так, на дерново-подзолистых, серых лесных почвах, черноземах оподзоленных прибавка урожайности озимой пшеницы в интервале значений рН $4,0-6,4$ закономерно и нелинейно возрастала, на черноземах выщелоченных, типичных, обыкновенных, южных, мицеллярно-карбонатных при рН $6,0-7,3$ зависимость между признаками практически отсутствовала, а на каштановых почвах при рН $6,5-8,0$ по мере увеличения щелочности снижалась.

Влияние реакции почвенной среды на эффективность фосфорных удобрений, вносимых под яровую пшеницу, носило неустойчивый характер. В подавляющем числе случаев коэффициенты корреляции и корреляционные отношения были невысокими (табл. 68).

Статистический анализ показал отсутствие существенной зависимости эффективности применения фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницу от содержания подвижного калия в почве, поскольку данная связь характеризовалась в подавляющем большинстве случаев невысокими коэффициентами корреляции и индексами детерминации.

Влияние содержания гумуса в почвах на эффективность фосфорных удобрений было изучено только на яровой пшенице, так как в опытах с озимой пшеницей отсутствовала надежная информация для обработки. Что касается яровой пшеницы, то можно отметить нестабильную и не всегда значительную связь между изучаемыми показателями, хотя в отдельных случаях отмечена слабая по тесноте, но достоверная по значимости информация.

Таблица 67

**Характеристика связи прибавки урожайности озимой пшеницы
с агрохимическими свойствами почвы и дозами фосфорных удобрений**

Аргументы системы	Корреляция						Критерий линейности корреляции	
	Линейная			Криволинейная			F _φ	F _T (0,01)
	коэффициенты корреляции	детерминации	уровень значимости	корреляционное отношение	индекс детерминации	уровень значимости		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Центральный округ								
Дерново-подзолистые почвы								
pH	-0,21	0,04	0,100	0,88	0,77	0,001	78,3	26,3
P ₂ O ₅	-0,55	0,30	0,001	0,88	0,77	0,001	17,2	5,9
K ₂ O	-0,12	0,01	0,400	0,66	0,44	0,001	20,0	19,5
Дозы удобр.	0,51	0,26	0,001	0,77	0,59	0,001	7,0	5,8
Серые лесные почвы								
pH	-0,15	0,02	0,200	0,18	0,03	0,200	0,3	26,3
P ₂ O ₅	-0,34	0,11	0,001	0,86	0,74	0,001	34,6	5,8
K ₂ O	-0,20	0,04	0,050	0,67	0,45	0,001	23,7	26,2
Дозы удобр.	-0,12	0,01	0,400	0,79	0,62	0,001	23,6	9,2
Черноземы выщелоченные, оподзоленные								
pH	-0,05	0,0	-	0,56	0,31	0,001	-	-
P ₂ O ₅	-0,45	0,20	0,001	0,89	0,79	0,001	22,9	5,0
K ₂ O	-0,46	0,21	0,001	0,51	0,26	0,001	0,74	5,0
Дозы удобр.	0,09	0,0	-	0,61	0,37	0,001	-	-
Черноземы типичные и обыкновенные								
pH	-0,12	0,01	-	0,38	0,14	0,050	2,94	99,5
P ₂ O ₅	-0,23	0,05	0,200	0,54	0,29	0,001	2,50	9,3
K ₂ O	-0,06	0,004	-	0,36	0,13	0,001	3,47	99,5
Дозы удобр.	0,14	0,02	0,400	0,76	0,57	0,001	12,8	9,2
Приволжский округ								
Серые лесные почвы								
pH	0,65	0,42	0,001	0,97	0,94	0,001	45,6	9,4
P ₂ O ₅	-0,61	0,37	0,001	0,87	0,76	0,001	10,6	4,5
K ₂ O	-0,21	0,04	0,200	0,24	0,06	0,100	0,4	99,5
Дозы удобр.	0,21	0,04	0,100	0,81	0,66	0,001	16,0	5,8
Черноземы выщелоченные								
pH	0,40	0,16	0,050	0,49	0,24	0,010	1,12	26,5
P ₂ O ₅	0,35	0,12	0,010	0,77	0,59	0,001	1,64	2,7
K ₂ O	0,11	0,01	-	0,57	0,32	0,001	2,82	9,4
Дозы удобр.	0,12	0,01	0,400	0,44	0,19	0,001	3,85	26,4
Черноземы обыкновенные и южные								
P ₂ O ₅	0,12	0,01	-	0,70	0,49	0,001	2,64	3,9
K ₂ O	0,05	-	-	0,08	-	-	-	-
Дозы удобр.	0,55	0,30	0,010	0,65	0,42	0,001	0,94	5,8
Южный округ								
Черноземы южные								
pH	-0,20	0,04	0,400	0,51	0,26	0,010	3,57	19,4
P ₂ O ₅	-0,53	0,28	0,010	0,88	0,77	0,001	7,29	7,4
K ₂ O	-0,39	0,15	0,050	0,45	0,20	0,050	0,76	19,5

Окончание табл. 67

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дозы удобр.	-0,01	0,00	-	0,72	0,52	0,001	5,92	5,8
Черноземы слабовыщелоченные								
P ₂ O ₅	-0,46	0,21	0,001	0,70	0,49	0,001	7,37	5,7
K ₂ O	0,08	0,006	-	0,55	0,30	0,001	5,73	5,7
Дозы удобр.	0,18	0,03	0,200	0,66	0,44	0,001	12,86	8,6
Черноземы мицеллярно-карбонатные								
pH	0,17	0,03	0,200	0,39	0,15	0,010	4,00	99,5
P ₂ O ₅	-0,51	0,26	0,001	0,57	0,32	0,001	5,73	13,7
K ₂ O	0,04	-	-	0,15	0,02	0,400	-0,60	-99,5
Дозы удобр.	0,41	0,17	0,001	0,89	0,79	0,001	34,5	9,20
Каштановые почвы								
pH	-0,59	0,35	0,001	0,63	0,39	0,001	1,24	13,7
P ₂ O ₅	0,38	0,14	0,010	0,77	0,59	0,001	11,0	7,1
K ₂ O	0,34	0,11	0,050	0,67	0,44	0,001	6,9	7,1
Дозы удобр.	0,07	0,005	-	0,41	0,17	0,050	1,44	7,2

Таблица 68

Характеристика связи прибавки урожайности яровой пшеницы с агрохимическими свойствами почвы и дозами фосфорных удобрений

Аргументы системы	Корреляция						Критерий линейности корреляции	
	Линейная			Криволинейная			F _φ	F _τ (0,01)
	коэффициенты корреляции	детерминации	уровень значимости	корреляционное отношение	индекс детерминации	уровень значимости		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Центральный округ Серые лесные почвы								
Гумус	-0,44	0,19	0,050	0,59	0,35	0,010	2,2	19,4
pH	-0,54	0,29	0,010	0,58	0,33	0,010	0,5	19,4
P ₂ O ₅	-0,51	0,26	0,050	0,88	0,77	0,001	8,9	5,8
K ₂ O	0,69	0,47	0,001	0,79	0,62	0,001	3,1	19,4
Дозы удобр.	0,74	0,55	0,001	0,84	0,70	0,001	2,8	8,7
Черноземы выщелоченные								
Гумус	0,32	0,10	0,400	0,77	0,59	0,001	6,6	19,4
pH	-0,63	0,39	0,400	0,76	0,57	0,001	6,3	245
P ₂ O ₅	-0,64	0,41	0,001	0,90	0,81	0,001	10,5	5,8
K ₂ O	0,39	0,15	0,050	0,65	0,42	0,001	7,4	246
Дозы удобр.	0,46	0,21	0,050	0,53	0,28	0,001	0,7	8,7
Приволжский округ Дерново-подзолистые почвы								
Гумус	0,33	0,11	0,100	0,41	0,17	0,050	0,8	19,4
pH	-0,07	0,00	-	0,31	0,09	0,050	-	-
P ₂ O ₅	-0,45	0,20	0,001	0,73	0,53	0,001	6,7	3,8
K ₂ O	-0,02	0,00	-	0,24	0,06	0,200	-	-
Дозы удобр.	-0,01	0,00	-	0,81	0,65	0,001	-	-
Серые лесные почвы								
Гумус	-0,27	0,07	0,400	0,55	0,30	0,010	16,0	245
pH	-0,52	0,27	0,001	0,56	0,31	0,001	21,4	19,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P ₂ O ₅	-0,39	0,15	0,001	0,71	0,50	0,001	30,4	5,7
K ₂ O	-0,28	0,07	0,050	0,40	0,16	0,001	16,2	19,5
Дозы удобр.	0,37	0,13	0,010	0,57	0,32	0,001	16,1	5,7
Черноземы выщелоченные								
Гумус	-0,31	0,09	0,200	0,60	0,36	0,001	4,9	19,5
pH	0,10	0,01	0,400	0,23	0,05	0,050	2,5	19,5
P ₂ O ₅	-0,37	0,13	0,001	0,74	0,55	0,001	9,1	2,8
K ₂ O	-0,09	0,008	0,400	0,15	0,02	0,200	0,6	19,5
Дозы удобр.	0,34	0,11	0,001	0,88	0,77	0,001	35,2	3,0
Черноземы типичные и обыкновенные								
Гумус	0,37	0,13	0,100	0,5	0,25	0,010	1,8	19,5
pH	0,09	0,00	-	0,21	0,04	0,400	-	-
P ₂ O ₅	-0,42	0,17	0,050	0,77	0,59	0,001	4,7	3,4
K ₂ O	-0,06	0,00		0,21	0,04	0,400	-	-
Дозы удобр.	0,06	0,00		0,59	0,35	0,001	-	-
Черноземы южные								
Гумус	-0,07	0,00	-	0,21	0,04	0,400	-	-
pH	0,32	0,10	0,200	0,34	0,11	0,200	0,2	248
1	2	3	4	5	6	7	8	9
P ₂ O ₅	-0,42	0,17	0,050	0,78	0,61	0,001	3,6	4,6
K ₂ O	0,25	0,06	0,400	0,38	0,14	0,100	0,9	19,4
Дозы удобр.	0,44	0,19	0,050	0,87	0,76	0,001	10,1	5,8
Уральский округ								
Черноземы оподзоленные и выщелоченные								
Гумус	0,05	0,00	-	0,69	0,47	0,001	-	-
pH	-0,09	0,00	-	0,18	0,03	0,050	-	-
P ₂ O ₅	-0,40	0,16	0,001	0,67	0,45	0,001	9,2	2,6
K ₂ O	-0,07	0,005	0,400	0,25	0,06	0,001	5,3	19,5
Дозы удобр.	0,20	0,04	0,010	0,73	0,53	0,001	21,0	2,7
Черноземы обыкновенные								
pH	0,14	0,02	-	0,20	0,04	0,400	-	-
P ₂ O ₅	-0,57	0,32	0,001	0,89	0,79	0,001	10,7	4,5
K ₂ O	0,25	0,06	0,200	0,53	0,28	0,010	4,0	19,5
Дозы удобр.	0,13	0,016	-	0,62	0,38	0,001		
Черноземы карбонатные и солонцеватые								
pH	-0,14	0,02	-	0,21	0,04	0,400	-	-
P ₂ O ₅	-0,13	0,017	0,400	0,65	0,42	0,001	5,3	4,5
K ₂ O	-0,02	-	-	0,34	0,11	0,050	-	-
Дозы удобр.	-0,12	0,014	-	0,78	0,61	0,001	-	-
Сибирский округ								
Серые лесные почвы								
pH	0,13	0,017	0,200	0,29	0,8	0,001	5,0	19,5
P ₂ O ₅	0,20	0,04	0,050	0,74	0,54	0,001	14,2	2,6
K ₂ O	0,07	0,005	-	0,37	0,13	0,001	-	-
Дозы удобр.	0,08	0,006	0,400	0,69	0,48	0,001	16,0	2,8
Черноземы оподзоленные и выщелоченные								
pH	-0,32	0,10	0,001	0,72	0,52	0,001	15,2	2,75
P ₂ O ₅	-0,16	0,02	0,001	0,71	0,50	0,001	9,6	1,9
K ₂ O	0,097	0,01	0,200	0,11	0,01	0,001	0,0	-
Дозы удобр.	0,17	0,03	0,001	0,79	0,62	0,001	26,7	2,2

Зависимость между прибавкой урожайности озимой пшеницы и дозами фосфорных удобрений, как правило, имела криволинейный характер.

Изменчивость прибавки урожайности озимой пшеницы от удобрений, обусловленная вариацией доз фосфора в зависимости от природно-сельскохозяйственной зоны, составила 17–79%. Более тесная связь эффективности удобрений с дозой фосфора наблюдалась при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, на черноземах типичных, обыкновенных, южных, мицеллярно-карбонатных. В остальных случаях величины корреляционного отношения были значительно ниже.

Зависимости величины прибавки урожайности яровой пшеницы от доз фосфорных удобрений также присущ криволинейный характер. Значения корреляционных отношений колебались от 0,53 до 0,88 в зависимости от региона.

Максимум функции эффективности удобрений, как для озимой, так и для яровой пшеницы в большинстве случаев находился в интервале 90–120 кг/га.

Оценивая в целом результаты исследований по влиянию агрохимических свойств почвы на эффективность фосфорных удобрений можно отметить, что они позволили дать количественное описание зависимостей эффективности применения фосфорных удобрений при внесении под озимую и яровую пшеницу от содержания в почве гумуса, подвижных форм фосфора и калия, реакции почвенной среды, доз фосфора применительно к различным типам почв Европейской части России, Уральского и Сибирского округов.

Исходя из результатов данного статистического анализа можно заключить, что содержание подвижного фосфора в почвах является определяющим во влиянии на эффективность фосфорных удобрений на всех типах и подтипах почв, на которых производились исследования. На дерново-подзолистых, серых лесных и каштановых почвах наблюдалось также влияние реакции почвенной среды на характер действия фосфорных удобрений. Следовательно, для расчета прибавки урожайности и окупаемости фосфорных удобрений приростом урожая зерновых культур целесообразно использовать содержание подвижного фосфора в почвах, дозы фосфорных удобрений и в отдельных случаях – показатели реакции почвенной среды. Исходя из этого произведены соответствующие расчеты.

Результаты опытов с озимыми зерновыми культурами показывает, что при смене почвенно-климатических зон с севера на юг по мере увеличения засушливости климата эффективность применения фосфорных удобрений закономерно снижается от дерново-подзолистых почв до черноземов южных.

В каждой зоне на одном и том же типе и подтипе почвы с повышением уровня обеспеченности их подвижными фосфатами роль фосфорных удобрений в формировании урожайности культур также заметно снижается. Наиболее высокие прибавки урожайности от их внесения наблюдаются на почвах с низким и пониженным содержанием подвижных фосфатов.

Следует отметить, что при этом наибольшее влияние на эффективность фосфорных удобрений оказывают влияние не генетические свойства почв, а степень их обеспеченности подвижными фосфатами. В наших исследованиях максимальная разница в прибавке урожая озимой пшеницы от внесения фосфорных удобрений на дерново-подзолистых почвах и типичных черноземах составляла 3,1–3,8 ц/га, тогда как при низкой и высокой обе-

спеченности P_2O_5 разница в прибавке урожая на этих же почвах колебалась в пределах соответственно 5,3–7,2 и 2,5–3,7 ц/га. Аналогично изменялась окупаемость фосфора прибавкой урожая. На дерново-подзолистых почвах при дозе 30 кг/га P_2O_5 она составила 19,0 кг/кг, на черноземе типичном – 8,7 кг/кг. Разница в окупаемости фосфора прибавкой урожая в зависимости от содержания P_2O_5 в этих почвах достигла десятикратной величины.

В Центральном федеральном округе на дерново-подзолистых почвах при низкой обеспеченности их подвижными фосфатами от внесения 30–120 кг/га P_2O_5 прирост урожайности озимой пшеницы составил 5,7–7,7 ц/га, при пониженной – 2,5–3,3 ц/га, при средней – 1,4–1,9 ц/га (рис. 15).

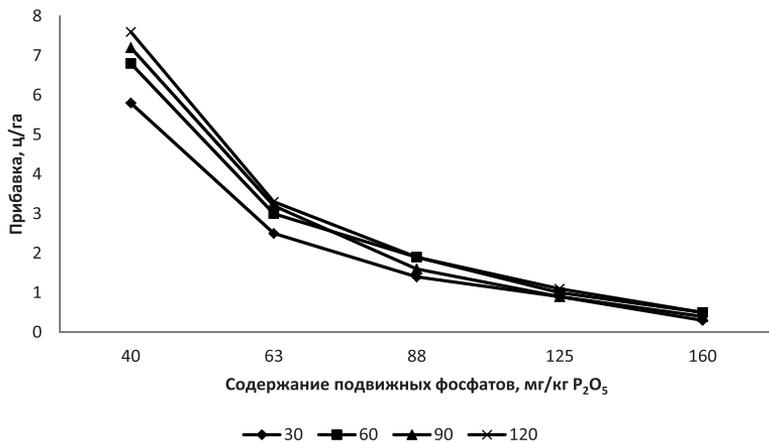


Рис. 15. Прибавка урожая озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижного фосфора и доз фосфорных удобрений

Окупаемость 1 кг P_2O_5 удобрений приростом урожая при этом варьировала соответственно от 19,0 до 6,4 кг, 8,3–2,8 кг и 4,7–1,6 кг зерна (рис. 16).

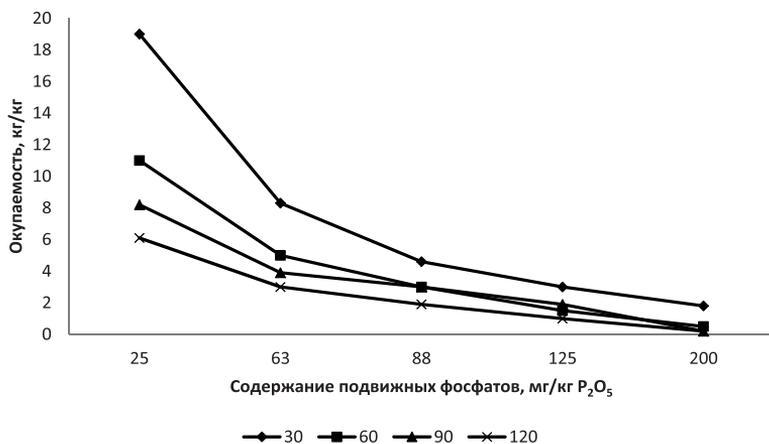


Рис. 16. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожайности озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижных фосфатов и доз фосфорных удобрений

На фоне более высокой обеспеченности почв подвижными фосфатами урожайность от удобрений практически не изменялась и на каждый кг P_2O_5 получено 2,7–0,4 кг зерна. При существующих ценах на удобрения и зерно озимой пшеницы, когда применение 1 кг P_2O_5 в виде аммофоса стоит 34,5 руб., 1 кг зерна – 5,5 руб., граница окупаемости фосфора равняется 6,3 кг/кг. Таким образом, в этих условиях в год внесения затраты на применение фосфорных удобрений в дозах 30–120 кг/га P_2O_5 окупаются только на почвах с низким содержанием и малых доз – с пониженным содержанием подвижных фосфатов. При окупаемости менее 6,3 кг/кг применение их сельхозпроизводителю является экономически невыгодным, т.е. соотношение цен на удобрения и сельскохозяйственную продукцию не стимулирует применение фосфорных удобрений на почвах с содержанием подвижных фосфатов на почвах с более высокой обеспеченностью P_2O_5 .

На серых лесных почвах, черноземах выщелоченных и оподзоленных, развивающихся в условиях неустойчивого увлажнения лесостепной зоны, при низкой обеспеченности их подвижными фосфатами прибавки урожайности озимой пшеницы от изучаемых доз фосфорных удобрений составили 3,8–6,1 ц/га, при пониженной – 1,7–2,6 ц/га, при средней – 0,9–1,5 ц/га, при повышенной – 0,5–0,9 ц/га (рис. 17, 18).

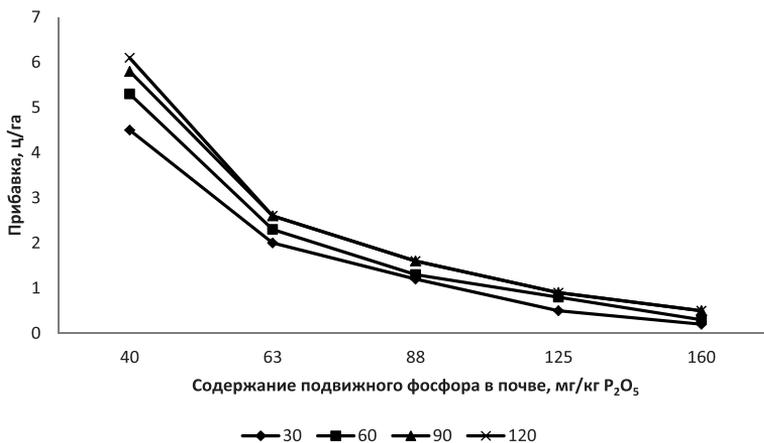


Рис. 17. Прибавка урожая озимой пшеницы на серых лесных почвах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижного фосфора и доз фосфорных удобрений

При высокой обеспеченности почв фосфатами от их внесения заметных прибавок урожайности не наблюдалось. Окупаемость P_2O_5 в зависимости от доз внесения составила соответственно 15,0–3,8 кг/кг; 6,7–1,6 кг/кг, 4,0–0,9 кг/кг; 2,0–0,5 кг/кг, что в 1,2–1,8 раза ниже, чем на дерново-подзолистых почвах (рис. 19, 20).

На типичных и обыкновенных черноземах, распространенных в засушливых районах лесостепной и степной зон, прибавки урожайности от фосфорных удобрений были примерно в 2 раза ниже, чем на дерново-подзолистых почвах. На почвах с низкой обеспеченностью фосфатами они составили 2,6–3,9 ц/га, с пониженной – 1,1–1,7 ц/га, со средней – 0,6–0,9 ц/га (рис. 21).

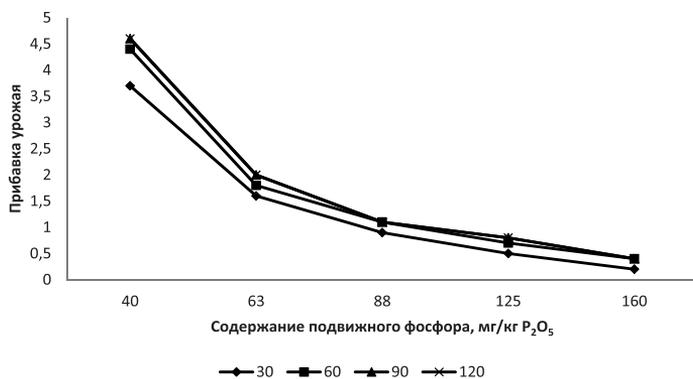


Рис. 18. Прибавка урожая озимой пшеницы на выщелоченных и оподзоленных черноземах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижного фосфора и доз фосфорных удобрений

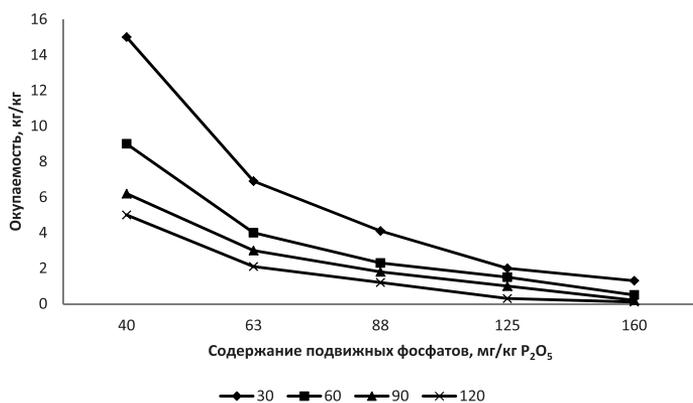


Рис. 19. Окупаемость фосфорных удобрений урожайностью озимой пшеницы на серых лесных почвах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижных фосфатов и доз фосфорных удобрений

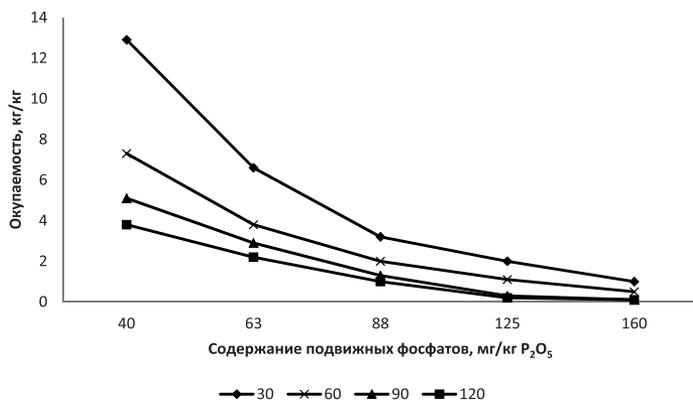


Рис. 20. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы на выщелоченных и оподзоленных черноземах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижных фосфатов и доз фосфорных удобрений

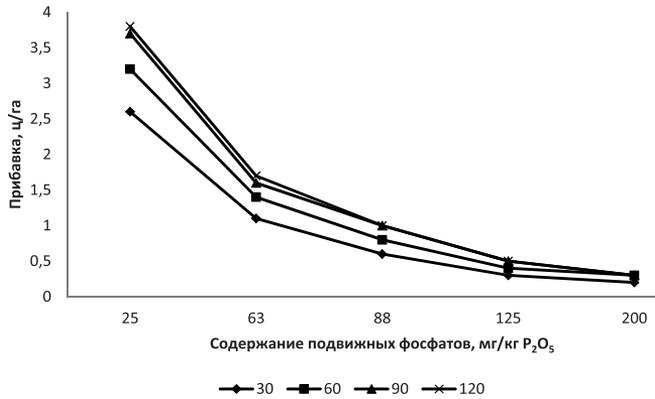


Рис. 21. Прибавка урожайности озимой пшеницы на типичных и обыкновенных черноземах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижных фосфатов и доз фосфорных удобрений

На почвах с более высокой обеспеченностью фосфатами растения на внесение удобрений не отзывались. Окупаемость каждого кг P₂O₅ приростом урожая в таких условиях также уменьшалась в 1,9–2,7 раза (рис. 22).

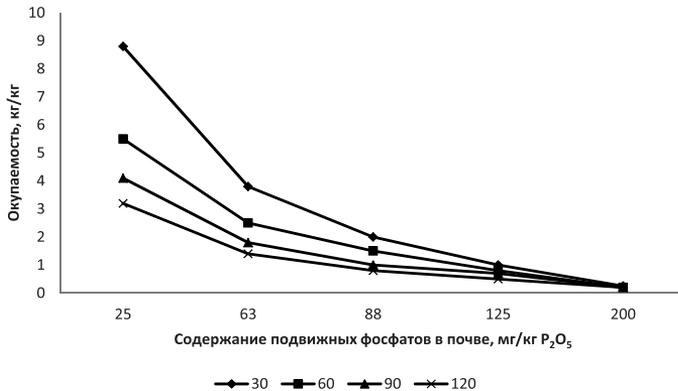


Рис. 22. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожайности озимой пшеницы на типичных и обыкновенных черноземах Центрального округа в зависимости от содержания в них подвижных фосфатов и доз фосфорных удобрений

В Приволжском федеральном округе на серых лесных почвах и черноземах выщелоченных, обыкновенных и южных прибавки урожайности озимой пшеницы от применения фосфорных удобрений были практически такие же, как в Центральном округе. Окупаемость каждого килограмма фосфора прибавкой урожайности на почвах с низкой и средней обеспеченностью подвижными фосфатами при внесении 30–90 кг P₂O₅ колебалась соответственно в пределах 15,0–1,7 кг/кг, 15,0–1,3 кг/кг и 10,0–1,0 кг/кг. Внесение более высоких доз удобрений, особенно на по-

чвах с повышенным и высоким содержанием подвижных фосфатов, было мало эффективным.

В Южном федеральном округе на предкавказских черноземах, особенно на черноземах Кубани, отличающихся более высоким для степной зоны средним годовым количеством осадков, озимая пшеница довольно хорошо отзывается на внесение фосфорных удобрений. При низком и пониженном содержании подвижных фосфатов от внесения 30–90 кг/га P_2O_5 на черноземах слабовыщелоченных урожайность зерна выросла на 1,3–4,2 ц/га, черноземах южных – 1,8–5,8 ц/га, черноземах мицеллярно-карбонатных – 1,6–5,6 ц/га, каштановых почвах – 1,6–4,4 ц/га. Окупаемость фосфора при этом составила соответственно 10,3–2,0 кг/кг, 14,3–2,7 кг/кг, 12,7–2,0 кг/кг, 12,3–2,1 кг/кг.

В наших исследованиях, как отмечалось выше, достоверная связь между величиной рН и эффективностью фосфорных удобрений была обнаружена на дерново-подзолистых, серых лесных и каштановых почвах. В связи с этим представляется целесообразным увязать в единый комплекс три фактора, оказывающих существенное влияние на прибавку урожая озимой пшеницы от фосфорных удобрений: реакции почвенной среды, содержание подвижного фосфора и дозы фосфорных удобрений. Полученные данные свидетельствуют о том, что снижение кислотности дерново-подзолистых и серых лесных почв способствовало повышению эффективности фосфорных удобрений. Переход этих почв из категории среднекислых в близкую к нейтральной способствовал повышению прибавки урожая при низкой обеспеченности P_2O_5 в зависимости от дозы на 1,3–1,6 ц/га на дерново-подзолистых и на 0,6–0,8 ц/га на серых лесных почвах. Еще более рельефно видна эта разница при сравнении окупаемости фосфорных удобрений прибавкой урожая. На дерново-подзолистых почвах она составляет 4,3–3,4 кг/кг при дозах фосфора 30–45 кг/га соответственно (табл. 69).

На каштановых почвах отмечена иная ситуация, где по мере их перехода от нейтральной реакции среды к щелочной действие фосфорных удобрений ослабевало. При низком содержании P_2O_5 прибавка урожая озимой пшеницы снижалась в зависимости от дозы на 1,5–1,7 ц/га, а окупаемость фосфора приростом урожая примерно 5,0 кг/кг. Увеличение доз фосфора свыше 90 кг/га не способствовало приросту урожайности озимой пшеницы независимо от содержания P_2O_5 в почве и реакции почвенной среды (табл. 70).

Озимая рожь относится к культурам малотребовательным к почвенному плодородию. В ряду зерновых культур, расположенных по мере уменьшения требовательности к почвенным условиям, она занимает предпоследнее место перед овсом. Это связано в основном с наличием у нее мощной корневой системы, способной проникать с осени на большую глубину и более полно использовать питательные вещества из почвы.

Рожь мало чувствительна к кислотности почвы. Оптимальная реакция среды находится в пределах рН 5,5–7,5 (Авдонин, 1972). Она является культурой умеренного климата и не предъявляет высоких требований к теплу. Среди озимых культур она – самая холодостойкая.

Таблица 69

Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожайности озимой пшеницы в зависимости от величины рН и содержания P_2O_5 в почве, кг/кг

рН	P_2O_5 , мг/кг (по Кирсанову)	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
		30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы Центральный округ						
<5,5	<50	11,7	8,7	7,0	5,1	3,9
	51–75	5,0	3,6	3,2	2,2	1,7
	76–100	3,0	2,2	1,7	1,3	1,0
	101–150	1,7	1,1	1,0	0,7	0,5
	>150	0,7	0,7	0,5	0,3	0,3
>5,5	<50	18,4	13,6	11,0	8,0	6,2
	51–75	8,0	5,6	4,8	3,5	2,7
	76–100	4,5	3,3	2,7	2,0	1,5
	101–150	2,6	1,9	1,5	1,1	0,9
	>150	1,1	0,8	0,7	0,5	0,4
Серые лесные почвы Центральный округ						
<5,5	<50	10,0	7,3	5,9	4,4	3,4
	51–75	4,3	3,2	2,6	1,9	1,5
	76–100	2,4	1,8	1,4	1,1	0,8
	101–150	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5
	>150	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2
>5,5	<50	15,0	11,1	9,0	6,6	5,1
	51–75	6,5	4,8	3,9	2,9	2,2
	76–100	3,7	2,7	2,2	1,6	1,2
	101–150	2,1	1,5	1,2	0,9	0,7
	>150	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3

Таблица 70

Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы в зависимости от величины рН и содержания P_2O_5 в каштановой почве, кг/кг

рН	P_2O_5 , мг/кг (по Мачигину)	Дозы фосфора, кг/га P_2O_5				
		30	45	60	90	120
<7,0	<15	12,3	8,7	6,8	4,8	3,7
	16–30	8,3	5,8	4,5	3,1	2,4
	31–45	7,0	4,9	3,8	2,7	2,0
	>45	6,3	4,4	3,3	2,3	1,8
7,0–8,0	<15	9,3	6,7	5,2	3,7	2,8
	16–30	5,0	3,6	2,8	2,0	1,5
	31–45	4,0	2,9	2,2	1,4	1,2
	>45	3,0	2,2	1,7	1,2	0,9
>8,0	<15	7,3	5,3	4,2	2,9	2,3
	16–30	3,3	2,4	1,8	1,2	0,9
	31–45	2,0	1,3	1,0	0,8	0,6
	>45	1,3	0,9	0,7	0,4	0,3

Последствие фосфорных удобрений

В земледелии России в последние годы сложилась крайне необычная ситуация. За последние 20 лет применение удобрений резко сократилось. Однако при этом снижение урожайности сельскохозяйственных культур происходило не так заметно и даже в отдельные благоприятные годы, например 2001 и 2008 г., наблюдалось увеличение урожайности зерновых культур. Это создало неверное представление о роли удобрений в формировании урожайности сельскохозяйственных культур и необходимости широкого применения средств химизации в условиях нашей страны.

Следует иметь в виду, что наряду с прямым действием, то есть действием удобрения в год внесения, они обладают значительным последствием, которое может продолжаться не один год. Именно этим можно объяснить тот факт, что снижение продуктивности пашни происходит не пропорционально уменьшению количества вносимых удобрений.

Исследованиями установлено, что среди минеральных удобрений наибольшее последствие свойственно фосфорным удобрениям. Длительность последствия фосфорных удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур и плодородие почв зависит от доз и способов внесения фосфатов, генетических особенностей почв, их минералогического и гранулометрического состава, физико-химических и агрохимических свойств.

Как известно, фосфорные соединения в почве малоподвижны и поэтому даже в течение нескольких лет после внесения удобрений из-за позиционной недоступности они не могут быть полностью использованы корневой системой растений (Чумаченко, 1999; Адрианов, 2004). По данным многих опытов на дерново-подзолистых почвах при внесении по 40–60 кг/га P_2O_5 на фоне $N\ 40\text{--}60\ K\ 40\text{--}60$ из фосфорных удобрений в первый год используется только от 10–15 до 20–25%, а за 2–3 года – примерно 40% P_2O_5 (Соколов, Гладкова и др., 1980; Лебедева, 1989; Кулаковская, 1990; Жуков, 1996).

Неиспользованная часть фосфатов длительное время остается в почве в доступной для растений форме. Результаты вегетационных и микрополевых опытов показывают, что остаточные фосфаты за 3–5 лет могут быть использованы практически нацело. Однако в полевых условиях для полного усвоения даже средних доз фосфорных удобрений требуется значительно больше времени. Основываясь на данных длительных опытов, английские исследователи приходят к выводу, что коэффициент использования фосфорных удобрений может быть доведен почти до 100%. Это положение подтверждается и результатами отечественных исследований. Например, на карбонатном черноземе Кубани доза фосфора, равная 90 кг/га, была исчерпана примерно на 65–70% за 7 лет. В опыте ДАОС с дозами фосфоритной муки на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве для полного использования 45 кг/га P_2O_5 потребовалось не одно десятилетие, а доза P_{135} была исчерпана через 60 лет. Фосфоритная мука, внесенная один раз при закладке опыта в дозах P_{270} и P_{540} , на 49-й год опыта дала статистически достоверные прибавки урожая зерна, равные 2,9 и 3,1 ц/га (Вехов, Хлыстовский и др., 1975).

В микрополевом опыте ВИУА на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах в варианте внесения P_{90} коэффициент использования остаточного фосфора удобрений на 4–8 год последействия достигал 100% (Сдобникова, Трофимов и др., 1988).

Влияние минеральных удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур в течение более 25 лет отмечено в стационарном опыте Львовской опытной станции на среднесуглинистом средневщелоченном черноземе (Лигум, 1962, 1969).

В опыте ВНИИ сахарной свеклы и сахара на тяжелосуглинистом средневщелоченном черноземе последействие минеральных удобрений в повышенных дозах проявлялось в течение 8–9 лет (Алексеева, 1971).

Анализ материалов 132 опытов, проведенных учреждениями Географической сети опытов ВИУА и агрохимической службы, которые опубликованы в соответствующих сборниках, показал, что изучению последействия удобрений уделяли мало внимания. С одной стороны, это определялось наращиванием темпов химизации в тот период и научные учреждения в своих исследованиях пытались опередить эти темпы, чтобы на каждом последующем этапе иметь научную основу для рационального использования удобрений. С другой – систему удобрений привязывали к типовым севооборотам для различных почвенно-климатических зон. В Нечерноземной зоне эффективность удобрений в длительных опытах обычно изучали в севооборотах с большим количеством полей, а удобрения во всех случаях вносили на каждое поле, то есть в этих опытах последействие не изучали.

В лесостепных и степных районах подавляющее число опытов проводили в 6–8-польных севооборотах, а удобрения вносили под 2–3 культуры. Следовательно, последействие изучали 1–2 года. Вследствие этого, из рассмотренных данных удалось выявить лишь 5 опытов, в которых последействие удобрений можно было проследить в течение 4–7 лет. Сюда относятся опыты по изучению эффективности периодического внесения высоких доз фосфорных удобрений и с искусственно созданными фосфатными фонами.

Анализ результатов обобщения таких опытов (табл. 71) свидетельствует о том, что характер последействия фосфорных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур, несмотря на различия, обусловленные почвенно-климатическими условиями районов возделывания культур, отличается одной общей и четко выраженной особенностью – устойчивой продолжительностью положительного влияния удобрений на продуктивность 1 га пашни.

Тенденцию снижения эффекта последействия в проведенных исследованиях отмечали только в опыте с удобрением полевых культур на черноземе щелоченном в Краснодарском крае. В остальных случаях при наличии весьма заметных различий в приросте продуктивности пашни эффект от последействия удобрений остается чаще всего значительным.

Тенденцию сохранения высокого положительного эффекта от последействия фосфора наблюдали на черноземе обыкновенном Саратовской области, черноземе предкавказском Краснодарского края, в котором на седьмой год прирост продуктивности пашни достигал 7 ц/га з.е. или 28% по сравнению с контролем.

Таблица 71

Последствие фосфорных удобрений

Тип почвы, регион	Доза P ₂ O ₅ , кг/га	Прибавка по годам последствия удобрений, ц/га з.е.						
		1	2	3	4	5	6	7
Дерново-подзолистая, Республика Мордовия	240	<u>6,8</u> 46	<u>4,3</u> 35	<u>6,0</u> 40	<u>5,4</u> 38	<u>1,4</u> 22	<u>12,4</u> 50	–
Дерново-среднеподзолистая, Пермская обл.	300	<u>7,1</u> 38	<u>0,5</u> 3	<u>5,7</u> 19	<u>1,7</u> 12	<u>2,3</u> 22	<u>0,8</u> 7	–
Чернозем обыкновенный, Саратовская обл.	300	<u>0,8</u> 9	<u>5,1</u> 9	<u>1,8</u> 7	<u>1,5</u> 15	<u>3,5</u> 16	–	–
Чернозем выщелоченный, Краснодарский край	240–480	<u>8,3</u> 8	<u>6,1</u> 18	<u>3,1</u> 7	<u>1,3</u> 4	–	–	–
Чернозем предкавказский, Краснодарский край	400	<u>11,2</u> 27	<u>12,6</u> 40	<u>28,1</u> 26	<u>10,6</u> 30	<u>8,6</u> 26	<u>2,0</u> 5	7,0 22

Примечание: над чертой – прибавка урожая в ц/га з.е., под чертой – доля участия последствия удобрений в формировании урожая в %.

Таким образом, можно сказать, что последствие высоких доз фосфорных удобрений не заканчивается на 6–7 год после их внесения, а проведенные исследования не выявили возможной продолжительности их последствия. Поэтому для оценки длительности последствия минеральных удобрений в указанных опытах мы использовали метод математического моделирования, который позволил, исходя из установленных закономерностей, составить соответствующий прогноз. Согласно этому прогнозу продолжительность последствия удобрений в опытах на дерново-подзолистых почвах составляет 14–19 лет, на черноземных почвах – 12–22 года (табл. 72).

Таблица 72

Прогноз последствия фосфорных удобрений

Тип почвы, регион	Год последствия												
	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	19	20	22
	Прибавка урожая, ц/га з.е.												
Дерново-подзолистая, Республика Мордовия	6,8	5,1	3,3	2,3	1,6	1,0	0,6	0,2	–	–	–	–	–
Дерново-среднеподзолистая Пермская область	6,3	4,9	3,4	2,6	2,0	1,5	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	–	–
Чернозем обыкновенный, Саратовская область	5,1	3,8	2,5	1,8	1,3	0,9	0,5	0,2	–	–	–	–	–
Чернозем выщелоченный, Краснодарский край	8,3	6,1	3,8	2,5	1,6	0,9	0,3	–	–	–	–	–	–
Чернозем предкавказский, Краснодарский край	12,0	9,5	7,0	5,6	4,5	3,7	3,1	2,5	2,0	1,6	1,4	1,2	0,9

Можно предположить, что последствие фосфорных удобрений будет продолжаться до тех пор, пока содержание подвижного фосфора в почве, которое было достигнуто после внесения высоких доз фосфорных удобрений, не снизится до исходного состояния. Для того чтобы подтвердить эту

гипотезу, сошлемся на длительный полевой опыт ДАОС по изучению эффективности фосфоритной муки на дерново-подзолистой почве. Этот опыт проводили в течение 58 лет. В опыте наряду с учетом урожаев вели наблюдения за изменением содержания подвижного фосфора в почве. Полученные результаты свидетельствуют о том, что продолжительность влияния фосфоритной муки на урожай сельскохозяйственных культур зависела от дозы удобрений. Так, действие дозы P_{45} ограничивалось одной ротацией севооборота, P_{135} – тремя, P_{270} – девятью, а действие дозы P_{540} продолжалось через 12 ротаций.

Внесение высоких доз фосфоритной муки сопровождалось увеличением содержания подвижного фосфора в почве. Если в варианте P_{45} содержание подвижного фосфора практически оставалось без изменения, то при внесении 540 кг/га фосфора оно достигало 95 мг/кг, что более чем в четыре раза больше по сравнению с контролем.

Корреляционно-регрессионный анализ данных свидетельствует о том, что между содержанием подвижного фосфора в почве и прибавкой продуктивности пашни существует значимая связь. Корреляционные отношения между расчетными и экспериментальными значениями выходной величины составляет 0,68 при уровне значимости 0,1%. Аналогичные данные получены в опыте, проведенном на Предкавказском черноземе Краснодарского края, в котором установлено, что эффективность последствия фосфорных удобрений и его продолжительность определяются содержанием подвижного фосфора в почве. Эта связь характеризуется корреляционным отношением 0,98.

Следовательно, последствие фосфорных удобрений можно прогнозировать по содержанию подвижного фосфора в почве. О достоверной зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от обеспеченности почв подвижным фосфором свидетельствуют результаты других исследований. Для прогноза последствия фосфорных удобрений можно пользоваться прогнозом изменения содержания подвижного фосфора в почве.

Ценные сведения, имеющие большую научную и практическую значимость по данному вопросу, получены в исследованиях ЦОС ВНИИА в длительном стационарном опыте на слабокультуренных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах (Кирпичников, Адрианов и др., 2004; Кирпичников, Адрианов, 2007).

Данные исследований показывают, что внесение фосфорных удобрений и известки значительно улучшило фосфорное питание растений. От систематического применения удобрений в опыте за 6 лет среднегодовая урожайность основной продукции культур зернопропашного севооборота повысилась с 27,9 до 41,1 ц/га з.е. (табл. 73).

Как видно, наблюдался значительный отрицательный эффект взаимодействия фосфорных удобрений и известки. Эффективность внесения фосфорных удобрений в дозах 50–200 кг/га P_2O_5 в год на известкованной почве была максимальной. В среднем природ продуктивности культур севооборота составил 7,2–12,5 ц/га з.е. На известкованных почвах он снижался в 1,5– 1,8 раза.

Таблица 73

Действие систематического применения фосфорных удобрений (6 лет) и их последствия (22 года) на среднегодовую продуктивность культур севооборота, ц/га з.е.

Вариант		Действие удобрений			Последствие удобрений		
Внесено удобрений, всего		Продуктивность	прибавка		Продуктивность	прибавка	
CaCO ₃ по г.к.	P ₂ O ₅ , кг/га		от извести	от P ₂ O ₅		от извести	от P ₂ O ₅
0	0	27,9	0	0	25,0	0	0
0	300	35,1	0	7,2	28,4	0	3,4
0	600	38,1	0	10,2	31,9	0	6,9
0	1200	40,4	0	12,5	35,4	0	10,4
0,75	0	32,3	4,4	0	29,3	4,3	0
0,75	300	37,3	2,2	5,0	31,3	2,9	2,0
0,75	600	39,3	1,2	7,0	34,1	2,2	4,8
0,75	1200	40,9	0,5	8,6	37,1	1,7	7,8
1,5	0	34,2	6,3	0	31,1	6,1	0
1,5	300	38,2	3,1	4,0	32,5	4,1	1,4
1,5	600	39,9	1,8	5,7	35,0	3,1	3,9
1,5	1200	41,1	0,7	6,9	37,8	2,5	6,7

Данные исследований свидетельствуют о высоком эффекте последствия фосфорных удобрений. На известкованной почве на фоне P₁₂₀₀ среднегодовая прибавка продуктивности культур севооборота за 22 года составила 10,4 ц/га з.е., что лишь несколько меньше прибавок за первые 6 лет прямого действия. По мере снижения удобренности почв фосфатами разница между прибавками от действия и последствия удобрений заметно возрастала, что, видимо, связано с уменьшением насыщенности почв фосфатами вследствие их закрепления почвой и выноса урожаями сельскохозяйственных культур. Эти данные показывают, что остаточные фосфаты удобрений, не использованные растениями, длительное время сохранялись в почве в усвояемой форме, не исключаясь из резерва питания растений, как считали многие исследователи до недавнего времени.

За весь период проведения опытов на известкованной почве от каждого кг P₂O₅ удобрений в течение 28 лет в дозах P₃₀₀ получено 40,0 кг, P₆₀₀ – 35,7 кг, P₁₂₀₀ – 25,4 кг з.е. (табл. 74).

Это свидетельствует о том, что на период последствия удобрений в указанных вариантах приходится 64–75% прибавок урожайности.

По мере снижения кислотности почвы за счет известкования отдача от внесения удобрений снижалась. На известкованной малыми дозами почве окупаемость 1 кг P₂O₅ составила в пределах 18,6–24,6 кг, на известкованной высокими дозами почве – 15,7–20,0 кг з.е.

В результате систематического применения возрастающих доз фосфорных удобрений и извести в течение первых 6 лет проведения опыта созданы агрохимические фоны почвы, имеющие 4 уровня содержания подвижных фосфатов. Содержание подвижных фосфатов в почве без внесения фосфорных удобрений (фон P₀) в зависимости от степени ее известкованности коле-

балось в пределах 17–22 мг/кг, при ежегодном применении по 50 кг/га P_2O_5 (P_{300}) стало – 34–38 мг/кг, по 100 кг/га P_2O_5 (P_{600}) – 60–72 мг/кг, по 200 кг/га P_2O_5 (P_{1200}) – 125–134 мг/кг. Степень их подвижности при этом составляла соответственно 0,015–0,022 мг/л, 0,030–0,034 мг/л, 0,050–0,078 мг/л и 0,108–0,148 мг/л P_2O_5 . На естественном фоне почва имела рНКСl 4,1–4,2, при известковании по 0,75 г.к. – рНКСl 4,8–5,0, по 1,5 г.к. – рНКСl 5,6–5,8.

Созданные фоны оказали определяющее влияние на действие и последствие свеживнесенных фосфорных удобрений (табл. 75).

Таблица 74

Окупаемость фосфорных удобрений приростом урожайности сельскохозяйственных культур и коэффициент использования P_2O_5 за 28 лет

Вариант		Суммарная прибавка урожайности, ц/га з.е.			Окупаемость 1 кг P_2O_5 прибавкой кккг/урожайности, кг з.е.			Вывос P_2O_5 урожаем, кг/га	Использование P_2O_5 , %
Внесено удобрений, всего	CaCO ₃ по г.к.	P_2O_5 , кг/га	действие (6 лет)	после действие (22 года)	всего	действие (6 лет)	после действие (22 года)		
								0	0
0	300	43,3	76,7	120,0	14,4	25,6	40,0	168	56,0
0	600	61,3	153,1	214,4	10,2	25,5	35,7	322	53,7
0	1200	75,1	229,7	304,8	6,3	19,1	25,4	439	36,6
0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,75	300	29,8	42,9	72,7	9,9	14,3	24,2	145	48,3
0,75	600	42,2	105,3	147,5	7,0	17,6	24,6	277	46,2
0,75	1200	51,6	171,1	222,7	4,3	14,3	18,6	384	32,0
1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	300	24,2	28,8	53,0	8,1	9,6	17,7	115	38,3
1,5	600	34,2	85,6	119,8	5,7	14,3	20,0	229	38,2
1,5	1200	41,9	146,9	188,8	3,5	12,2	15,7	321	26,8

Таблица 75

Действие и последствие свеживнесенных фосфорных удобрений на среднегодовую продуктивность культур севооборота в зависимости от фона известкования почвы и предшествующей его удобрённости фосфатами, ц/га з.е.

Фосфатный фон	Действие доз удобрений (кг/га P_2O_5) в среднем за 10 лет				Последствие доз удобрений (кг/га P_2O_5) в среднем за 11 лет			
	0	40	80	120	0	40	80	120
Без извести								
0	33,4	40,0	42,7	44,7	17,5	22,6	24,7	26,4
300	38,3	42,9	44,8	46,2	23,1	26,8	28,3	29,5
600	40,4	44,1	45,6	46,8	25,4	28,5	29,8	30,7
1200	43,2	45,8	46,9	47,7	28,7	30,9	31,8	32,5
Известь по 1,5 г.к.								
0	38,7	43,8	45,9	47,5	25,0	28,9	30,6	31,8
300	42,4	45,6	46,9	47,9	28,2	30,6	31,6	32,4
600	44,0	46,3	47,3	48,0	29,5	31,3	32,1	32,7
1200	46,2	47,3	47,8	48,2	31,3	32,3	32,7	33,0

В период действия удобрений на естественном фоне почвы среднегодовая урожайность культур севооборота в среднем за 10 лет составила 33,4 ц/га з.е. При внесении 40–120 кг/га P_2O_5 в год она повысилась на 6,6–11,3 ц/га з.е. На фосфатных фонах по мере повышения их удобрённости прибавка урожайности от свежевнесенных фосфатов уменьшилась в 1,4–2,5 раза, и на фоне P_{300} она составила 4,6–7,9 ц/га, на фоне P_{600} – 3,7–6,4 ц/га, на фоне P_{1200} 2,6–4,5 ц/га з.е. На известкованной по 1,5 г.к. почве прибавки несколько снизились и составили соответственно 5,1–8,8 ц/га, 3,2–5,5 ц/га, 2,3–4,0 ц/га и 1,1–2,0 ц/га з.е. При этом за рассматриваемый период влияние ранее созданных фосфатных фонов оставалось довольно значительным. На неудобрённых свежевнесенными фосфатами почвах в зависимости от степени известкования урожайность культур повышалась на 3,7–9,8 ц/га з.е., на удобрённых ими почвах – на 0,4–5,8 ц/га з.е.

В годы последействия свежевнесенных фосфорных удобрений по сравнению с периодом прямого их действия заметно изменилось участие изучаемых факторов в формировании урожая. На неизвесткованной почве фосфаты удобрений, внесенные при создании фонов, влияли на продуктивность растений сильнее, чем свежевнесенные фосфаты. На фосфатных фонах по мере повышения их предшествующей удобрённости урожайность культур увеличивалась на 5,6–11,2 ц/га з.е. Прибавки урожайности от последействия свежевнесенных фосфатов в зависимости от фосфатных фонов составили 2,2–8,9 ц/га з.е. На известкованной почве влияние их существенно не различалось.

Динамика урожая культур севооборота за годы проведения опыта свидетельствует о высокой эффективности фосфорных удобрений, которая наблюдалась в течение длительного времени. При этом отдача единицы удобрений по мере повышения удобрённости фосфатных фонов и доз свежевнесенных фосфатов существенно снижалась (табл. 76).

Ежегодное применение 40–120 кг/га P_2O_5 на неизвесткованной почве с очень низким содержанием подвижных фосфатов (фон PO) снизило оплату каждого кг удобрений в среднем за 10 лет с 16,5 до 9,4 кг з.е. В варианте со средним содержанием подвижных фосфатов в почве (фон P_{600}) оплата каждого кг удобрений понизилась в 1,7 раза, с повышенным содержанием (P_{1200}) – в 2,4 раза. Влияние удобрений на продуктивность растений было значительным и после прекращения их внесения. Окупаемость единицы фосфорных удобрений в среднем за 11 лет последействия составляла 86–94% от прямого их действия. Суммарная окупаемость удобрений приростом урожая за годы их прямого действия и последействия в зависимости от доз свежевнесенных фосфатов на рассмотренных выше фонах составляла за 21 год соответственно 17,6–30,8 кг; 10,2–17,8 кг и 7,3–12,6 кг з.е. на 1 кг P_2O_5 .

Известкование почвы по 1,5 г.к. уменьшило ее кислотность и в течение длительного периода заметно улучшало фосфорное питание растений. В связи с этим несколько снизилась эффективность применения фосфорных удобрений. Окупаемость 1 кг P_2O_5 на фонах с низким содержанием подвижных фосфатов уменьшилась в 1,3–1,5 раза, на более высоких фосфатных фонах – в 1,8–2,3 раза.

Таблица 76

Окупаемость 1 кг P_2O_5 прибавкой урожая при действии и последствии свежевнесенных удобрений на различных фосфатных фонах, кг з.е.

Фос- фатный фон	Свежевнесенные фосфорные удобрения в среднем за 10 лет, кг/га P_2O_5								
	40			80			120		
	действие	послед- дейст- вие	сумма	действие	послед- дейст- вие	сумма	действие	послед- дейст- вие	сумма
Без извести									
0	16,5	14,3	30,8	11,6	10,0	21,6	9,4	8,2	17,6
300	11,5	10,2	21,7	8,1	7,2	15,3	6,6	5,9	12,5
600	9,3	8,5	17,8	6,5	5,9	12,4	5,3	4,9	10,2
900	7,8	7,2	15,0	5,5	5,1	10,6	4,5	4,1	8,6
1200	6,5	6,1	12,6	4,6	4,3	8,9	3,8	3,5	7,3
Известь по 1,5 г.к.									
0	12,8	10,7	23,5	9,0	7,7	16,7	7,3	6,2	13,5
300	8,0	6,9	14,9	5,6	4,8	10,4	4,6	3,9	8,5
600	5,8	5,2	11,0	4,1	3,6	7,7	3,3	2,9	6,2
900	4,3	3,9	8,2	3,0	2,8	5,8	2,4	2,2	4,6
1200	2,8	2,8	5,6	2,0	1,9	3,9	1,7	1,6	3,3

Определение баланса фосфора и коэффициентов его использования из удобрений с помощью разностного метода показало, что за годы проведения опыта растениями использовано в большинстве вариантов менее половины внесенных фосфатов. Более высокой дозе соответствовал более низкий коэффициент (табл. 74). Баланс фосфора на удобренных вариантах складывался со значительным превышением доз внесения над выносом урожаями, и оставшаяся часть, которая не была усвоена растениями, оставаясь в почве, создает предпосылку для продолжения последствия внесенных фосфатов. Расчеты показали, что в случае неприменения фосфорсодержащих удобрений последствие может продлиться при дозе 300 кг/га P_2O_5 6 лет, при 600 кг/га – 9 лет и при 1200 кг/га – 22 года.

Проведенные ранее исследования показали, что изменение содержания подвижного фосфора находится в зависимости от складывающегося баланса питательных веществ, на основании которого нами разработана методика прогнозирования этих изменений.

Данная методика была использована для составления прогнозов в областях Центрального Федерального округа (Шафран, 2006). Более детальная разработка таких прогнозов вызывает определенные затруднения из-за отсутствия нормативно-справочной информации по ключевому показателю – величине выноса P_2O_5 , снижающего его содержание в различных почвах на 10 мг/кг. Кроме перечисленных выше показателей длительность последствия фосфорных удобрений, а, следовательно, и величина снижения содержания подвижного фосфора в почве при превышении его выноса над внесением зависят также от уровня содержания P_2O_5 . Согласно данным, получен-

ным в длительном полевом опыте ЦОС ВНИИА на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве (Кирпичников, Адрианов и др., 2004), величина выноса фосфора, которая снижает удельное содержание подвижного фосфора в почве, находилась в прямой зависимости от уровня обеспеченности P_2O_5 , определяемого методом Кирсанова. Корреляционное отношение составило 0,97 при 0,001% уровне значимости. Величины выноса представлены в таблице 77.

Таблица 77

Величины выноса фосфора (кг/га), снижающие его содержание в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве на 10 мг/кг

Содержание P_2O_5 в почве, мг/кг	Вынос фосфора, снижающий его содержание в почве на 10 мг/кг, кг/га P_2O_5
<25	1995
25–50	248
51–100	111
101–150	62
151–200	34

Известно, что в годы интенсивной химизации баланс фосфора в земледелии всех регионов России складывался положительно, то есть поступление в почву превышало его вынос урожаями. В связи с этим постепенно увеличивалось содержание подвижного фосфора в почвах. Наиболее интенсивно этот процесс происходил в тех зонах, где уровень применения удобрений был более высоким. Так, средневзвешенное содержание подвижного фосфора в пахотных почвах Московской области с 1971 по 1993 г. повышалось с 64 до 212 мг/кг почвы, в Краснодарском крае за этот же период – с 17 до 36 мг/кг почвы, которое было достигнуто в результате внесения сверх выноса соответственно 1540 и 507 кг/га фосфора за указанный период.

В настоящее время, когда применение фосфорных удобрений практически прекратилось, формирование урожаев происходит за счет ранее внесенных удобрений и это будет происходить до тех пор, пока содержание подвижного фосфора в почве не достигнет исходного уровня. Если сопоставить дозы фосфорных удобрений, внесенные в рассматриваемых нами опытах, со средними по Московской области и Краснодарскому краю за анализируемый период, видно, что последние значительно превалируют. По Московской области эти показатели различаются в 5 раз.

Следовательно, можно предположить, что последствие фосфорных удобрений в названных регионах будет продолжаться более длительное время (соответственно 70–100 и 25–28 лет) по сравнению с результатами, полученными в опытах. В подавляющем большинстве других регионов применение удобрений было не столь высоким, и, следовательно, накопление подвижного фосфора в почве там было менее выражено. Например, в Воронежской области содержание подвижного фосфора возросло с 75 до 109 мг, Орловской – с 69 до 102 и в Тамбовской – с 63 до 95 мг/кг почвы. Значит, последствие фосфорных удобрений здесь будет продол-

жено в течение более короткого периода. Тем не менее, с уверенностью можно сказать, что пока еще в Нечерноземной зоне, в Среднем Поволжье и на Северном Кавказе значительная часть урожая формируется за счет ранее внесенных фосфорных удобрений.

Если судить по представленным результатам длительных опытов, то видно, что доля участия последствия удобрений в формировании урожая достаточно высока. На дерново-подзолистых почвах она достигает 50%, на черноземе предкавказском – 40%. При этом в ряде случаев отмечали всплеск урожайности на шестой-седьмой годы. Этим можно объяснить получение высоких урожаев в 2002 и 2008 г., когда при благоприятных погодных условиях на фоне последствия фосфора высокий эффект дали азотные удобрения.

Однако высокий вынос питательных веществ ускоряет темпы уменьшения запасов питательных веществ в почве и наряду с этим изменится урожайность сельскохозяйственных культур, которая, несмотря на отдельные удачные годы, имеет четкую тенденцию к понижению.

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВ КАЛИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЯХ

Калий – один из основных элементов минерального питания растений – выполняет важные экологические и агрохимические функции в агроэкосистемах. Оптимальная обеспеченность пахотных почв калием является одним из обязательных условий высокой продуктивности выращиваемых на них культур и устойчивого функционирования агроценозов. Тем не менее, исследовательский интерес к режиму калия в агроценозах, в целом, традиционно невысок, притом, что использование калийных удобрений в отечественном земледелии находится на минимальном уровне.

В настоящее время резко сократилось внесение удобрений, в том числе и калийных. При постоянном отчуждении калия с урожаем и неполным возвратом элемента с удобрениями возрастает опасность развития деградиционных процессов в почвах сельскохозяйственных угодий, следствием чего является истощение запасов доступного калия для растений, наблюдаемое в разных земледельческих зонах страны. Тем не менее, оптимизации калийного состояния пахотных почв в отечественном земледелии уделяется наименьшее влияние. Такое отношение к регулированию калийного режима в агроценозах во многом обусловлено несовершенством существующей оценки плодородия почв в отношении калия.

Оценивать изменения калийного режима пахотных почв целесообразно по материалам многолетних экспериментов, что позволяет выявить действие различных приемов земледелия на содержание разных соединений калия в динамике в различных почвенно-климатических условиях. Только в многолетних стационарных опытах могут быть определены истинные возможности почв в обеспечении калием выращиваемых растений. Осуществляемое в таких исследованиях сопоставление данных о полученной урожайности культур и результатов агрохимических анализов почв позволяет установить реальные параметры калийной обеспеченности.

Однако анализ существующих в настоящее время результатов исследований калийного режима почв в длительных опытах показывает, что чаще всего оценка плодородия почв в отношении калия основана на определении абсолютного содержания в почве обменного калия с трактовкой результа-

тов анализа, полученных по определенному методу в рамках разработанных для него градаций. Такой подход мало эффективен, поскольку постоянное перераспределение ионов калия в системе твердая фаза почвы ↔ жидкая фаза почвы, а также разнородность сорбционных позиций и изменение процесса сорбции калия во времени и под воздействием удобрений не позволяет охарактеризовать систему соединений калия по одному какому-либо показателю.

В связи с постоянно возрастающей стоимостью калийных удобрений необходимо точное определение состояния калия в почве, поскольку это имеет не только теоретическое, но и экономическое значение. Существует более 150 методов извлечения калия из почвы. В.В. Прокошев и И.П. Дерюгин (2000 г.) ориентировочно разделили все методы на 5 групп по интенсивности извлечения калия из почвы:

- определение общего валового содержания калия в почве спеканием при высокой температуре или обработкой кислотами, разлагающими минеральную часть почвы, а также спектральными или изотопными методами;
- извлечение калия минеральных структур концентрированными растворами сильных кислот или их смесей;
- извлечение калия на основе реакций катионного обмена между катионами растворов солей и калием почвенного поглощающего комплекса;
- извлечение калия почвенного раствора и легкорастворимых соединений при обработке водой или очень слабыми солевыми растворами;
- извлечение калия многократной обработкой почвы слабыми солями и кислотами с получением и последующим анализом отдельных фракций для характеристики динамики подвижности калия в почве.

В настоящее время в России агрохимслужбой используются три вытяжки для извлечения калия: 0,2 М HCl на дерново-подзолистых почвах, 0,5 М CH₃COOH на серых лесных почвах и черноземах, 1% (NH₄)₂CO₃ на карбонатных почвах. Параллельно проводимыми полевыми опытами и аналитическими исследованиями для каждого метода были установлены предельные параметры, позволяющие разделить почвы по группам обеспеченности калием.

Первоначально для некарбонатных почв был рекомендован метод Масловой, в котором используется 1н уксуснокислый аммоний, извлекающий обменный калий. Для карбонатных почв был предложен метод Протасова (Мачигина). Заменены они были на применяемые в настоящее время методы, в связи с необходимостью использования одной вытяжки для извлечения фосфора и калия. Основанием для замены послужила установленная тесная корреляция между содержанием калия, извлекаемым методом Масловой с одной стороны и Кирсанова, Чирикова – с другой (Орлова, Прижуркова и др., 1974).

Содержание подвижного калия в почве, определяемое указанными методами, выделено в следующие группы (табл. 78).

Полевые опыты, проведенные в Географической сети опытов и Агрохимслужбе за последние годы, а также практика использования удобрений в производстве, показали необходимость совершенствования почвенной диагностики калийного питания растений.

Данные многочисленных опытов свидетельствуют о том, что содержание обменного калия в ряде случаев слабо коррелирует с урожайностью сельскохозяйственных культур и эффективностью калийных удобрений (Носов, Соколова и др., 1995; Никитина, 2012). Это свидетельствует о том, что сложная динамика форм калия затрудняет анализ состояния калия в почве только по содержанию подвижного калия это и вызывает необходимость совершенствования методики диагностики калийного состояния почв с привлечением дополнительных характеристик.

Таблица 78

Градации обеспеченности калием (мг на 1 кг почвы)

Обеспеченность	Метод определения			
	по Кирсанову	по Чирикову	по Масловой	по Мачигину
Очень низкая	<40	<20	<50	0–100
Низкая	41–80	21–40	51–100	101–200
Средняя	81–120	41–80	101–150	201–300
Повышенная	121–170	81–120	151–200	301–400
Высокая	171–250	121–180	201–300	401–600
Очень высокая	>250	>180	>300	>600

Обменный калий не является также надежным показателем, адекватно отражающим изменение плодородия почв во времени. Нередки случаи, когда при внесении невысоких доз удобрений и отрицательном балансе калия наблюдается увеличение содержания обменного калия, что обусловлено, по-видимому, мобилизацией природного почвенного калия под влиянием физиологической кислотности удобрений и биологическим накоплением калия растениями в связи с лучшим развитием их на удобренных вариантах и использованием калия подпахотного и ниже лежащих слоев почвы. Это обстоятельство создает иллюзию благополучия в отношении калийного режима почв при явном истощении почвенных запасов калия, участвующих в питании растений (табл. 79).

В длительных опытах, а также в практике Агрохимслужбы, отмечаются случаи возрастания эффективности калийных удобрений с течением времени в районах с отрицательным балансом калия, особенно в лесостепной и степной зонах при повышенном и даже высоком содержании калия в почве.

Все эти факты объясняются тем, что почвам свойственно, хотя и в разной степени, пополнять запасы обменного калия за счет других, менее растворимых форм. В нашей стране выделяются две формы калия, являющиеся ближайшим и отдаленным резервом обменного калия. Первый диагностируется с использованием вытяжки в 2н HCl (метод Пчелкина), второй – в 20% HCl (метод Гедройца). Эти две формы калия обеспечивают ту или иную степень стабильности обменного калия.

По данным таблиц 79, 80, 81 видно, что количество гидролизуемого калия (по Пчелкину) и необменного (по Гедройцу) закономерно увеличиваются от почв нечерноземной зоны к почвам лесостепи и степи, а в пределах зоны – с утяжелением механического состава почвы.

Таблица 79

**Содержание разных форм калия в дерново-подзолистых почвах
при длительном применении удобрений, мг К₂O на 100 г почвы**

Опытное учреждение	Глубина, см	Обменный калий (по Масловой)		Легкогидролизуемый калий (по Пчелкину)		Необменный калий (по Гедройцу)	
		контроль	NPK	контроль	NPK	контроль	NPK
1	2	3	4	5	6	7	8
Судогодская опытная станция	0–20	8,0	16,2	11,5	19,8	68	58
	20–40	5,9	7,3	18,9	20,7	74	71
	40–60	6,5	8,3	27,7	28,5	98	89
ВИУА	60–80	10,2	13,1	25,0	25,8	223	228
	80–100	15,5	16,0	20,0	19,9	262	266
ВНИИЛьна	0–20	5,1	23,4	7,9	18,6	43,5	40,5
	20–40	5,1	18,6	10,9	15,0	48,0	43,7
	40–60	5,9	8,1	35,6	35,0	96,0	90,0
	60–80	7,6	8,4	53,0	57,1	143,7	142,5
	80–100	6,6	7,9	60,0	62,1	137,0	143,0
Пермская с.-х. станция	0–20	10,1	14,1	17,4	27,9	109	109
	20–40	11,1	12,3	16,4	28,2	153	144
	40–60	16,3	16,4	20,7	32,1	251	272
НИИСХ Северо-Востока	0–20	14,2	20,0	37,0	54,0	158	171
	20–40	12,7	15,0	35,8	43,0	163	175
	40–60	11,4	12,9	30,1	37,0	160	175
	60–80	14,0	13,6	39,5	43,4	220	201
	80–100	12,6	16,2	37,4	44,8	183	187
ЦОС ВИУА	0–20	12,0	16,9	26,8	32,6	105	109
	20–40	13,2	15,0	30,5	33,6	161	166
	40–60	19,1	22,4	40,9	49,6	286	289
	60–80	19,7	25,4	44,3	44,6	294	296
	80–100	18,3	24,4	36,7	39,6	300	295
БелНИИПА	0–20	5,4	15,5	15,1	21,5	50,5	48,8
	20–40	5,85	17,2	19,2	21,1	67,7	63,7
	40–60	6,8	12,3	32,0	33,5	101,7	98,5
	60–80	6,1	8,6	32,7	32,0	97,4	98,0
	80–100	5,6	6,5	31,4	31,7	80,0	76,4

Таблица 80

**Содержание различных форм калия в серых лесных почвах при длительном
применении удобрений, мг К₂O на 100 г почвы**

Опытное учреждение	Глубина, см	Обменный калий (по Масловой)		Легкогидролизуемый калий (по Пчелкину)		Необменный калий (по Гедройцу)	
		контроль	NPK	контроль	NPK	контроль	NPK
1	2	3	4	5	6	7	8
Владимирская с.-х. станция	0–25	13,7	16,1	57	59	195	201
	25–40	13,8	15,6	57	62	211	214
	40–60	16,1	17,0	61	61	260	273
	60–80	18,2	17,9	67	66	289	302
	80–100	18,5	18,4	65	70	307	309
УкрНИИЗ, ОПХ «Чабаны»	0–25	6,2	8,4	29,8	34,1	98	100
	25–40	6,8	7,5	34,2	35,0	113	112
	40–60	9,0	9,0	42,0	41,5	168	167
	60–80	9,5	10,0	38,5	39,5	169	171
	80–100	8,9	9,2	39,1	41,3	168	165

Таблица 81

**Содержание различных форм калия в выщелоченных черноземах
при длительном применении удобрений, мг К₂О на 100 г почвы**

Опытное учреждение	Глубина, см	Обменный калий (по Масловой)		Легкогидролизуемый калий (по Пчелкину)		Необменный калий (по Гедройцу)	
		контроль	НPK	контроль	НPK	контроль	НPK
1	2	3	4	5	6	7	8
Мордовская с.-х. опытная станция	0–30	19,4	21,5	91	91	373	388
	30–40	17,8	20,0	92	90	391	393
	40–60	20,6	20,6	89	89	386	385
Кубанский СХИ	0–30	33,3	37,3	112	117	452	505
	30–40	32,1	31,9	106	114	488	481
	40–60	30,5	30,9	107	108	498	493
Алтайский НИИЗИС	0–25	30,4	32,8	119	125	319	321
	25–40	25,5	26,5	101	96	342	346
	40–60	18,4	18,6	83	79	356	373
Красноярский НИИСХ	0–25	30,2	32,1	88	98	329	343
	25–40	30,5	29,9	88	88	326	334
	40–60	26,4	26,6	69	75	307	301
УкрНИИРСГ	0–30	24,4	27,5	68	73	356	361
	30–40	22,4	27,6	64	76	337	346
	40–60	22,0	22,1	83	81	377	347
Черкасская с.-х. опытная станция	0–30	12,0	13,6	52	56	221	231
	30–40	12,0	13,6	52	56	215	221
	40–60	13,0	12,8	53	53	236	221

В дерново-подзолистых супесчаных почвах сумма обменного и гидролизуемого калия составляет 19,5 мг/100г, в суглинистых 27,5–51 мг/100 г, в черноземах и каштановых почвах достигает 150 мг/100 г, при этом доля гидролизуемого калия возрастает от 58 до 80%.

Характер накопления различных форм калия в разных типах почв неодинаков. Почвенно-климатические условия являются вторым важным фактором, который определяет превращение в почве вносимого с удобрениями калия.

В дерново-подзолистых почвах под влиянием удобрений наблюдается увеличение подвижных форм калия. К ним можно отнести водорастворимый, обменный и часть необменного калия, который В.У. Пчелкин (1966) называет легкогидролизуемой фракцией. В условиях глубокого промачивания дерново-подзолистых почв при промывном водном режиме и хорошей растворимости калийных солей происходит перемещение калия вниз по профилю и накопление подвижных форм его не только в пахотном, но и в более глубоких слоях почвы (табл. 79).

Повышение содержания этих форм калия происходит как при положительном, так и при отрицательном балансе данного элемента в опытах. Количество обменного калия в пахотном слое при этом достигает значительных величин – 15–20 мг К₂О на 100 г почвы, что соответствует высокой обеспеченности почв калием.

Таблица 82

Баланс и изменение содержания обменного калия

Учрежд.	Почва	Вар. опыта	Внес. калия, кг/га	Вынос калия, кг/га	Разница + -	Исх. сод., мг/100 г	Кон. сод., мг/100 г	Прирост (+), убыль (-) K ₂ O, мг/100 г
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Новозыбковский филиал ВИУА	Дерново-подзол. песчаная	Контроль NPK NPK + навоз	- 60 300	134 174 254	-134 -114 +46	3,8 3,8 3,8	2,0 1,6 2,2	-1,8 -2,2 -1,6
Судогодская опытная станция ВНИИ льна	Дерново-подзол. супесч.	Контроль NPK 2NPK	- 480 960	469 626 714	-469 -146 +245	8,7 8,7 8,7	10,0 10,8 16,4	+0,3 +2,1 +7,7
ЦОС ВИУА	Дерново-подзол. суглин.	Контроль NPK	- 630	202 439	-202 +191	6,0 6,0	6,4 13,6	+0,4 +7,6
Рязанская опытная станция	Дерново-подзол. тяжело-суглин.	Контроль NPK	- 600	420 533	-420 +67	13,7 13,7	13,6 16,6	-0,1 +2,9
Тамбовская опытная станция	Серая лесная тяжело-суглин.	Контроль NPK	- 960	295 836	-295 +124	11,0 11,0	10,9 13,4	-0,1 +2,4
Мордовская опытная станция	Чернозем типичный глинистый	Контроль NPK	- 620	884 1176	-884 -558	29,7 29,7	26,9 29,3	-0,8 -0,1
Краснодарская опытная станция	Чернозем выщелоч. тяжело-суглин.	Контроль NPK	- 270	400 540	-400 -270	13,5 13,5	13,5 14,4	-0,1 +0,9
Донецкой СХИ	Лугово-чернозем.	Контроль NPK	- 540	712 955	-712 -415	31,2 31,2	30,1 32,0	-1,1 +0,8
Сибирский НИИСХ	Чернозем мицелиарно-карбонатный	Контроль NPK	- 150	477 519	-477 -369	31,7 31,7	32,6 34,2	+0,9 +2,5
	Чернозем выщелоч. тяжело-суглин.	Контроль NPK	- 40	393 515	-393 -475	56 56	38,0 36,0	-18 -20

Наряду с этим происходит увеличение степени подвижности обменного калия в удобренных вариантах.

Применение удобрений на легких почвах (Судогодская опытная станция ВИУА, БелНИИПА, ВНИИ льна) сопровождается уменьшением количества необменного калия в почве. Фиксация калия почвой не происходит даже при положительном балансе данного элемента. Мобилизация необменного калия под влиянием удобрений обеспечивает питание растений и увеличение содержания подвижных форм калия в почве. Изменение запасов всех форм калия в метровом слое (баланс калия по результатам анализа почвы) хорошо согласуется с расчетным балансом этого элемента в опыте (табл. 82).

На тяжелых почвах (ЦОС ВИУА, НИИСХ Северо-Востока), богатых илистой фракцией, количество удобрений, обеспечивающее положительный баланс калия в опыте, приводит в необменному поглощению калия глинистыми минералами и увеличению этой формы калия в почве. Одновременно происходит мобилизация природного калия под влиянием удобрений и перенос его в пахотный слой из нижних горизонтов корнями растений, о чем свидетельствует существенное превышение запасов калия над остаточным (от удобрений) его количеством, например в опыте ЦОС ВИУА (табл. 82).

В серых лесных почвах возрастает и степень подвижности обменного калия, что выражается в увеличении его концентрации в слабосолевой вытяжке на удобренных вариантах. Но процесс этот выражен слабее, чем в дерново-подзолистых почвах (табл. 80).

В связи с недостаточным увлажнением в зоне распространения серых лесных почв изменения калийного режима наблюдаются в подпахотном и более глубоких слоях почвы.

Изучение взаимодействия удобрений с выщелоченными черноземами показало, что систематическое внесение органических и минеральных удобрений на этих почвах не приводит к существенному увеличению содержания подвижных форм калия даже при положительном балансе. Связано это с высокой насыщенностью поглощающего комплекса черноземов двухвалентными основаниями, препятствующими поглощению калия. Неустойчивый водный режим в черноземной зоне не создает условий для вымывания калия в нижние горизонты. Исключительно благоприятные условия для фиксации калия в черноземах способствуют необменному поглощению калия в пахотном и подпахотном слоях при положительном балансе. Фиксация калия из удобрений при этом существенно превосходит накопление его подвижных форм (табл. 81, 83).

При отрицательном балансе на удобренных вариантах увеличение обменного калия связано с мобилизацией менее подвижных форм калия под влиянием удобрений и растений. По-видимому, высвобождается калий вторичных минералов – гидрослюд, не учтенный анализами.

При анализе содержания различных форм калия по профилю черноземов обнаружена большая пестрота, вызванная, вероятно, различной глубиной залегания горизонтов, включающих свободные карбонаты, которые мешают точно определить закономерностей в превращении различных форм калия.

Таблица 83

Степень подвижности калия зональных почв и ее изменение под влиянием калийных удобрений

Учреждение	Почва	Варианты опыта	Содержание калия, мг на 100 г	
			обменного	степень подвижности
Судогодская опытная станция	Дерново-подзолистая супесчаная	Контроль NPK	8,0	1,3
			10,5	2,2
ВНИИ льна	Дерново-подзолистая легкосуглинистая	Контроль NPK NPK+навоз	6,4	1,6
			13,6	6,0
			20,2	6,6
ЦОС ВИУА	Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая	Контроль NPK	12,0	1,0
			15,4	1,7
Владимирская опытная станция	Серая лесная тяжелосуглинистая	Контроль NPK	17,8	0,7
			21,2	0,8
Орловская опытная станция	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	Контроль NPK NPK+навоз	18,0	1,5
			18,1	1,6
			18,8	1,7
Мордовская опытная станция	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	Контроль NPK	19,4	1,2
			21,5	1,6
Кубанский СХИ	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	Контроль NPK	33,3	1,1
			37,2	1,2
Оренбургский НИИСХ	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	Контроль NPK	20,2	0,9
			22,7	1,0
Волжский НИОЗ	Каштановая тяжелосуглинистая орошаемая	Контроль NPK	27,5	0,9
			30,1	1,4

Калийный режим почв зависит не только от запасов обменного и резервного калия, но и от степени их подвижности, которая может характеризоваться содержанием этого элемента в слабосолевой вытяжке. В результате исследований (Пчелкин, 1966; Шапошникова, Листопадов и др., 1983; Проценко, Шустрова, 1996) установлено, что подвижность обменного калия в почвах нечерноземной зоны в 2–3 раза выше, чем в почвах черноземной и сухостепной зон (табл. 83). В почвах нечерноземной зоны выявляется тесная связь между содержанием обменного калия и степенью его подвижности ($r=0,7-0,8$). В черноземных почвах связь практически отсутствует.

Установлено также, что при уравновешенном или слабоотрицательном балансе повышается степень подвижности калия. В нечерноземной зоне это привело к существенному улучшению калийного режима почв за счет повышения запасов калия в почве и увеличения его подвижности.

При отрицательном балансе увеличение содержания обменного калия, как это наблюдается в почвах черноземной зоны, не улучшает условий калийного питания растений, вследствие истощения запасов резервного калия и снижения подвижности обменного и гидролизующегося

калия (Янишевский, Прокошев и др., 1983; Косолапова, 1990; Проценко, Шустрова, 1996).

Именно из-за низкой скорости перехода гидролизуемого калия в обменный к концу вегетационного периода в почве наблюдается снижение содержания обменного калия, хотя к весне его запасы практически восстанавливаются.

Степень подвижности калия изменяется в зависимости от механического состава почв, рН, емкости поглощающего комплекса, степени насыщенности его основаниями.

В.Г. Минеевым (1999) на базе длительного стационарного опыта приведены исследования по оценке калийного режима дерново-подзолистой почвы с определением не только форм калия в почве, но и термодинамических показателей его состояния, обуславливающих равновесие между формами калия в почве. Динамическое равновесие форм калия в почве не позволяет по обменной или необменной формам объективно оценить степень обеспеченности растений этим элементом, поэтому исследователи предложили исходить из физико-химической взаимосвязи между формами калия в почве. Ими были определены – калийный потенциал, отношение активностей K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , характеризующих количество калия, переходящего из раствора в почвенный поглощающий комплекс и обратно, а также потенциальную буферную способность, то есть способность поддерживать калийный потенциал на определенном уровне независимо от выноса растениями калия или дополнительного внесения его с удобрениями.

Показано, что минеральные удобрения резко повышали обеспеченность почв калием и снижали калийный потенциал.

Потенциальная буферная способность через 25 лет применения удобрений возрастала, известкование также повышало этот показатель на 4–5 мг-экв на 100 г почвы.

Применение удобрений в сочетании с известкованием несколько повышало калийный потенциал и потенциальную буферную способность, однако, доступная растениям часть калия и факторы интенсивности снижались. Навоз повышал калийный потенциал почвы. Минеральные удобрения с участием калия в сочетании с известкованием и применением навоза заметно снижали калийный потенциал почвы, потенциальная буферная способность почвы в отношении калия возрастала.

Наличие высокой величины потенциальной буферной способности позволяет почвам пополнять используемый растениями доступный калий при достижении определенного минерального уровня за счет запасов резервного необменного калия. При низком уровне потенциальной буферной способности такой способностью почвы не обладают, поэтому во избежание калийного голодания необходимо своевременно вносить калийные удобрения. Авторы делают вывод, что термодинамические показатели калийного режима почвы в дополнение к формам калия позволяют наиболее объективно оценить калийный режим почвы. По этим показателям важно разработать дифференцированные индексы, характеризующие калийный режим конкретной почвы и коррелирующие с эф-

фективностью калийных удобрений и продуктивностью сельскохозяйственных культур.

В Белоруссии в качестве обязательного дополнительного теста калийного режима рекомендован, предложенный Н.О. Авакьяном (1981), показатель насыщенности поглощающего комплекса калием, выраженный в процентах от емкости обмена.

Значительные запасы калия в почвах и динамическое равновесие между различными его формами затрудняют выбор показателей, характеризующих способность почвы обеспечивать калийное питание растений. Рано или поздно, прямо или косвенно в процесс питания растений вовлекаются все формы почвенного калия. Поэтому при характеристике плодородия почв по обеспеченности их калием нужно учитывать не только легкоподвижные формы элемента, какими являются калий почвенного раствора и обменный, но и необменный калий первичных и глинистых минералов, служащих резервом пополнения обменного калия в почве, а также степень подвижности обменного калия, способность и скорость восстановления его из резервных форм. Однако надежных критериев для оценки эффекта от калия пока нет.

В практике сельского хозяйства основным показателем обеспеченности растений калием принято считать содержание обменного калия в почве. Но данные ряда длительных опытов показывают, что при примерно одинаковом и невысоком содержании обменного калия можно получить очень большие прибавки урожая от внесения калийных удобрений, а в других условиях калийные удобрения оказываются неэффективными.

Для прогноза эффективности калийных удобрений в зависимости от уровня обеспеченности почвы калием более всего пригодны опыты, в которых был бы предусмотрен учет последствий накопленного в почве калия. Однако такие опыты практически отсутствуют.

По нашему мнению, для полной характеристики способности почв обеспечивать растения калием, наряду с определением обменного калия в почвах, при агрохимических обследованиях их необходимо определять также степень его подвижности и содержание ближнего резерва обменного калия по Пчелкину.

При этом определение степени подвижности калия может проводиться в вытяжке, используемой для тестирования подвижности фосфора (0,02 н CaCl_2 1:5) (Похлебкина, Игнатов, 1984).

В ближайшие годы необходимо провести опытные исследования в первую очередь для определения связи между степенью подвижности калия и эффективностью калийных удобрений, затем при выборе метода определения ближнего резерва обменного калия и для его оценки. При получении соответствующих данных градации должны предусматривать комбинационные группировки: на нескольких уровнях содержания обменного калия строят 2–3 градации по его подвижности.

Учитывая различную требовательность сельскохозяйственных культур к условиям минерального питания градации должны разрабатываться с учетом наиболее распространенных и требовательных культур, а также по группам требовательности.

Характеристика пахотных почв основных природно-сельскохозяйственных зон и провинций по содержанию подвижного калия

Подвижным калием пахотные почвы в целом по Российской Федерации обеспечены значительно лучше, чем фосфором. Более 50,0% обследованной площади пахотных земель имеют повышенное (27,8%) и высокое (25,4%) содержание калия. Доля пашни с очень высоким содержанием подвижного калия составляет 15,3%, с очень низким и низким всего лишь 9,8%, со средним – 21,7%. (рис. 23).

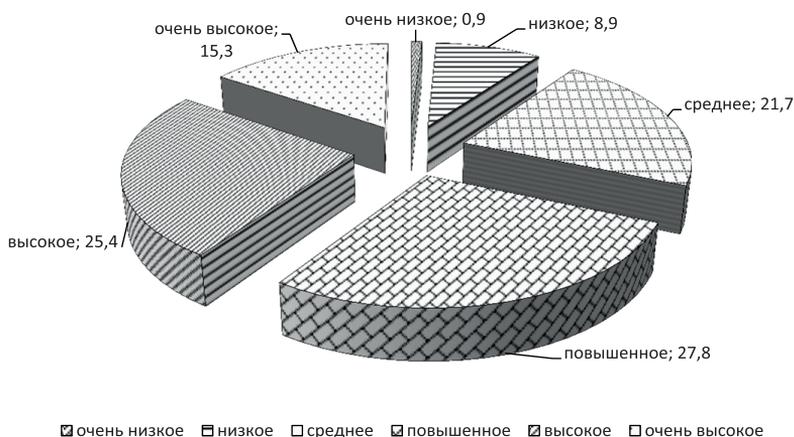


Рис. 23. Распределение пахотных почв Российской Федерации с различным содержанием обменного калия на 01.01.2007 г. (%)

Пахотные почвы основных природно-сельскохозяйственных зон и провинций Российской Федерации характеризуются более высокой обеспеченностью подвижным калием и большей изменчивостью по зонам в сравнении с фосфором. Менее обеспечены калием пахотные почвы северных регионов Европейской части России. В среднетаежной и южнотаежно-лесной зонах преобладают пахотные почвы со средним содержанием обменного калия. Доля пашни с очень высоким содержанием калия менее 5,0% (табл. 84).

Следует отметить, что с продвижением на юг обеспеченность пахотных почв подвижным калием возрастает. В первую очередь это связано с изменением климатических условий. Более 70,0% пахотных почв Лесостепной, Степной, Сухостепной, Полупустынной зон характеризуется повышенным и высоким содержанием калия.

В Среднетаежной зоне подзолистых (типичных) и мерзлотно-таежных почв преобладают пахотные почвы со средним и повышенным содержанием калия (55,4%). Доля пашни с высоким и очень высоким содержанием калия составляет 25,4%. Это в основном пахотные земли Архангельской, Вологодской и Кировской областей. На долю пашни с очень низким и низким содержанием калия в этой зоне приходится 19,2%.

Таблица 84

**Характеристика пахотных почв природно-сельскохозяйственных зон
по содержанию подвижного калия**

Зона	Обследованная площадь, тыс. га	Группировка почв с различным содержанием калия					
		очень низкое	низкое	среднее	повышенное	высокое	очень высокое
Среднетаежная	767,3	16,3	131,7	254,6	170,3	160,2	34,2
		2,1%	17,1%	33,2%	22,2%	20,9%	4,5%
Южнотаежно-лесная	17596,0	701,3	4747,5	5767,3	3896,2	1978,8	504,9
		4,0%	27,0%	32,8%	22,1%	11,2%	2,9%
Лесостепная	42105,7	185,5	2706,2	9436,9	12568,5	105558,3	6650,3
		0,4%	6,4%	22,5%	29,8%	25,1%	15,8%
Степная	31116,7	41,6	1058,0	4971,8	9214,4	8916,3	6914,6
		0,1%	3,4%	16,0%	29,6%	28,7%	22,2%
Сухостепная	9369,8	46,2	314,6	1280,9	2683,5	3398,1	1646,5
		0,5%	3,3%	13,7%	28,6%	36,3%	17,6%
Полупустынная	1352,4	13,7	19,9	72,0	341,1	610,9	294,8
		1,0%	1,5	5,3%	25,2%	45,2%	21,8%
Пустынная	163,7	8,1	74,2	55,7	16,4	8,8	0,5
		5,0%	45,3%	34,0%	10,0%	5,4%	0,3%
Уральская горная обл.	657,0	0,8	18,9	86,5	133,0	208,1	209,7
		0,1%	2,9%	13,2%	20,2%	31,7%	31,9%
Южносибирская горная обл.	1537,7	12,3	171,5	396,5	483,4	364,0	110,0
		0,8%	11,1%	25,8%	31,4%	23,7%	7,2%
Кавказско-Крымская горн. обл.	465,6	29,6	71,9	150,2	102,2	71,9	39,8
		6,4%	15,4%	32,3%	22,0%	15,4%	5,5%

Пахотные почвы Южнотаежно-лесной зоны дерново-подзолистых почв также характеризуются средним и повышенным содержанием подвижного калия (54,9%). Площадь почв с очень низким и низким содержанием калия составляет 31,0%, а с очень высоким содержанием калия – менее 3,0%. Около 60,0% пашни этой зоны, характеризующиеся очень низким и низким содержанием калия, расположены в северной части Центрального федерального округа.

Наименее обеспечены обменным калием пахотные почвы Прибалтийской, Среднерусской и Западно-Сибирской провинций, где преобладают почвы с низким (28,9–34,5%) и средним (25,6–34,6%) содержанием калия (рис. 24).

Более обеспечена калием пашня Восточной Сибири и Дальнего Востока. В Среднесибирской и Дальневосточной провинциях доля пашни с низким содержанием обменного калия не превышает 20%. В этом регионе преобладают пахотные земли со средним и повышенным содержанием калия (более 58%).

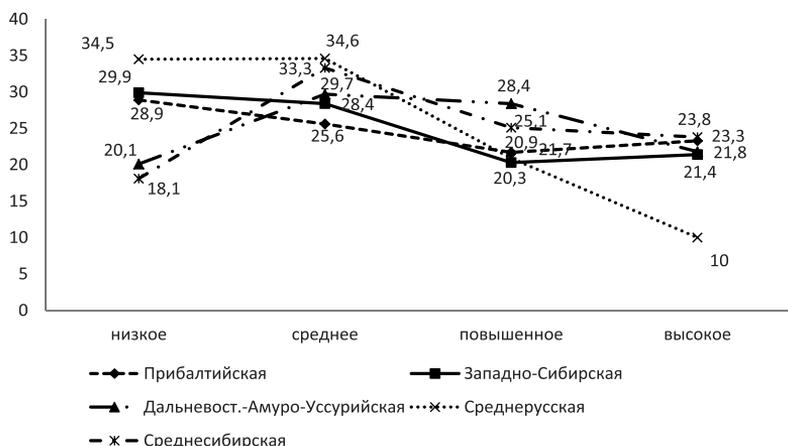


Рис. 24. Содержание подвижного калия в пахотных почвах провинций южнотаежно-лесной зоны (%)

В Лесостепной зоне серых лесных почв, оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов 70,8% пашни имеют высокое содержание калия, 22,4% – среднее и только 6,8% – очень низкое и низкое содержание. Выделяются Западно-Сибирская и Северопредалтайская провинции, где пахотные почвы с высоким содержанием калия занимают значительные площади (соответственно 68,3 и 51,8%), а с низким содержанием калия – 2,4 и 1,5%. Западно-Сибирская провинция представлена в основном Уральским федеральным округом, а также частично Новосибирской и Омской областями. В Северопредалтайскую провинцию входит большая часть Томской области, часть Новосибирской области и северная часть Алтайского края.

В других провинциях этой зоны доля пахотных почв с высоким содержанием калия не высока и колеблется в пределах от 27,5% в Среднерусской провинции до 39,3% в Среднесибирской (рис. 25).

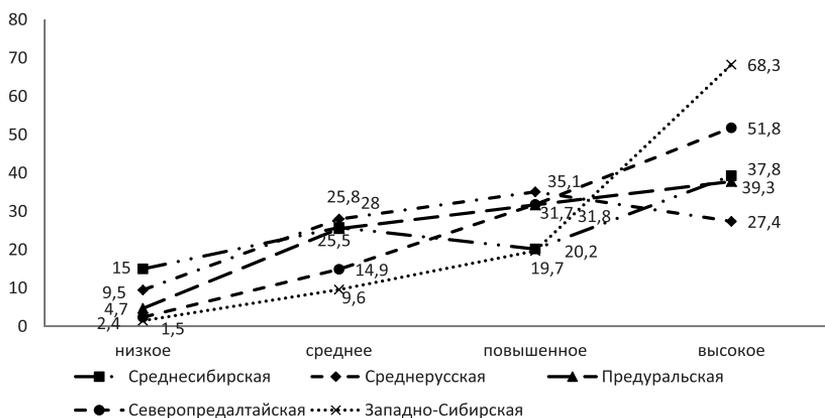


Рис. 25. Содержание подвижного калия в пахотных почвах провинций лесостепной зоны (%)

В Среднесибирской провинции выявлена наибольшая доля пашни с низким содержанием обменного калия (15,0%).

Пахотные почвы степной зоны обыкновенных и южных черноземов также характеризуются высокой обеспеченностью калием. Доля пашни с повышенным и высоким содержанием подвижного калия составляет 80,5%, со средним содержанием – 16,0%, а с низким содержанием калия всего лишь 3,5%. Наиболее обеспечены подвижным калием в этой зоне пахотные почвы Казахстанской провинции, где 90,9% пашни с высоким содержанием калия, а со средним содержанием – 1,3% и практически нет почв с низким содержанием калия. В эту провинцию входит большая часть пахотных земель Омской и Челябинской областей, а также часть Оренбургской и Новосибирской (рис. 26).

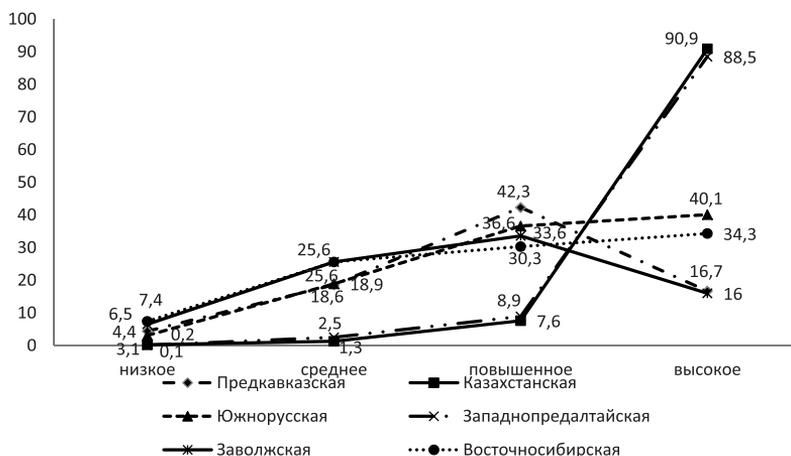


Рис. 26. Содержание подвижного калия в пахотных почвах провинций степной зоны (%)

Высокой обеспеченностью калием характеризуются также пахотные почвы Западнопредалтайской степной провинции, которую представляет Алтайский край, где 88,6% пашни с высоким содержанием калия. В других провинциях степной зоны площадь пашни с высоким содержанием калия составляет 34,3–40,1%, а с низким содержанием – 3,1–7,4%.

В сухостепной зоне темно-каштановых и каштановых почв из 9369,8 тыс. га обследованной площади пахотных земель 82,5% пашни имеют высокое содержание калия. Наиболее обеспечены калием пахотные почвы Казахстанской сухостепной провинции, где 98,8% пашни с высоким содержанием калия. В основном это пахотные почвы юга Алтайского края, 99,0% которых характеризуются высоким и очень высоким содержанием калия.

Пахотные почвы Манычско-Донской и Заволжской сухостепной провинций характеризуются повышенным и высоким содержанием подвижного калия (соответственно 67,1 и 75,5%). Доля пашни с очень высоким содержанием калия составляет 6,2 и 12,0%.

В полупустынной зоне светло-каштановых и бурых почв также распространены пахотные почвы с высоким содержанием подвижного калия

(92,2%), площадь пашни с низким содержанием калия составляет только 2,5%.

В зоне Уральской горной области обследовано 657,0 тыс. га пахотных земель, из которых 83,8% характеризуются высоким содержанием подвижного калия, с низким содержанием калия – 3,0%.

В Южно-Сибирской горной области, из обследованных 1537,7 тыс. га пахотных земель, доля пашни с высоким содержанием калия составляет 62,3%, со средним содержанием – 25,8%, с низким – 11,9%.

Пахотные почвы Кавказско-Крымской области менее обеспечены подвижным калием. Из 465,6 тыс. га обследованной пашни только 45,9% площадей имеют высокое содержание калия. Доля пахотных почв со средним содержанием калия составляет 32,3%, с низким содержанием – 21,8%.

При сравнении средневзвешенных содержания подвижных форм калия в пахотных почвах основных земледельческих зон показало, что обеспеченность калием в северных зонах меньше, чем в степной, сухостепной и полупустынной.

Оптимальное содержание калия в почве

Важнейшим свойством любой почвы, определяющим способность удерживать катионы в обменной форме, является емкость катионного обмена (ЕКО). Величина ЕКО меняется в очень широких пределах – от 2–3 для песчаных минеральных почв до 40–50 мг-экв/100 г для тяжелосуглинистых черноземов. Без учета величины и специфики ЕКО невозможно разобраться с режимом калия в почве.

Во многих европейских странах устанавливается величина оптимального содержания калия в почве в зависимости от ЕКО как показателя, гарантирующего высокие урожаи высокого качества.

Для почв России (Шаймухаметов, Травникова, 1997), детально изучив режим калия в почвах, установили четкую зависимость доли оптимального содержания обменного калия от емкости катионного обмена. Чем легче почва и меньше ЕКО, тем выше должна быть относительная величина оптимума калия обменного (табл. 85).

Таблица 85

Оптимальные показатели содержания обменного калия и степени насыщенности калием почв различного гранулометрического состава

Почвы	опт $K_{обм}$	
	мг $K_2O/100$ г	% от ЕКО
Песчаные	14–16	5,0–10,0
Супесчаные	16–19	3,0–5,0
Суглинистые	19–22	1,8–3,0
Тяжелосуглинистые и глинистые	22–25	1,2–1,8

Следует считать, что при этих расчетных показателях получение любых урожаев сельскохозяйственных культур не будет сдерживаться за счет калийного питания растений. При этом внесение калийных удобрений рас-

смачивается как прием, поддерживающий необходимый уровень калия в почве. Как правило, доза калия в условиях интенсивного земледелия должна соответствовать выносу калия с поля сельскохозяйственной продукцией (основной и побочной) при величине $K_{обм}$, близкой к оптимальной. Это видно на примере развитых стран Европы, где на плодородных почвах дозы калийных удобрений, являясь «поддерживающими», практически не меняются.

Для практических целей расчет ориентировочного оптимального содержания обменного калия было предложено проводить по уравнению (Прокошев, Дерюгин, 2000):

$$\text{опт. } K_{обм}, \text{ мг/кг} = 100 + 2,5 \text{ ЕКО.}$$

В этом случае для песчаных почв с ЕКО 5 мг-экв/100 г почвы величина опт. $K_{обм}$ составит 122 мг/кг почвы, а для тяжелых почв с ЕКО 20 мг-экв/100 г почвы – 160 мг/кг почвы.

Контрольные цифры по оптимуму не только калия, но и фосфора должны существовать и учитываться в сельскохозяйственном производстве.

С целью получения устойчивых урожаев в Республике Беларусь еще в 90-е годы прошлого столетия при внесении удобрений учитывалась информация по оптимальному содержанию питательных веществ в почве. На основании большого экспериментального материала для дерново-подзолистых почв республики были установлены следующие оптимальные уровни содержания подвижного калия (по Кирсанову): на суглинистых почвах – 22–25, супесчаных – 20–29 и песчаных – 18–20 мг K_2O /100 г почвы. Расчеты выполнены на урожай зерна 4,5–5,5 т/га. Предполагалось, что потребление калия из почвенных запасов может достигать за период вегетации 180–200 кг K_2O с 1 га (Кулаковская, 1990).

Имеются и другие суждения (табл. 86)

Таблица 86

Почва	Культура	Оптимальное значение K_2O , мг/кг	Автор
Дерново-подзолистая супесчаная почва Полесья	зерновые	100–200	Кунцевич И.А., 1987
Дерново-подзолистая легкий суглинок экспериментальная база «Жодино»	зерновые картофель многолетние травы	130	Соболевский В.Н., 1988
Дерново-подзолистая легкий суглинок Северо-Западная зона, Россия	зерновые картофель	150	Поляков В.А., 1989
	многолетние травы зерновые картофель	120–150 200	Небольсин А.Н., 1991
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	севооборот	120–130	Прудников В.А., 2015

В практике земледелия трудно достигнуть расчетных уровней оптимального содержания калия в почве, поскольку существует множество различных факторов, которые не всегда можно учесть.

Однако основным критерием оценки оптимума содержания его в почве является такой уровень, который обеспечивает получение высоких урожаев при хорошем качестве продукции растениеводства, а вносимые калийные удобрения на такой почве неэффективны (Cooke, 1984; Csatho, 1998).

Оптимальные показатели содержания всех элементов питания необходимо постоянно уточнять с учетом биологических особенностей возделываемых культур, их урожайности и почвенно-климатических условий.

Эффективность калийных удобрений в зависимости от обеспеченности почв калием

Сокращение применения удобрений в стране, в том числе калийных, привело к тому, что формирование урожая сельскохозяйственных культур за последние 20 лет происходит в основном за счет естественного плодородия почв и запасов питательных веществ, созданных предшествующей удобренностью (Кудеяров, Семенов, 2014). Исследованиями в длительных опытах, проведенных в различных почвенно-климатических зонах страны, установлено, что при постоянном выносе калия урожаем сельскохозяйственных культур, при дефицитном балансе в почвах агроценозов наблюдалось как снижение содержания обменного калия (Лукин, 2012; Никитина, 2012), так и увеличение его количества или сохранение на уровне, близком к исходному (Жукова, Никитина, 1986; Хлыстовский, 1992; Конончук, Никитина, 2002; Никитина, 2017). Известно, что в почве все время идут два противоположно направленных процесса – трансформация необменных форм калия в обменную (мобилизация калия) и переход обменной формы в необменную (фиксация калия) (Медведева, 1983). Когда при дефицитном балансе содержание обменного калия в течение вегетации не изменяется, повышается или снижается, наблюдается превалирование процесса мобилизации над фиксацией, то есть растения полностью удовлетворяют свои потребности в этом элементе питания за счет необменных форм. Участие необменного калия в питании растений установлено К.К. Гедройцем (1955) и подтверждено работами ряда исследователей в последующие годы (Медведева, 1983; Хлыстовский, 1992; Конончук, Никитина, 2002).

По данным Л.И. Кораблевой и Л.Д. Слуцкой (1978) в вариантах без внесения удобрений на долю мобилизованного необменного калия приходится от 60 до 100% выноса элемента растениями.

Исследования, проведенные в длительных полевых опытах в различных почвенно-климатических зонах, свидетельствуют о необходимости оценки условий калийного питания растений при длительном сельскохозяйственном использовании почв без удобрений по содержанию в них как обменного, так и необменного калия.

Результаты исследований, представленные в таблице 87, показывают, что трансформация калия в почвах агроценозов определялась проявлением процессов потребления калия растениями и перехода его из необменного состояния в обменное (мобилизация).

Таблица 87

**Вынос калия с урожаем и изменение его форм в почвах агроценозов
без применения удобрений**

Вариант	Среднегод. прод-сть сев-та, ц з.е./га	Вынос калия, кг/га		Изменение кол-ва $K_2O_{обм}$ в почве, кг/га		Использовано из необменных форм, кг/га	
		всего	в среднем в год	всего	в среднем в год	всего	в среднем в год
Дерново-подзолистая супесчаная почва (ВНИИОУ, 16 лет)							
Абсолютный контроль	23,4	817	51,1	-51	3,2	766	47,9/94*
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая (ЦОС ВНИИА, опыт СШ-8, 14 лет)							
Абсолютный контроль	28,6	881	63,0	-18,0	1,30	863	61,6/98
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая (ЦОС ВНИИА, опыт СШ-5, 28 лет)							
Абсолютный контроль	20,5	1209	43,1	-102	3,6	1107	39,5/92
Серая лесная среднесуглинистая (Владимирский НИИСХ, 7 лет)							
Абсолютный контроль	28,6	473	67,6	-53	7,6	420	60,0/89
Чернозем выщелоченный (Кубанский СХИ, 8 лет)							
Абсолютный контроль	45,0	839	105	-76	-9,5	763	95,0/91,0
Чернозем выщелоченный (бывшая Мордовская оп. ст., 7 лет)							
Абсолютный контроль	28,9	400	57	-4,0	-0,6	396	57/99,0
Чернозем карбонатный (Кишиневский СХИ, 10 лет)							
Абсолютный контроль	31,7	988	98,8	-195	19,5	793	79,3/80,2
Светло-каштановая (Всероссийский НИИ орошаемого земледелия, 6 лет)							
Абсолютный контроль	46,2	1168	195	-18	-3,0	1150	144/98
Светло-каштановая тяжелосуглинистая (бывшая Мало-Узенская оп. ст. ВИУА, 12 лет)							
Абсолютный контроль	55,0	1380	115	+178	+14,8	1670**	139/107

Примечание: *Потребление растениями необменного калия, % от общего выноса его растениями.

**В данном опыте количество калия, использованного из необменных форм, определено аналитически с применением методов Пчелкина (2М НСl) и Гедройца (10%-я НСl при кипячении), а не расчетным методом до закладки опытов дерново-подзолистые почвы разного гранулометрического состава и серая лесная, согласно грациям метода Масловой, характеризовались средней степенью обеспеченности обменным калием (100–148 мг/кг почвы).

Сравнение выноса калия и динамики изменения содержания обменного калия в исследуемых почвах показало, что при длительном отсутствии применения удобрений происходило снижение содержания $K_2O_{обм}$, причем вынос K_2O с урожаем существенно превышал убыль обменного калия из почвы. За 7–28 лет в севооборотах с уровнем продуктивности 20,5–28,6 ц з.е./га

вынос калия составил 473–1209 кг/га, при этом содержание $K_2O_{\text{обм}}$ в пахотном слое почв уменьшилось на 18–102 кг/га. Следовательно, при длительном сельскохозяйственном использовании почв без применения удобрений формирование урожая в значительной степени происходило за счет потребления растениями необменного калия. Ежегодно в дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава и серой лесной почве при длительном дефицитном балансе этого элемента в агроценозах использовалось дополнительно из почвенных запасов супесчаной почвы 47,9 кг K_2O /га, тяжелосуглинистой – 39,5–61,6, серой лесной – 60,0 кг K_2O /га.

Следует отметить, что фактическое использование калия из необменной формы может быть меньше, так как растения потребляют калий и из подпахотных горизонтов. К сожалению, в большинстве опытов данные о первоначальном содержании обменного калия в нижних горизонтах почв отсутствуют.

Таким образом, в длительных опытах, проводимых на дерново-подзолистых и серой лесной почвах, в условиях дефицитного баланса при продуктивности агроценозов 20,5–28,6 ц з.е./га ежегодно из почвенных запасов высвобождалось 39,5–61,6 кг/га калия. От общего выноса калия урожаем культур севооборотов в вариантах без внесения удобрений было усвоено 89–98% калия из необменных форм.

Растения используют природный необменный калий через обменную форму. Высвобождение природного необменного калия из кристаллической решетки в результате разрушения или изменения ее основы в процессе выветривания почвы совершается очень медленно, что связано с большой затратой энергии. Он менее доступен растениям и использование его начинается, когда содержание обменного калия достигнет минимального или близкого к нему уровня. Минимальный уровень обменного калия в дерново-подзолистых почвах составляет: в супесях – 5,0–7,0 мг/100 г почвы, суглинках легких – 5,5–8,5, суглинках средних – 5,5–10,5, суглинках тяжелых – 7,0–11,0 мг/100 г почвы (Никитина, Володарская, 2007).

Исследования, проведенные в длительных опытах на черноземных почвах в полевых севооборотах с разной насыщенностью зерновыми (67%) и пропашными культурами (33%), показали, что при длительном дефицитном балансе на исходно богатых калием черноземах, основная часть в общем выносе калия урожаем растениеводческой продукции также приходится на долю необменной формы этого элемента. Действительно, за одну ротацию севооборотов (7–10 лет) дополнительное использование обменного калия в вариантах без удобрений при среднегодовой продуктивности севооборотов 28,9–45,0 ц з.е./га составило 396–793 кг K_2O /га, или 57–95 кг K_2O /га в год.

В длительных опытах, проводимых на светло-каштановых почвах при орошении, при дефицитном балансе наблюдалось как снижение содержания обменного калия, так и его повышение. Так, в длительном опыте ВНИИОЗ с исходно высокой обеспеченностью исследуемой почвы обменным калием (по Масловой) без применения удобрений питание растений этим элементом и поддержание содержания $K_2O_{\text{обм}}$ на уровне, близком к исходному, происходили за счет необменной формы. За одну ротацию зернокормового сево-

оборота при продуктивности агроценоза 46,2 ц з.е./га использование калия из необменных форм под влиянием растений и орошения составило 1150 кг/га и интенсивность мобилизации была очень высокой – 144 кг K_2O /га в год.

Решающая роль необменных форм калия в обеспечении калийного питания растений установлена в стационарном полевом опыте при орошении на светло-каштановой тяжелосуглинистой почве Саратовского Заволжья в двух ротациях 6-польного зернокармального севооборота, насыщенного на 50% зерновыми, на 17 – пропашными культурами и на 33% люцерной.

Рассматриваемая почва характеризуется высоким валовым содержанием калия как в пахотном (0–30 см), так и в подпахотном (30–40 см) горизонтах, которое составляло 2,27 и 2,18% соответственно. Содержание подвижного калия (по Мачигину) в контрольном варианте варьировало в пределах 392–438 и 256–389 мг/кг, или 1,7–1,9 и 1,2–1,85% от валового количества соответственно по слоям. Степень подвижности калия в почве высокая – 5,2 мг/л в слое почвы 0–30 см и 4,8 мг/л в слое 30–40 см (Конончук, 2004).

Многолетняя динамика содержания подвижного калия, определяемого по методу Мачигина, в контрольном варианте в светло-каштановой почве показала, что при отрицательном балансе за 12 лет его количество увеличилось на 49 мг/кг почвы. При этом практически сохранялся исходный (высокий) уровень обеспеченности исследуемой почвы данной формой калия. Поддержание уровня подвижного калия в пахотном слое светло-каштановой почвы, близкого к исходному, и питание растений калием при отрицательном балансе происходили полностью за счет необменных форм. Установлено, что за 12 лет уменьшение количества необменных форм калия (легкогидролизуемого – по Пчелкину и необменного – по Гедройцу) в пахотном слое почвы составило 1670 кг/га. Эта величина хорошо коррелировала с суммарным выносом K_2O урожаем культур и увеличением количества подвижного калия в почве за этот же период ($r=0,81$) (Конончук, Никитина, 2002). Ежегодная мобилизации необменного калия из почвы была очень высокой – 139 кг/га в год, или 107% от суммарного выноса K_2O с урожаем культур и увеличения количества подвижного калия в почве.

В настоящее время в потреблении калийных удобрений, внесение которых снизили до 1–2 кг/га пашни, наметилась еще более значительная дифференциация. Ежегодный дефицит калия в среднем по стране варьирует от 16 до 30 кг K_2O /га, что в сумме за 20 лет составило около 500 кг K_2O /га.

Известно, что систематическое превышение выноса K_2O над его поступлением в почву рано или поздно приведет к деградации почв по степени их обеспеченности данным питательным веществом. В первую очередь это касается менее буферных дерново-подзолистых почв, в которых уже сейчас наметилась устойчивая тенденция к снижению содержания подвижного калия. В северотаежной зоне средневзвешенное содержание подвижного калия за 10 лет снизилось с 128 до 91 мг/кг, для пашни с низкой обеспеченностью K_2O возросла с 21 до 29%. Аналогичная ситуация характерна для среднетаежной, южнотаежно-лесной и даже лесостепной зон (Сычев, 2003). В бывшем Центральном экономическом районе средневзвешенное содержание K_2O уменьшилось с 123 до 111 мг/кг. Доля почв с низкой обеспеченностью K_2O возросла с 25 до 35%, с высокой сократилась с 18 до 13% (Шафран, 2006).

На более буферных почвах, характеризующихся высоким содержанием калия (черноземы, каштановые почвы). Допустим дефицит K_2O , который на данном этапе оправдан с экономической и экологической точек зрения (Прокошев, Дерюгин, 2000). Тем не менее, на обыкновенном черноземе при систематическом дефиците калия в севообороте через 18 лет во второй минимум после азота в посевах кукурузы и озимой пшеницы вместо фосфора перешел калий, поскольку от его внесения прибавка урожая превосходила действие фосфорного удобрения (Чичкин, 1999).

Очевидно, что решение о применении калийного удобрения и его дозе может быть принято с учетом знания биологических особенностей культур, типа почвы, ее гранулометрического состава и агрохимических свойств, из которых, по мнению отечественных и зарубежных ученых, содержание подвижных форм калия в почвах является надежным показателем, характеризующим степень обеспеченности сельскохозяйственных культур этим элементом питания.

Действие калийных удобрений находится в обратной зависимости от уровня обеспеченности почв подвижным калием. По данным Географической сети опытов с удобрениями и Агрохимической службы, эффективность калийных удобрений понижается при продвижении с севера на юг, что объясняется, с одной стороны, различием в содержании подвижного калия в почвах, с другой – их водным режимом (Державин, 1992).

Согласно результатам обобщения полевых опытов Агрохимической службы, прибавка урожайности озимой пшеницы от калия в южнотаежной зоне составила 2,9 ц/га, лесостепной – 1,9 ц/га, в степной 0,6 ц/га, а в сухостепной зоне прибавка отсутствовала. Аналогичные данные получены также для яровых пшеницы и ячменя. При этом автор подчеркивает, что в опытах Агрохимической службы эффективность калийных удобрений была выше на 30–70% по сравнению с данными, полученными учреждениями Географической сети ВИУА. Это объясняется более высоким содержанием подвижного калия в почвах экспериментальных полей научных учреждений.

По данным ЦИНАО, эффективность калийных удобрений снижалась при увеличении содержания подвижного калия в дерново-подзолистых почвах при внесении под озимую пшеницу на темно-серой лесной почве и черноземе обыкновенном – под яровой ячмень.

Таким образом, анализ материалов Географической сети опытов с удобрениями, Агрохимической службы и литературных источников показал, что, несмотря на большое количество проведенных опытов, существует мало данных, характеризующих эффективность калийных удобрений на зерновых культурах в зависимости от степени обеспеченности почв подвижным калием. Исследования носили локальный характер и не охватывали всего многообразия природно-климатических условий страны, что затруднило их использование при организации наиболее эффективного применения калийных удобрений.

Анализ данных, полученных на различных почвах Европейской части страны, свидетельствуют о том, что влияние содержания подвижного калия на эффективность калийных удобрений выражалась, с одной стороны в увеличении урожайности зерновых культур по мере повышения K_2O

в почве, а с другой – в снижении прибавки урожайности от калия. Наиболее четко такая закономерность прослеживалась в опытах с озимой пшеницей на дерново-подзолистых почвах Центрального федерального округа (табл. 88).

Таблица 88

**Прибавка урожайности озимой ржи от калийных удобрений, ц/га
(Центральный округ)**

Содержание, К ₂ О мг/кг	Урожай без удобрений, ц/га	Дозы калия, кг/га				
		30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы						
< 80	13,3	2,6	3,0	3,3	3,7	3,9
81–120	23,5	0,9	1,0	1,1	1,3	1,3
121–170	31,0	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Черноземы выщелоченные и оподзоленные						
81–120	23,5	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8
121–170	29,9	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
Черноземы обыкновенные						
81–120	20,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
> 120	26,1	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5

Достаточно ощутимой была разница в урожайности между почвами среднеобеспеченными и повышеннообеспеченными подвижным К₂О на черноземах выщелоченных и оподзоленных, а также черноземах обыкновенных. На дерново-подзолистых почвах при переходе их из среднеобеспеченных в повышеннообеспеченные подвижным калием разница в урожайности оказалась еще выше. Окупаемость калия наиболее высокой прибавкой урожая озимой пшеницы отмечена на дерново-подзолистых почвах при их низкой обеспеченности подвижным К₂О (табл. 89).

Таблица 89

**Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожайности
озимой ржи, кг/кг, (Центральный округ)**

Содержание, К ₂ О мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Дерново-подзолистые почвы					
< 80	2,6	3,0	3,3	3,7	3,9
81–120	0,9	1,0	1,1	1,3	1,3
121–170	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Черноземы выщелоченные и оподзоленные					
81–120	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8
121–170	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
Черноземы обыкновенные					
81–120	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
> 120	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5

В опытах с яровой пшеницей выявлена та же закономерность, что и с озимой, несмотря на различные регионы их возделывания. С увеличением содержания подвижного калия росла урожайность яровой пшеницы. Трансформация почв с очень низкой обеспеченностью K_2O в повышенную способствовала удвоению урожайности яровой пшеницы независимо от типа почв и регионов возделывания (табл. 90).

Таблица 90

Влияние содержания подвижного калия на прибавку урожая яровой пшеницы от калийных удобрений, ц/га

Содержание, K_2O мг/кг	Урожай без удобрений, ц/га	Дозы калия, кг/га				
		30	45	60	90	120
Приволжский округ Серые лесные почвы						
< 40	8,2	3,8	4,2	4,6	5,1	5,2
41–80	14,6	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8
81–120	18,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
> 120	19,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Черноземы выщелоченные и оподзоленные						
< 40	8,5	4,7	5,2	5,6	6,1	6,3
41–80	15,2	1,6	1,8	1,9	2,1	2,1
81–120	19,3	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
> 120	20,0	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
Сибирский округ Серые лесные почвы						
< 40	8,6	2,4	2,7	2,9	3,2	3,3
41–80	15,4	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1
81–120	19,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
> 120	20,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Эффект от калия определялся в первую очередь содержанием подвижного калия. При этом подчеркиваем, что только в выборке по яровой пшенице имелись данные по почвам с очень низким содержанием подвижного калия, что позволило выявить высокий эффект от калия в зонах Приволжья и Сибири, хотя до этого считалось, что внесение калийных удобрений под яровую пшеницу малоэффективно.

Окупаемость калия на почвах Приволжья с очень низким содержанием K_2O варьировала в зависимости от дозы 4,4–15,6 кг/кг, в Сибири – 2,7–8,0 кг/кг (табл. 91).

Это дает основание предположить, что затраты на применение калийных удобрений на почвах с очень низким содержанием подвижного калия могут окупиться стоимостью прибавки урожая яровой пшеницы в этих регионах.

Озимая рожь примерно также реагировала на внесение калийных удобрений, как и озимая пшеница, то есть с повышенным содержанием подвижного калия в дерново-подзолистых и серых лесных почвах увеличивалась урожайность и снижалась прибавка урожая от калия (табл. 92).

Таблица 91
Влияние содержания подвижного калия на окупаемость калийных удобрений
прибавкой урожая яровой пшеницы, кг/кг

Содержание, K_2O мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Приволжский округ Серые лесные почвы					
< 40	12,7	9,4	7,7	5,6	4,4
41–80	4,3	3,1	2,7	1,9	1,5
81–120	1,8	1,3	1,1	0,8	0,6
> 120	0,8	0,6	0,5	0,3	0,3
Черноземы выщелоченные и оподзоленные					
< 40	15,6	11,5	9,3	6,8	5,3
41–80	5,3	4,0	3,2	2,3	1,8
81–120	2,2	1,6	1,3	0,9	0,7
> 120	1,0	0,7	0,6	0,4	0,3
Сибирский округ Серые лесные почвы					
< 40	8,0	5,9	4,8	3,5	2,7
41–80	2,7	2,0	1,7	1,2	0,9
81–120	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4

Таблица 92
Прибавка урожайности озимой ржи от калийных удобрений, ц/га

Содержание, K_2O мг/кг	Урожай без удобрений, ц/га	Дозы калия, кг/га				
		30	45	60	90	120
Центральный округ, дерново-подзолистые почвы						
< 80	8,9	2,9	3,3	3,5	3,9	4,1
81–120	15,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,4
> 120	20,8	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6
Центральный и Приволжский округа, серые лесные почвы						
< 80	8,6	3,8	4,2	4,6	5,1	5,3
81–120	15,4	1,3	1,4	1,5	1,8	1,8
> 120	20,2	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7

При этом на почвах с одинаковым содержанием K_2O величина урожайности у озимой пшеницы была существенно выше, чем у озимой ржи.

Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожая озимой ржи на почвах с низкой обеспеченностью K_2O в несколько раз превосходила показатели, полученные в вариантах с более высоким содержанием K_2O (табл. 93).

Яровой ячмень считается более требовательной культурой к условиям калийного питания, что связано с более коротким периодом потребления, чем у других зерновых культур. Ячмень с тонны урожая выносит в среднем на 23% калия больше, чем яровая пшеница, и на 14%,

чем озимая (Аникст, 1988). В наших исследованиях заметной разницы в эффективности калийных удобрений, внесенных под ячмень и другие зерновые культуры, не прослеживалось.

Таблица 93

**Окупаемость калийных удобрений прибавкой
урожайности озимой ржи, кг/кг**

Содержание, K_2O мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Центральный округ, дерново-подзолистые почвы					
< 80	9,7	7,3	5,8	4,3	3,4
81–120	3,3	2,4	2,0	1,6	1,2
> 120	1,3	1,1	0,8	0,7	0,5
Центральный и Приволжский округа, серые лесные почвы					
< 80	12,7	9,3	7,7	5,7	4,4
81–120	4,3	3,1	2,5	2,0	1,5
> 120	1,7	1,3	1,2	0,8	0,6

Сравнение окупаемости калийных удобрений в зависимости от содержания подвижного калия в почвах выявило несколько иную картину, хотя повсеместно подтверждалась та же закономерность, что и на остальных зерновых культурах – с повышением содержания K_2O снижалась эффективность калийных удобрений (табл. 94).

Таблица 94

**Окупаемость калийных удобрений (K_{45}) прибавкой урожайности
ярового ячменя, кг/кг**

Почва	Содержание подвижного калия в почве		
	низкое	среднее	повышенное
Дерново-подзолистые	9,8	3,3	1,3
Серые лесные	7,7	2,7	1,1
Черноземы оподзоленные и выщелоченные	8,4	2,9	1,1
Черноземы типичные и обыкновенные	–	1,3	–
Черноземы южные	–	1,3	–
Каштановые	–	0,9	–

При низкой обеспеченности почв калием прибавка от калийных удобрений была самой высокой. На почвах, где содержание K_2O превышало 120 мг/кг, прибавка урожая и окупаемость удобрений приближалась к нулю (табл. 95).

При таком большом разбросе имеется возможность выбрать наиболее подходящий вариант использования калийных удобрений, исходя из имеющихся возможностей сельскохозяйственных предприятий и поставленных задач.

Эффективность калийных удобрений на овсе в зависимости от содержания подвижного калия представилась возможность изучить только в дерново-подзолистых почвах на базе объединенной выборки Центрального и Северо-Западного округов.

Таблица 95

**Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожайности ярового
ячменя, кг/кг**

Содержание, K ₂ O мг/кг	Дозы калия, кг/га				
	30	45	60	90	120
Центральный и Северо-Западный округа					
Дерново-подзолистые почвы					
< 80	13,3	9,8	8,0	5,9	4,6
81–120	4,7	3,3	2,7	2,0	1,6
> 120	1,7	1,3	1,2	0,8	0,7
Центральный округ					
Серые лесные почвы					
< 80	10,3	7,7	6,3	4,7	3,7
81–120	3,3	2,7	2,2	1,6	1,3
> 120	1,3	1,1	0,8	0,7	0,5
Черноземы оподзоленные и выщелоченные					
< 80	11,3	8,4	7,0	5,1	4,0
81–120	3,7	2,9	2,3	1,8	1,4
> 120	1,7	1,1	1,0	0,7	0,6

Таблица 96

**Эффективность калийных удобрений, внесенных под овес
на дерново-подзолистых почвах Центрального и Северо-Западного округов**

Содержание, K ₂ O мг/кг	Урожай без удо- брений, ц/га	Дозы калия, кг/га			
		30	60	30	60
		Прибавка, ц/га		Окупаемость, кг/кг	
< 80	9,6	3,0	3,6	10,0	6,0
81–120	17,1	1,0	1,2	3,3	2,0
121–170	21,8	0,4	0,5	1,3	0,8
> 170	22,5	0,2	0,2	0,7	0,3

Результаты, приведенные в таблице 96, свидетельствуют о том, что применение калийных удобрений достаточно эффективно в тех случаях, когда содержание в почве не превышало 80 мг/кг. Если же содержание калия превышает 80 мг/кг, можно с уверенностью сказать, что внесение калийных удобрений экономически нецелесообразно, так как стоимость прибавки урожая будет значительно ниже величины затрат на применение калийных удобрений.

Сравнение окупаемости калийных удобрений прибавкой урожая между зерновыми культурами показало, что яровой ячмень выделялся среди них наиболее высокой окупаемостью при одинаковой степени обеспеченности почв K₂O. При низком содержании подвижного калия прибавка урожая ячменя на дерново-подзолистых почвах в 1,5 раза превышала озимую пшеницу, на серых лесных почвах – почти в 3 раза яровую пшеницу (табл. 97).

Таблица 97

**Отзывчивость зерновых культур на внесение калийных удобрений
на почвах с низким содержанием подвижного калия**

Культура	Почвы	Доза калия, кг/га				
		30	45	60	90	120
Прибавка, ц/га						
Озимая пшеница	Дерново-подзолистые	2,6	3,0	3,3	3,7	3,9
Озимая рожь		2,9	3,3	3,5	3,9	4,1
Яровая пшеница	Серые лесные	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	Черноземы выщелоченные	1,8	2,0	1,2	2,4	2,5
Яровой ячмень	Дерново-подзолистые	4,0	4,4	4,8	5,3	5,5
	Серые лесные	3,1	3,5	3,8	4,2	4,4
	Черноземы выщелоченные	3,4	3,8	4,2	4,6	4,8
Овес	Дерново-подзолистые	3,0	3,3	3,6	3,9	4,0
Окупаемость, кг/кг						
Озимая пшеница	Дерново-подзолистые	8,7	6,7	5,5	4,1	3,3
Озимая рожь		9,7	7,3	5,8	4,3	3,4
Яровая пшеница	Серые лесные	3,7	2,7	2,2	1,6	1,3
	Черноземы выщелоченные	6,0	4,4	3,7	2,7	2,1
Яровой ячмень	Дерново-подзолистые	13,3	9,8	8,0	5,9	4,6
	Серые лесные	10,3	7,8	6,3	4,7	3,7
	Черноземы выщелоченные	11,3	8,4	7,0	5,1	4,0
Овес	Дерново-подзолистые	10,0	7,3	6,0	4,3	3,3

Расчеты показали, что исходя из цен на зерно и хлористый калий, граница окупаемости этого удобрения в начале 2011 г. составляла: пшеницы 2,5 кг/кг, озимой ржи 3,1 и ячменя 2,8 кг/кг. Сравнение этих величин с данными, представленными в вышеприведенных таблицах, говорит о том, что затраты на применение хлористого калия могли бы окупиться стоимостью прибавки урожая озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах с низким содержанием K_2O в дозах 30–120 кг/га. На черноземах выщелоченных и обыкновенных при такой же обеспеченности подвижным калием в дозах 30–45 кг/га (табл. 90).

Внесение хлористого калия под яровую пшеницу экономически оправдано на серых лесных почвах и на черноземах оподзоленных и выщелоченных в тех случаях, когда содержание K_2O не превышало 80 мг/кг (по Чирикову), а под озимую рожь 120 мг/кг (по Кирсанову) (табл. 93).

Несмотря на более высокую эффективность калийных удобрений, применяемых под ячмень, диапазон доз их экономически обоснованного внесения находится в том же диапазоне доз и обеспеченности почв подвижным калием, что объясняется более низкой закупочной ценой на эту культуру (табл. 96).

Под озимую рожь затраты на внесение хлористого калия могут окупиться только на почвах с низким содержанием K_2O в дозах не более 45 кг/га.

При очень низкой обеспеченности почв подвижным калием затраты, связанные с применением калийного удобрения могли бы окупиться стоимостью прибавки урожая ржи при более высоких дозах при очень низком содержании K_2O (табл. 97). Однако таких площадей среди пахотных почв практически не осталось.

На более буферных почвах, характеризующихся высоким содержанием калия (черноземы, каштановые почвы), допустим дефицит K_2O , который оправдан с экономической и экологической точек зрения до определенного предела. Дальнейшее увеличение дисбаланса калия влечет за собой снижение урожайности и качества продукции, а также действия других агрохимических приемов.

Общеизвестно, что применение калийных удобрений способствует постепенному накоплению калия в подвижной форме, которое заметно даже при отрицательном балансе калия. Вместе с тем этот процесс медленный. За 35 лет, при ежегодном насыщении почвы калием в дозе 120 кг/га K_2O содержание подвижного калия увеличивается с 50 до 133 мг/кг почвы (Прудников, 2015).

Чтобы избежать непродуктивного использования растениями калия почвы и удобрений, необходимо использовать экономически окупаемые дозы.

БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ

Увеличение или снижение степени плодородия почв существенно изменяет характер и масштаб обмена веществ в системе «почва-растение». О величине этих изменений позволяет судить баланс элементов питания.

Известно, что с каждым урожаем растения выносят из почвы питательные вещества и если эти потери не восполняются, то происходят истощение почвы и снижение урожаев. Об этом Д.Н. Прянишников (1945) писал еще в первой половине прошлого века. Опираясь на многолетний опыт Западной Европы, он отмечал, что там получали более высокие урожаи не за счет лучших климатических и почвенных условий, а благодаря труду и знаниям, вложенным в формирование плодородия почв, естественное состояние которых по своей природе хуже, чем в России. В начале это было введение плодосмена, затем – применение азотных удобрений: вначале исключительно их, а потом преимущественно. Только переход от зернового трехполья к плодосмену с культурой клевера привел постепенно, через несколько десятилетий, к удвоению урожаев по сравнению со средневековым уровнем – с 6–7 до 13–17 ц/га. Этот уровень продержался достаточно долго и только под влиянием внесения минеральных удобрений последовало еще более быстрое повышение урожаев, составившее трех- и четырехкратную величины по сравнению с исходными. К этому времени урожайность зерновых культур в странах Западной Европы составляла 24,3–31,8 ц/га. В 1937 г. вынос азота урожаями возмещался в Германии на 80%, в Дании на 91, в США на 83, а в СССР на 31%. В 1940 г. вынос азота в земледелии СССР возмещался на 26%, фосфора на 32 и калия на 24%, то есть значительная часть урожая формировалась за счет потребления питательных веществ из почвенных запасов, в то время как опыт Западной Европы показывал, что для систематического роста урожаев необходимо возвращать азот и калий примерно на 80%, фосфор на 100–110%.

В России минеральные удобрения сыграли важную роль в развитии земледелия. Первоначально позитивные сдвиги наблюдались в хлопкосеющих и чаеводческих регионах, куда минеральные удобрения направляли целевым назначением. Например, увеличение применения минеральных удобрений под хлопчатник с 0,15 ц/га в 1932 г. до 5,65 ц/га повысило урожайность хлопка-сырца с 8,9 до 17,0 ц/га. Подобное наблюдалось и при внесении минеральных удобрений под чай. Применение удобрений с 1,3 до 51 тыс. т

способствовало увеличению сбора чайного листа с 891 до 2252 кг/га. Вместе с тем, под остальные сельскохозяйственные культуры минеральные удобрения вносили в незначительных количествах, что не могло существенно повлиять на прирост урожайности растениеводческой продукции.

Только во второй половине 20 века в нашей стране стала развиваться бурными темпами промышленность по производству минеральных удобрений. С 1966–1970 по 1986–1990 гг. их применение в России почти утроилось и составило в среднем 22 кг/га пашни, тем не менее этого количества удобрений было недостаточно для того, чтобы обеспечить значительное повышение урожайности сельскохозяйственных культур и повысить почвенное плодородие. К этому времени в стране уже была создана Государственная агрохимическая служба и началось регулярное обследование почв сельскохозяйственных угодий на содержание в них питательных веществ. Первые результаты показали, что большинство почв России неудовлетворительно обеспечены подвижным фосфором и значительная часть подвижным калием (Нечерноземная зона). Следовательно, обширная территория нуждалась в повышении плодородия почв, а для этого необходимы данные по приходу и расходу питательных веществ в земледелии.

Статьи баланса элементов питания

Основные источники прихода элементов питания – минеральные и органические удобрения. В приходных статьях баланса элементов питания наиболее существенную долю занимают минеральные удобрения – от 40 до 80% (Сычев, Музыкантов и др., 2000).

С учетом структуры органических удобрений принято считать, что среднее содержание питательных веществ в навозе составляет: азот – 0,5%, фосфор – 0,25% и калий – 0,6%. Учитывая различную влажность органических удобрений при расчетах баланса необходимо делать поправку на этот показатель.

Одним из источников пополнения запасов азота в почве служит биологическая фиксация атмосферного азота свободноживущими и клубеньковыми микроорганизмами. Симбиотическая азотфиксация неодинакова у различных культур. По обобщенным данным в расчете на 1 ц основной продукции клевер, например, накапливает азот в почве 1,4–1,6 кг/га, горох – 0,40, вика – 0,08 кг/га.

Процесс биологической фиксации азота воздуха происходит более благоприятно при достаточном наличии в почве углеводов, фосфора, калия и кальция, умеренной влажности почвы и нейтральной реакции. Избыточное содержание в почве минеральных форм азота снижает фиксацию азота бобовыми культурами (Минеев, Ремпе, 1991; Минеев, Дебренеци и др., 1993; Синицына, Иванова, 1997; Осипов, Соколов, 2001).

Определение азотфиксации свободноживущими почвенными микроорганизмами представляет определенные трудности и поэтому ее размеры колеблются от 3 до 50 кг/га. Внесение азотных удобрений в повышенных

дозах приводит к затуханию процесса несимбиотической азотфиксации. Несимбиотическая азотфиксация рассчитывается на площадях, исключая выращивание бобовых культур и чистые пары (Никифорова, 1974; Никончик, 1988; Завалин, 2005).

Небольшое количество питательных веществ поступает в почву с семенами и атмосферными осадками. Поступление их с семенами зависит от структуры посевных площадей, нормы высева, содержания азота, фосфора и калия в посевном и посадочном материале.

Величины поступления элементов питания с атмосферными осадками значительно колеблются в зависимости от наличия в непосредственной близости предприятий, выбрасывающих в атмосферу соответствующие вещества, а также от климатических условий: роза ветров, количество и характер выпадающих осадков (морозящие, ливневые и др.). Поступление азота с атмосферными осадками колеблется от 2 до 8 кг/га, а в отдельных районах эта величина достигает 10–15 кг/га в год. С осадками больше выпадает аммиачного азота.

Главная статья расхода элементов питания – вынос их с урожаем сельскохозяйственных культур. В настоящее время разработаны и опубликованы нормативные показатели выноса элементов питания основной и побочной продукцией сельскохозяйственных культур.

В последние годы в составе расходных статей баланса питательных веществ занял значительное место вынос с сорняками. При наличии конкретных данных вынос сорняками элементов питания рассчитывается исходя из количества биомассы сорняков и выноса с биомассой элементов питания.

При отсутствии таких данных возможен другой вариант расчета выноса элементов питания сорняками.

Биомасса сорняков в посевах однолетних и многолетних трав, а также силосных культур входит в валовой сбор данных культур и может отдельно не учитываться. Масса сорняков в посевах пропашных культур, вследствие интенсивных междурядных обработок, сравнительно небольшая, и ею можно пренебречь. Сорняки должны учитываться при возделывании зерновых. Как правило, к моменту уборки зерновых сорняки осеменяются, поэтому можно считать, что за счет оставшейся части сорняков возрастает вынос питательных веществ с побочной продукцией соответствующей культуры (Алиев, Сычев и др., 2013).

Неизбежная расходная статья баланса – непроизводительные потери элементов питания: выщелачивание из корнеобитаемого слоя, эрозионные процессы и газообразные потери азота (Анон, 1988).

Потери питательных веществ за счет вымывания зависят от многих условий, в первую очередь от гранулометрического состава почвы, количества осадков, типа водного режима. В зоне избыточного увлажнения потери азота значительны и могут достигать 25–30 кг/га.

В районах с непромытым водным режимом потери азота составляют лишь несколько килограммов.

Значительных размеров достигают газообразные потери азота в форме N_2 , NH_3 и окислов, образующихся в результате денитрификации. Потери от

денитрификации происходят в весенний и осенний периоды, когда почва переувлажнена, а температура достаточна как для микробиологических, так и для химических процессов. Величины потери азота за счет денитрификации обычно составляют 10–20% от дозы внесенного с удобрениями азота. Кроме того, газообразные потери азота могут происходить и за счет азота почвы, средняя величина этих потерь 6 кг/га (Никифорова, 1974; Кореньков, Руделев, 1984).

Большое количество питательных веществ теряется на угодьях, подверженных эрозии. В среднем с одного гектара эродированных почв теряется азота – 18–20 кг, фосфора – 5–10 кг и калия – 12–24 кг.

Анализ данных по балансу элементов питания, проведенный нами, показывает четко выраженное изменение интенсивности баланса, которому соответствует и изменение содержания в почве элементов питания.

Исследованиями географической сети опытов и Агрохимслужбы в длительных опытах показано, что расход питательных веществ на производство сельскохозяйственной продукции и непродуцируемые потери должен компенсироваться полностью или частично. Для получения высоких и стабильных урожаев в нечерноземной зоне расход азота и калия должен компенсироваться на 100%, приходные статьи по фосфору должны превышать расходные в 1,5–2 раза. В лесостепной зоне интенсивность баланса может быть несколько ниже (по азоту 85–90%, фосфору – 150–200% и калию – 50–60%), в степной соотношение меняется в пользу фосфора. Интенсивность баланса по фосфору должна составлять 200–250%, азота – 60–75%, калия – 25–30%.

По нашим расчетам фактическая интенсивность баланса в нечерноземной зоне (Северный, Северо-Западный и Центральный экономические районы) с 1971 по 1991 г. составляла по азоту – 120–200%, фосфору – 260–640%, калию – 100–220% (табл. 98).

Устойчивый положительный баланс фосфора и калия сопровождался снижением площадей почв с низким содержанием этих элементов.

В районах лесостепи и степи (ЦЧР, Северный Кавказ) интенсивность баланса по азоту с 1971–1975 гг. составляла 70–100%, фосфору – 110%, калию – 20–50%. К 1990 г. возмещение расхода по азоту возросло до 120–130%, фосфору – 250–260% и калию – 50–80% (табл. 98).

В районах сухостепи (Поволжье) интенсивность баланса с 1971 по 1990 г. по азоту возросла от 70% до 110%, фосфору – от 70 до 210%, калию – от 20 до 40%. Баланс калия стабильно оставался отрицательным. Период 1996–1998 гг. характеризовался отрицательным балансом по всем элементам, за исключением фосфора в северных районах.

Доля различных статей в приходных и расходных частях баланса в течение двадцатилетнего периода существенно менялась в отношении азота и незначительно по калию (табл. 99–101). В связи со значительным снижением объемов минеральных удобрений возросла доля азотфиксации, увеличился вынос азота с урожаем, снизились потери элементов питания вследствие вымывания и эрозии.

Вынос элементов питания с урожаем был низким, по азоту доля выноса с урожаем колебалась от 57 до 71% в нечерноземной зоне и от 76 до 79% в лесостепной и степной зонах, по фосфору – 86–90% и по калию – 70–80%.

Таблица 98

Динамика интенсивности баланса, %

Регион	1971–1975 гг.			1976–1980 гг.			1981–1985 гг.		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Северный	120	340	120	150	550	160	160	490	160
Северо-Западный	140	440	140	160	680	220	170	640	190
Центральный	120	260	100	140	400	150	160	430	160
Центрально-Черноземный	90	110	50	100	150	70	140	190	90
Поволжский	70	70	20	70	90	30	100	120	40
Северо-Кавказский	90	110	20	100	140	30	130	150	50
Российская Федерация	80	130	40	90	170	60	120	210	70
Регион	1986–1990 гг.			1996–1998 гг.			–		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	–	–	–
Северный	200	640	190	120	220	60	–	–	–
Северо-Западный	190	640	190	90	140	40	–	–	–
Центральный	160	430	140	80	80	30	–	–	–
Центрально-Черноземный	130	260	80	80	70	20	–	–	–
Поволжский	110	210	40	70	60	20	–	–	–
Северо-Кавказский	120	250	50	70	50	10	–	–	–
Российская Федерация	120	290	70	70	60	20	–	–	–

Таблица 99

Долевое участие различных статей в балансе азота
(% от общего количества поступления и расхода)

Годы	Приходные статьи баланса					Расходные статьи баланса				
	удобрения		семена	атмосферные осадки	азот-фиксация	вынос с урожаем	вынос с сорняками	денитрификация	эрозия, вымывание	баланс ± кг/га
	минеральные	органические								
Нечерноземная зона										
1971–75	53	25	5	7	10	58	5	6	31	16,3
1976–80	55	26	4	6	9	57	6	8	29	32,9
1981–85	54	29	3	5	8	58	5	9	28	43,0
1986–90	54	30	3	5	8	63	5	9	23	55,4
1996–98	36	23	7	10	24	71	6	2	21	–1,6
Степная и сухостепная зона										
1971–75	39	17	7	17	20	78	9	3	10	–6,1
1976–80	46	16	6	14	18	77	9	4	10	–2,3
1981–85	48	21	3	12	16	76	8	6	9	13,7
1986–90	52	20	4	10	14	78	8	6	8	13,6
1996–98	37	13	7	16	27	79	9	2	10	–12,2

Таблица 100

**Долевое участие различных статей в балансе фосфора
(% от общего количества поступления и расхода)**

Годы	Приходные статьи баланса			Расходные статьи баланса			Баланс ± кг/га
	удобрения		семена	вынос с урожаем	вынос с сорняками	эрозия	
	минеральные	органические					
Нечерноземная зона							
1971–75	69	28	3	88	10	2	26,6
1976–80	73	25	2	88	10	2	45,5
1981–85	67	31	2	89	9	2	49,1
1986–90	67	31	2	90	8	2	56,1
1996–98	39	52	9	88	10	2	3,3
Степная и сухостепная зоны							
1971–75	65	29	6	86	10	4	0,2
1976–80	72	24	4	86	8	6	4,8
1981–85	62	35	3	86	10	4	9,3
1986–90	77	21	2	88	9	3	27,1
1996–98	60	30	10	85	10	5	-5,2

Высокая интенсивность баланса в нечерноземной зоне была обусловлена низкой окупаемостью удобрений урожаем. Это связано с одной стороны с неблагоприятными почвенно-климатическими условиями зоны – недостатком тепла, значительными площадями переувлажненных и кислых почв, их неудовлетворительными физическими свойствами (Трутнев, 1973; Бондарев, Бахтан и др., 1986), с другой стороны, низкой культурой земледелия. В тоже время до 25% хозяйств, освоивших научные системы применения удобрений в комплексе с другими приемами агротехники, получали устойчивые урожаи зерновых культур по 40–50 ц/га.

Таблица 101

**Долевое участие различных статей в балансе калия
(% от общего количества поступления и расхода)**

Годы	Приходные статьи баланса			Расходные статьи баланса			Баланс ± кг/га
	удобрения		семена	вынос с урожаем	вынос с сорняками	эрозия	
	минеральные	органические					
Нечерноземная зона							
1971–75	60	37	3	71	12	17	11,8
1976–80	66	31	3	70	13	17	41,4
1981–85	63	35	2	72	12	16	40,9
1986–90	61	37	2	77	10	13	43,0
1996–98	30	63	7	77	11	12	-21,0
Степная и сухостепная зоны							
1971–75	42	52	6	77	16	7	-34,1
1976–80	52	44	4	77	16	7	-31,3
1981–85	44	52	4	78	16	6	-21,8
1986–90	52	45	3	80	14	6	-27,4
1996–98	29	60	11	76	17	7	-37,1

В районах степи и лесостепи баланс питательных веществ был близок к оптимальному, урожаи практически всех возделываемых культур были более высокие и стабильные (табл. 98).

В районах сухой степи (Поволжье) жесткие климатические условия, значительный процент неблагоприятных по агрохимическим показателям почв ограничивали получение высоких урожаев, что обусловило положительный баланс питательных веществ при относительно невысоком уровне применения удобрений.

Не использованные растениями элементы питания способствовали повышению плодородия почв. К 1990 г. значительно снизились площади кислых почв, возросла доля почв с высоким содержанием фосфора, наибольший положительный сдвиг произошел в нечерноземной зоне. Содержание подвижных форм калия несколько увеличилось в нечерноземной зоне, где баланс калия был положительным.

В 1996–1998 гг., несмотря на уменьшение уровня урожайности, баланс по всем элементам стал отрицательным. Снижение урожайности в этот период не коррелировало с резко отрицательным балансом элементов питания вследствие достигнутого за предыдущие годы уровня плодородия почв.

Однако при таком балансе без внесения удобрения в течение 3–5 лет уровень урожайности сельскохозяйственных культур достигнет уровня 1950-х гг., когда урожаи зерновых составляли 7,4 ц/га, сахарной свеклы – 105 ц/га, подсолнечника – 5,1 ц/га, картофеля – 81 ц/га.

До 1950-х гг. земледелие страны базировалось на экстенсивных методах, формирование урожаев сельскохозяйственных культур происходило за счет почвенных запасов элементов питания, фиксации биологического азота, а также элементов питания, поступающих с навозом, что привело к значительному истощению почв элементами питания.

В период с 1996 по 1998 гг. интенсивность по азоту составила в среднем по Российской Федерации 70% с учетом всех приходных статей. Интенсивность баланса с учетом только минеральных и органических удобрений составила 40% (табл. 98).

Данные по интенсивности баланса в 1996–1998 гг. свидетельствуют о том, что низкий уровень применения удобрений и культуры земледелия вновь ведет к истощению почвенного плодородия. Отрицательный баланс по азоту (2,7–15,6 кг/га) соответствует потерям этого элемента от 0,05 до 0,3 мг/100 г почвы в год. Истощение почвы по фосфору при балансе – 1,5–6,5 мг/га составит 0,02–0,1 мг/100 г почвы в год, по калию от 0,3 до 0,7 мг/100 г почвы. Следовательно, в течение 5–10 лет производство сельскохозяйственных культур без применения удобрений приведет к снижению содержания элементов питания в почве до уровня их в 1965–1970 гг.

Содержание подвижных форм фосфора и калия, величины рН к 1990 г. приблизилось к оптимальному. Так в районах нечерноземной зоны содержание подвижного фосфора колебалось от 13,0 мг/100 г до 17,0 мг/100 г при оптимальных значениях 15,0–25,0 мг/100 г почвы. Средневзвешенное содержание подвижного калия достигло 12,8–15,4 мг/100 г почвы при оптимальных значениях 15,0–25,0 мг/100 г.

В районах степи средневзвешенное содержание фосфора составляло 12,1 мг/100 г при оптимальном 10,0–15,0 мг/100 г почвы (по Чирикову). В сухостепной зоне средневзвешенное содержание подвижного фосфора к 1990 г. составило 2,9 мг/100 г (по Мачигину) при оптимальном 3,0–4,5 мг/100 г.

За годы интенсивной химизации благодаря систематической и планомерной работе по повышению плодородия почв доля пашни с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора за 20 лет сократилась до 21% или более чем на 30 млн га. Достигнутый уровень почвенного плодородия дал возможность предотвратить резкое снижение урожайности, которого можно было ожидать в последующие годы при практически полном прекращении применения удобрений.

Расчеты азотного баланса, сделанные в разное время рядом авторов показали, как правило, его дефицитность. Азотный баланс в земледелии СССР, составленный Д.Н. Прянишниковым для последних лет довоенного периода, также сводился с острым дефицитом.

Представляют большой интерес данные, полученные в Харьковском институте сельского хозяйства и Украинском НИИ почвоведения. Характерно, что за 100 лет сельскохозяйственного использования черноземов содержание P_2O_5 в них уменьшилось на 5,5%, тогда как запасы гумуса и азота резко уменьшились (табл. 102).

Таблица 102

Влияние длительности использования чернозема на содержание (%) в нем гумуса, азота, фосфора в слое 0–25 см (Соколов, Власюк и др., 1963)

Показатели	Целина	Пашня		
		Возраст пашни, лет		
		12	37	100
Гумус	8,0	7,5	6,4	5,0
Азот	0,49	0,46	0,37	0,30
P_2O_5	0,18	0,18	0,17	0,17

Учитывая естественное плодородие почв И.В. Тюрин (1937) предложил дифференцированное решение задачи поддержания и регулирования азотного баланса в земледелии. В нечерноземной полосе, на территории которой преобладают бедные азотом почвы подзолистого типа, должна проводиться установка на поддержание бездефицитного и даже положительного азотного баланса.

В черноземной полосе И.В. Тюрин считал возможным использовать природные запасы азота в черноземах, мобилизуя их посредством агротехнических приемов обработки. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что ставка на расходование природных запасов азота черноземов должна рассматриваться как временная и вынужденная мера. Еще Д.Н. Прянишников (1945) отмечал, что период «азотного эльдорадо» уходит в прошлое и что на черноземах, особенно в западной их части стали необходимы те же мероприятия для разрешения азотной проблемы, что и в северной нечерноземной полосе.

Анализ состояния баланса основных элементов, проведенный С.А. Шафраном (2000) за 1971–1990 гг. показал, что за этот период самое

высокое поступление азота было на дерново-подзолистых почвах Европейской части России, а наиболее низкое – на каштановых. Положительный баланс азота отмечался и на серых лесных почвах, но был ниже в 1,7 раза, чем на дерново-подзолистых. На черноземах и каштановых почвах баланс азота за указанный период оказался близким к уравновешенному: на черноземах – положительный (115%), на каштановых – отрицательный (98%).

Изменение баланса азота в земледелии России произошло в связи с динамикой применения азотсодержащих удобрений. До 1975 г. вынос азота урожаями превышал его поступление в почву с минеральными и органическими удобрениями. С развитием химизации применение азота в течение трех последующих пятилеток стало превышать его вынос урожаями (табл. 103).

Таблица 103

Баланс азота в земледелии России, кг/га пашни в среднем за год

Годы	Поступление с удобрениями			Вынос урожаями	Баланс	Возмещение выноса, %
1966–1970	10	9	19	31	–12	61
1971–1975	18	12	30	33	–3	91
1976–1980	23	16	39	36	3	108
1981–1985	29	20	49	29	20	169
1986–1990	36	20	56	34	22	165
1991–1995	16	10	26	34	–8	76
1996–2000	8	4	12	33	–21	36
2001–2005	7	2	9	30	–21	30
2006–2010	10	4	14	33	–19	42
2011–2015	10,2	2,7	12,9	39,6	–26,7	33
2016	11,8	2,9	14,7	46,0	–31,3	32

Увеличение уровня применения азотных удобрений не всегда сопровождалось адекватным приростом урожайности. Вследствие этого возрастали потери азота, вызываемые вымыванием, денитрификацией и эрозией почв, снижалась окупаемость и степень его использования урожаем.

Если в 1966–1970 гг. коэффициент использования (разностный) в среднем по Нечерноземной зоне составил 0,6, то в 1986–1990 гг. снизился до 0,3–0,4. В этом случае большая часть азота оставалась неиспользованной и образовывала «переходящий запас», что влекло за собой накопление минерального азота в почве. Результаты диагностического обследования, ежегодно проводимого Агрохимслужбой, показали, что средний запас минерального азота в слое 0–60 см дерново-подзолистой почвы составил в 1982–1990 гг. 130 кг/га и соответствовал оптимальному уровню питания большинства культур. В отдельных случаях этот запас достигал 300–400 и более кг/га. Это вызывало полегание зерновых культур, повышение содержания нитратов в растениеводческой продукции и загрязнение грунтовых и поверхностных вод нитратами. Так, по данным ВНИПТИХИМ за семь лет наиболее интенсивного применения удобрений 31–65% образцов проанализированной агрохимической службой продукции превышало ПДК по содержанию нитратов. В то же время, вследствие большой пестроты в обе-

спеченности различных полей азотом, ежегодно 70–80% площадей озимых зерновых культур в России нуждались в ранневесенней азотной подкормке.

В 1990-х гг. применение азотных удобрений резко сократилось и продолжает оставаться на низком уровне до настоящего времени. Поэтому, ни о каком загрязнении продукции, почвы и воды говорить не приходится. Ежегодный дефицит азота составляет в среднем 20–22 кг/га или заметно больше, чем 30–40 лет назад (табл. 104).

Таблица 104

**Применение азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры
урожая 2006 г. в Российской Федерации**

Культура	Удобренная площадь	Внесено, кг/га		Доля внесения N от NPK, %
		посевной площади	удобренной площади	
Всего	33,8	16,5	48,8	60,3
Зерновые (без кукурузы)	41,3	19,2	56,8	63,2
Пшеница	44,2	22,3	50,4	65,1
Рис	88,8	86,1	96,9	70,5
Кукуруза на зерно	64,0	39,0	60,9	59,0
Сахарная свекла	86,9	106,5	122,6	43,6
Лен-долгунец	–	9,4	–	24,8
Подсолнечник	–	6,1	–	37,7
Картофель	76,4	65,2	85,3	30,7
Овощи	58,9	60,4	102,5	38,0
Бахчевые	5,3	3,3	62,3	75,0
Кукуруза на силос и зеленый корм	41,4	28,3	68,4	71,2
Сеяные травы (однолетние и многолетние)	15,1	6,4	42,4	83,2

Это означает, что значительная часть урожая формируется за счет ресурсов почвы и если их не восполнять, то рано или поздно это приведет к обеднению почв не только минеральным азотом, но и гумусом. В первую очередь это касается зерновых и кормовых культур, под которые азотные удобрения вносятся в наименьшем количестве в расчете на 1 га посевной площади. Так, дефицит азота при возделывании зерновых культур в 2006 г. составил более 20 кг/га, при этом вынос азота урожаями компенсировался внесением минеральных и органических удобрений только на 52% (табл. 103). По-иному складывается ситуация при возделывании культур, у которых закупочные цены значительно выше по сравнению с зерновыми культурами и поэтому затраты, связанные с применением удобрений, лучше окупаются стоимостью прибавки урожая. Сюда относятся сахарная свекла, картофель и овощи. Под них в 2006 г. было внесено в 3–5 раз больше азотных удобрений, что позволило полностью или почти полностью восполнить вынос азота урожаями.

Потребность земледелия России в минеральных удобрениях на 2010 г. в расчете на получение намеченных объемов производства сельскохозяйственной продукции составляла 8,46 млн т или почти 50% приходится на азотные удобрения (табл. 105).

Таблица 105

Баланс азота при возделывании основных культур в России в 2006 г.

Культура	Урожай, ц/га	Внесено с удобрениями, кг/га			Вынос урожаями, кг/га	Баланс, кг/га	Возмещение выноса, %
		минеральными	органическими	всего			
Зерновые	16,0	19,2	4,7	23,5	45,0	-21,5	52
Сахарная свекла	325	106,5	12,0	118,5	145,2	-26,7	82
Картофель	130	65,2	31,5	96,7	76,7	20	126
Овощи	179	60,2	12,0	72,2	71,6	0,6	101

Потребность в азоте зерновых культур для получения 120 млн т зерна равна 2,4 млн т, что в 3 с лишним раза больше по сравнению с современным уровнем.

Таблица 106

Потребность земледелия России в минеральных удобрениях на 2010 г., млн т

Элемент питания	Потребность для планируемых урожаев	Поступление с органическими удобрениями	Поступление биологического азота	Потребность в минеральных удобрениях
Азот (N)	5,78	0,68	0,9	4,20
Фосфор (P ₂ O ₃)	1,53	0,34	–	1,19
Калий (K ₂ O)	3,75	0,68	–	3,07
Всего	11,06	1,70	0,9	8,46

Применение азотных удобрений в указанном количестве обеспечит уравновешенный баланс в земледелии страны, что наряду с получением запланированного урожая дает возможность сохранить почвенное плодородие на достигнутом уровне и получить на каждый затраченный рубль не менее двух рублей прибыли (табл. 106).

В период наиболее интенсивного применения удобрений, благодаря превышению поступления фосфора в почву над его выносом урожаем, происходило планомерное увеличение содержания подвижных фосфатов в почвах России.

Исследованиями установлено (Сдобникова, Илларионова, 1979; Касицкий, Карцева и др., 1986; Христенко, 1993), что затраты фосфора на повышение содержания подвижных форм фосфатов в пределах одной почвенной разности могут изменяться в зависимости от интенсивности баланса фосфора. С повышением интенсивности баланса возрастают затраты фосфора, необходимые для изменения содержания подвижных фосфатов в почве на 1 мг/100 г, повышаются темпы обогащения почв фосфором, но коэффициент использования из удобрений снижается. Поэтому высокая интенсивность баланса фосфора и высокие темпы повышения содержания его подвижных форм целесообразны только на почвах, бедных подвижным фосфором. При достижении оптимального фосфатного уровня почв возможно значительное

снижение интенсивности баланса и доз фосфорных удобрений, а в дальнейшем уравновешенный баланс фосфора недостаточен для поддержания в почве созданного уровня подвижных фосфатов.

С.А. Шафран (1998) и В.Г. Сычев (2000, 2000₁, 2003) отмечают, что баланс фосфора за 1971–1990 гг. оказался положительным на всех типах почв, но если на дерново-подзолистых почвах он составлял 442%, то на каштановых всего 148%. Благодаря положительному балансу наметилась устойчивая тенденция накопления подвижного фосфора как в дерново-подзолистых, так и в серых лесных почвах. На черноземах и каштановых почвах увеличение содержания фосфора за данный период было значительно меньшим.

За 25 лет в этот период было внесено сверх выноса около 300 кг/га фосфора, которые остались в почве, поскольку фосфаты в отличие от азота не способны вымываться в нижележащие горизонты и грунтовые воды, а также улетучиваться в атмосферу в газообразной форме. Такого количества фосфора достаточно для получения 20 ц/га урожая зерновых культур в течение 25–30 лет, если не вносить фосфорсодержащие удобрения.

Начиная с 1995 г. баланс фосфора в земледелии страны стал складываться с превышением выноса над внесением, наметилась определенная тенденция снижения содержания подвижных фосфатов в пахотных почвах, хотя и не столь очевидно, как ожидалось ранее. Увеличилась доля почв низкообеспеченных и снизилась достаточно обеспеченных подвижным фосфором (табл. 107).

После 1990 г. начался резкий спад в производстве и, особенно в применении фосфорных удобрений. Если в 1990 г. было произведено 4 млн т фосфорсодержащих удобрений, то в 1995 г. менее 1 млн т. В дальнейшем выпуск фосфорных удобрений увеличился до 2,8 млн т, а их применение осталось на крайне низком уровне (табл. 108), так как почти 90% произведенных удобрений вывозится за рубеж.

Таблица 107

Динамика содержания подвижного фосфора в пахотных почвах России, %

Годы	Недостаточно обеспеченные*	Достаточно обеспеченные**
1971	84,2	15,8
1976	79,7	20,3
1981	76,4	23,6
1986	69,9	30,1
1991	61,5	38,5
1996	55,2	44,8
2001	55,7	44,3
2006	57,0	43,0
2010	59,1	40,9

Примечание: * – очень низкое, низкое и среднее содержание; ** – повышенное, высокое и очень высокое содержание.

Таблица 108

**Производство и применение фосфорсодержащих минеральных удобрений
в России (в действующем веществе)**

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Производство, млн т	2,5	2,5	2,6	2,8	2,8	2,8	2,8	–
Применение, млн т	0,25	0,32	0,32	0,33	0,34	0,37	–	–
Доля примененных удобрений от произведенных, %	10	13	12	12	12	13	–	–
Внесено на посевной площади, кг	2,9	3,8	4,0	4,2	4,4	4,8	4,8	–

В настоящее время на каждый гектар посевной площади вносится 3–5 кг P_2O_5 , что ниже уровня 60-х гг. XX в. Применение фосфора в таком количестве не может оказать существенного влияния на повышение урожайности сельскохозяйственных культур в масштабе всей страны и позитивно повлиять на обеспеченность почв подвижным фосфором. Ситуация усугубляется еще тем, что минеральные удобрения вносят в настоящее время только на одной трети посевных площадей, а остальная их часть остается неудобренной.

С 1996 г. баланс фосфора в земледелии страны стал отрицательным, то есть его вынос урожаями превышает поступление в почву с минеральными и органическими удобрениями (табл. 109).

При этом разница между внесением и выносом фосфора увеличилась и составила 5–8 кг/га против одного в 1966–1970 гг. В приходной части баланса поступление P_2O_5 с минеральными удобрениями играло главенствующую роль и составляло 60–77%, причем наибольшая доля относилась к периоду апогея химизации. Вместе с тем роль органических удобрений в балансе фосфора была довольно существенной. На каждый гектар пашни в 1980-е гг. поступало за счет данного источника 9 кг фосфора, что равноценно компенсации выноса 1 т урожая зерновых культур.

Таблица 109

Баланс фосфора в земледелии России, кг на 1 га пашни (в среднем за год)

Годы	Внесение			Вынос урожаем	Баланс
	с минеральными удобрениями	с органическими удобрениями	всего		
1966–1970	6	4	10	11	–1
1971–1975	10	5	15	12	3
1976–1980	17	7	24	13	11
1981–1985	21	9	30	12	18
1986–1990	30	9	39	15	24
1991–1995	11	5	16	12	4
1996–2000	3	2	5	11	–6
2001–2005	3	2	5	10	–5
2006–2010	4	2	6	12	–6
2011–2015	3,7	1,5	5,2	12,3	–7,1
2016	4,2	1,6	5,8	14,4	–8,7

Ситуация с балансом фосфора вызывает особую озабоченность, поскольку за последние годы вынос этого элемента урожаем превысил его поступление в почву более, чем на 12 млн т, что является предпосылкой снижения содержания подвижного фосфора в почвах.

В первую очередь это касается регионов Нечерноземной зоны, где распространены менее буферные почвы, которые быстрее по сравнению с черноземами реагируют на «сдвиг» в сторону как увеличения, так и снижения запасов подвижных форм фосфора. По данным длительных полевых опытов Геосети ВНИИА, каждые вынесенные из дерново-подзолистых почв сверх поступления 50–100 кг/га фосфора приводят к снижению содержания P_2O_5 на 10 мг/кг почвы, из серых лесных почв выносятся 80–125 кг/га, из карбонатных черноземов в зависимости от исходного содержания подвижного фосфора – 102–511 кг/га.

В России первые масштабные подсчеты баланса калия в стационарных опытах были проведены И.Г. Важениным (1953) на легких дерново-подзолистых почвах Соликамской опытной станции. Во всех случаях за период 10–15 лет опытов регистрировался отрицательный баланс калия как на вариантах NP, так и на вариантах с дополнительным внесением калийных удобрений. При этом по вариантам NP содержание обменного калия в почве существенно не менялось, а по вариантам NPK – возрастало. Позднее аналогичные результаты были зарегистрированы в многолетних полевых опытах НИУИФ и ВИУА.

Заслуживают внимания исследовательские работы с различным использованием показателей баланса питательных веществ, и в частности калия. Так, для условий Восточной Германии предложено выделять семь классов баланса калия (Richter, Kerschberger, 1992), кг K_2O /га:

1) >100 ; 2) $+60,1...+100$; 3) $+20,1...+60$; 4) $-19,9...+20$; 5) $-59,9...-20$; 6) $-99,9...-60$; 7) < -100 .

По результатам многочисленных опытов в агрохимической службе бывшей ГДР была установлена зависимость, определяющая относительные размеры урожая, которые могут быть получены на почвах с разным уровнем содержания калия (по Эгнеру–Риму) при указанном выше классе баланса калия. Так, оптимальный урожай (100%) для 7-го класса баланса может быть получен только на почвах с содержанием калия более 20 мг K/100 г почвы.

Следует, однако, сослаться на данные, полученные в многолетнем опыте с калийными удобрениями в Германии, где при отрицательном балансе калия непременно снижалось содержание подвижного калия в почве (Orlovius, 1996). Но эти данные регистрировались в севообороте с очень высокими средними урожаями (т/га): сахарная свекла – 6–9, озимая пшеница – 7–8 (зерно) и ячмень – 6–7 (зерно). В интенсивных севооборотах на черноземных почвах Болгарии только при отрицательном балансе (около 100 мг/кг почвы) снижалось содержание обменного калия в почве. На серых лесных почвах это наблюдалось при небольшом положительном балансе (Nikolova, Andres et al., 1995).

Исследованиями последних лет значительно расширилось представление ученых о многофункциональной роли калия в жизни растений и в повышении их продуктивности. Тем не менее, в нашей стране наблюдается определенная недооценка роли этого элемента в земледелии. Несмотря на

самый высокий вынос калия урожаями, применение калийных удобрений всегда отставало от азотных и фосфорных. Наибольшее количество калийных удобрений было поставлено в 1987 г. – 2,8 млн т K_2O , или в среднем 23 кг на 1 га пашни. Затем произошел резкий спад поставок калия на внутренний рынок, и в течение последних двадцати лет средняя доза K_2O составляет 1–2 кг/га (табл. 110).

Таблица 110

Баланс калия в земледелии России, кг/га пашни

Годы	Внесение			Вынос урожаем	Баланс
	с минеральными удобрениями	с органическими удобрениями	всего		
1966–1970	6	9	15	32	–17
1971–1975	10	12	22	34	–12
1976–1980	16	16	32	36	–4
1981–1985	17	20	37	37	0
1986–1990	20	21	41	44	–3
1991–1995	7	11	18	34	–16
1996–2000	1	5	6	30	–24
2001–2005	2	4	6	31	–25
2008	3	4	7	42	–35
2006–2010	2	4	6	36	–30
2011–2015	2,3	2,9	5,2	40,7	–35,4
2016	2,6	3,2	5,8	46,5	–40,7

За последние годы по расчетам, проведенным во ВНИИАгрохимии имени Д.Н. Прянишникова, баланс калия претерпел существенные изменения и во всех экономических районах стал резко отрицательным. Это неминуемо сказалось на снижении плодородия почвы. Сравнение результатов баланса калия в земледелии ряда регионов с динамикой содержания подвижного калия в почве (по Кирсанову), определяемым агрохимслужбой, позволило установить, что в результате сокращения использования удобрений в наибольшей степени пострадали районы с легкими почвами. Значительно меньший ежегодный вынос калия в зонах с преимуществом этих почв приводил к большему истощению плодородия, чем в зонах с преимуществом тяжелых почв.

Ежегодный дефицит калия в земледелии страны варьирует от 16 до 30 кг/га, что в сумме за 20 лет составляет около 500 кг/га. Другим немаловажным источником калия являются органические удобрения, вклад которых в природную часть баланса достаточно существенен. Однако в настоящее время, когда поголовье скота в России значительно сократилось, поступление калия в почву за счет данного источника снизилось в 5 раз и мало повлияло на снижение дефицита калия в земледелии страны.

Как известно, систематическое превышение выноса K_2O над его поступлением рано или поздно приведет к деградации почв. В первую очередь это касается менее буферных дерново-подзолистых почв, содержание подвижного калия в которых уже заметно уменьшилось.

После 1990 г. баланс калия в Нечерноземной зоне страны стал дефицитным. В результате в северотаежной зоне средневзвешенное содержание подвижного калия за 10 лет снизилось со 128 до 91 мг/кг, а доля пашни с низкой обеспеченностью K_2O возросла с 21 до 29%. Аналогичная картина наблюдалась среднетаежной, южнотаежной и даже лесостепной зонах (Сычев, 2000). Подобная ситуация отмечена в областях бывшего Центрального экономического района, где средневзвешенное содержание K_2O в целом по району уменьшилось со 123 мг/кг до 111 мг/кг. Доля почв с низкой обеспеченностью K_2O возросла с 25 до 35%, а с высокой – сократилась с 18 до 13% (Шафран, 2004). Еще более заметны негативные тенденции на примере отдельных административных районов. Так, в Пековском районе Тверской области содержание подвижного калия снизилось со 100 до 75 мг/кг, а в Спировском со 119 до 80 мг/кг, то есть из средней группы обеспеченности перешли в низкообеспеченную (Фирсов, 2011).

На более буферных почвах, характеризующихся высоким содержанием калия (черноземы, каштановые почвы) допустим дефицит K_2O , который оправдан с экономической и экологической точек зрения до определенного предела. Дальнейшее увеличение дисбаланса калия влечет за собой снижение урожайности и качества продукции, а также действие других агрохимических приемов (азотных удобрений, известкования, мелиорации, ирригации) (Прокошев, Дерюгин, 2000).

Рядом длительных полевых опытов показали, что при систематическом применении минеральных удобрений с превышением выноса K_2O над его поступлением в почву калий переходит во второй минимум после азота, опережая фосфор. Такая картина наблюдалась не только на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, но и на черноземах. Так на обыкновенном черноземе в севообороте через 18 лет в первом минимуме по-прежнему остался азот, во второй минимум на посевах кукурузы и озимой пшеницы вместо фосфора перешел калий, так как при достигнутом уровне подвижного фосфора эффективность фосфорных удобрений стала значительно ниже в сравнении с исходным уровнем (Чичкин, 1999).

Таким образом, за последние 20 лет наметилась устойчивая тенденция снижения содержания подвижного калия в почвах России.

Следовательно, потребность во внесении калийных удобрений возрастает. Задача ученых Географической сети опытов ВНИИА состоит в выявлении наиболее эффективных условий применения калийных удобрений и разработке на этой основе рациональных систем их использования на территории страны.

Современное состояние баланса питательных веществ в земледелии России

Баланс питательных веществ в земледелии России за последнее десятилетие складывался с превышением выноса питательных элементов над их поступлением с минеральными и органическими удобрениями и воз-

вратом соломой и растительными остатками на 50–60%, а в 2014 г. – на 62%. При резком превышении выноса над поступлением многолетний отрицательный баланс за последние два десятилетия составляет по азоту – 30, по фосфору – 10 кг, по калию – 27 кг/га, в среднем 60–70 кг NPK/га за год. В 2014 г. отрицательный баланс питательных веществ увеличился до 80,8 кг NPK на 1 га посевной площади.

К настоящему времени, при резком превышении выноса над поступлением, отрицательный баланс составляет по азоту 27, по фосфору – 7 кг, по калию – 37 кг/га. Для регионов с интенсивным сельскохозяйственным производством превышение выноса над поступлением значительно выше, о чем свидетельствуют данные по Краснодарскому краю, где отрицательный баланс составляет по азоту 74, по фосфору – 14 кг, по калию – 114 кг/га.

По данным Росстата за последние восемь лет средняя урожайность озимых зерновых культур по федеральным округам Российской Федерации составила от 15,1 до 34,5 ц/га (Беличенко, Рухович и др., 2016; сайт Федеральной службы). Вынос основных элементов питания растений при таком уровне урожайности изменяется от 110 до 248 кг/га NPK (Державин, Попова, 1981). При этом современный уровень внесения удобрений по статистическим данным крайне низок. В среднем за последние восемь лет по федеральным округам было внесено от 10,5 до 84,4 кг/га действующего вещества удобрений. По разным регионам внесение удобрений компенсирует от 7,8 до 34% выноса питательных элементов.

В Центрально-Черноземном регионе России исследованиями многих авторов показано, что недостаточное внесение органических и азотных удобрений приводит к дефицитному балансу азота, фосфора и калия (Селезнева, 1973; Рудай, 1985).

Дефицитный баланс азота в земледелии Белгородской области складывался в 1964–1970 и 2000–2009 гг., что связано с низким уровнем использования удобрений. Однако его интенсивность (отношение приходной статьи к расходной, выраженное в процентах) в эти годы была вполне приемлемой – 87,8–92,2%. На протяжении 1976–1994 гг. интенсивность баланса азота составляла 128,1–162,5%, что в основном достигалось в результате использования минеральных удобрений. Сокращение использования удобрений привело к существенному ухудшению баланса азота, фосфора и калия в земледелии Белгородской области. Однако средневзвешенное содержание в почвах легкогидролизуемого азота и подвижных форм калия пока не изменилось, а подвижных форм фосфора – снизилось на 11,5% (Лукин, 2012).

Минеральные, органические удобрения, а также севообороты с включением трав решают данную проблему и обеспечивают воспроизводство показателей плодородия черноземов.

На черноземе типичном Белгородской области после двух ротаций зернотравяного севооборота баланс азота даже на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений $N_{54}P_{72}K_{72}$ стабильно положительный – 10–12 кг/га (Азаров, 2012).

Удвоение дозы минеральных удобрений позволило получить дополнительную прибавку урожайности и создало предпосылки для расширенного

воспроизводства плодородия почвы. Внесение навоза в дозе 16 т/га увеличило азотный фонд почвы. Совместное внесение органических и минеральных удобрений создавало положительный баланс азота уже при одинарных дозах удобрений.

В зернопропашном севообороте азотный фонд при органической системе удобрения был дефицитным, в органоминеральной системе удобрения при одинарных дозах (8 т/га и N_{72}) оставался неизменным, а при внесении двойной дозы навоза и одинарной дозы NPK или удвоенной дозы NPK – пополнялся. В зернопаропропашном севообороте с насыщенностью пропашными культурами 80% только при двойных дозах навоза и NPK ($N_{128}P_{144}K_{144}$) баланс азота становится слабоположительным (13–14 кг/га).

В целом для баланса азота отмечена позитивная роль многолетних бобовых трав, которые даже при умеренных дозах удобрений обеспечивают высокую продуктивность севооборота и создают условия для расширенного воспроизводства плодородия почвы.

Положительный баланс фосфора складывается как при минеральной, так и при органоминеральной системе удобрения, даже в одинарных дозах, во всех 3-х экспериментальных севооборотах. На чисто органическом фоне питания растений баланс фосфора остается дефицитным.

Почвы Белгородской области имеют достаточные валовые запасы калия, однако подавляющее большинство его находится в недоступной для растений форме. Для стабилизации и повышения обеспеченности чернозема типичного обменным калием и получения достаточного количества конкурентно способной продукции целесообразно применение умеренных доз калийных удобрений с внесением 8 т/га органических удобрений севооборотной площади.

Баланс элементов питания растений в почвах эрозионно-опасных склонов изучен в длительном опыте в Ростовской области на черноземе обыкновенном тяжелосуглинистом с мощностью почвенных горизонтов А+В от 80–90 до 35–40 см в зависимости от степени смывости почвы (Гаевая, 2015).

Исследования по определению доз удобрений, позволяющих сохранить плодородие почв и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур проведены в 1991–2014 гг. в многофакторном стационарном опыте, заложенном на склоне крутизной до 3,5–4 градусов, с комплексом гидротехнических приемов и простейших сооружений: валов-каналов и валов-террас, позволяющих снизить до безопасных пределов сток талой и ливневой воды и смыв почвы.

В течение 24-летнего периода проведены исследования показателей почвенного плодородия в зернопаропропашном (чистый пар 20%), зерноотравапаропропашном (чистый пар 10%, мн. травы 20%), зерноотравянопропашном (мн. травы 40%) севооборотах при различном уровне применения органических и минеральных удобрений с контурно-мелиоративной организацией территории и полосным размещением посевов сельскохозяйственных культур на полях севооборотов.

Установлено, что на контроле (без удобрений) и при внесении удобрений в средних дозах (навоз КРС 5 т + $N_{46}P_{24}K_{30}$ 1 га севооборотной площади) во всех севооборотах складывался отрицательный баланс элементов питания

растений. Внесение азотных удобрений в повышенных дозах (навоз КРС 8 т + $N_{84}P_{30}K_{48}$) в севообороте с 20% и 10% чистого пара позволило получить положительный баланс азота. В севообороте с 40% многолетних трав и без участия чистого пара дефицит азота составлял ПО—120 кг/га севооборотной площади. Со стоком и смывом почвы терялось от 1,5 до 8,6% общего азота от выноса с урожаем и потерь от денитрификации. Сток и смыв почвы наблюдался в 17 лет из 24. Наибольший смыв почвы, отмеченный в 1994 г., составлял 12,8 т/га в севообороте с 20% чистого пара, а наименьший – в севообороте с 40% мн. трав и без чистого пара в 1992 г. составлял 0,4 т/га.

Баланс фосфора и калия во всех севооборотах при применении минеральных удобрений в обеих дозах оказался отрицательным. Причем наибольший вынос фосфора и калия с урожаем отмечен в зернотравянопропашном севообороте с 40% многолетних трав. Потери фосфора и калия в результате стока воды и смыва почвы в два и более раза выше в севообороте с 20% чистого пара, чем там, где 40% поверхности склона защищено многолетними травами.

Анализ интенсивности баланса элементов питания показал, что даже на контрольном варианте происходило небольшое восполнение азота. Внесение удобрений в средних дозах увеличивало интенсивность баланса азота в 4–5 раз, фосфора – в 10–13 раз, калия – в 14–18 раз; в повышенных дозах – азота в 5–6 раз, фосфора – в 12–16 раз, калия – в 20–25 раз.

Использование удобрений позволило повысить продуктивность севооборотов на 13–28%. Наиболее высокая продуктивность за весь период исследований отмечена в зернотравянопропашном севообороте.

Таким образом, для того, чтобы получить продуктивность 40 ц з.е./га в севооборотах, размещенных на эрозионно-опасных склонах, и обеспечить воспроизводство плодородия почв дозы необходимо азотных, фосфорных и калийных удобрений увеличить до $N_{104-135}P_{50-70}K_{68-108}$.

Согласно нашему прогнозу, последствие ранее внесенных фосфорсодержащих удобрений может продлиться до 2030 г, если уровень продуктивности пашни сохранится. При более благоприятных погодных условиях, как например в 2016 г., вынос урожаем фосфора возрастет, что ускорит процесс обеднения почв подвижным фосфором.

При этом данный процесс коснется не только Нечерноземной зоны, но и регионов с черноземными почвами. К настоящему времени в остальной части России за последние годы доля снижения почв, достаточно обеспеченных подвижным фосфором, снизилась на 4,4%, а в Нечерноземной зоне – на 3,8%. Особое внимание следует обратить на это в Краснодарском крае, в котором ежегодно выносятся с урожаем из почвы около 50 кг/га P_2O_5 , а его компенсация не превышает 50%. Следовательно, около 25–30 кг/га ежегодно отчуждается из почвы, что ведет к снижению степени обеспеченности почв подвижным фосфором. Наиболее высокое содержание P_2O_5 зафиксировано по состоянию на 01.01.1996, равное 38 мг/кг, что относится к среднему уровню, согласно группировке, принятой в агрохимической службе России. К 2010 г. почвы края перешли в группу низкообеспеченных подвижным фосфором. Высокие урожаи зерновых культур, полученные в последней пятилетке, особенно в 2016 г., усилят дальнейшее обеднение почв фосфором.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА–УДОБРЕНИЕ–РАСТЕНИЕ»

Построение моделей динамических, имитационных и других облегчает проверку рабочих гипотез, способствует упорядочению исходных данных, помогает количественно оценить различные процессы, дает прогноз различных долгосрочных эффектов без проведения опытов.

Однако, для построения любой модели необходимы фактические результаты научных исследований – многолетних полевых опытов, материалы почвенных обследований, при этом требуется большой объем такой информации.

Информацию о влиянии агрохимических свойств почвы, доз удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур, как правило, достаточно полно характеризуют структурные взаимосвязи в системе «почва – удобрение – растение». В этом случае анализ изменений оптимума одних свойств почвы при вариации других обеспечивает возможность объективно оценить зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от различных сочетаний агрохимических свойств почвы и доз удобрений. Поэтому оптимальные показатели содержания, например, подвижных форм фосфора и калия в почве необходимо постоянно уточнять с учетом динамики их содержания в почве (Басибиков, Кулгарин, 1968; Иванов, 1985; Небольсин, Поляков и др., 2003).

Реальное представление о действии комплекса агрохимических свойств почвы, доз удобрений на результирующий признак можно получить на основе математического моделирования их взаимосвязей с использованием системного подхода в оценке наиболее перспективных комбинаций свойств почвы и доз минеральных удобрений, которые обеспечивают возможность получения максимального прироста урожайности сельскохозяйственных культур при достаточно высокой окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожайности (Пивоварова, 2005; Прошкин, 2012).

Такие исследования, оценивающие связь между количеством внесенных удобрений, уровнем плодородия почвы и другими факторами роста, прямо или косвенно влияющими на величину урожая, широко проводятся в нашей стране и за рубежом (Вараллян, 1989; Иванова, 1990; Литвак, 1990; Иванов, Сычев и др., 2012). Результаты проведенных исследований в известной мере обеспечивают решение задач, связанных с оптимизацией питания растений, повышением плодородия почв, улучшением качества сельскохозяйственной продукции, изучением круговорота биогенных элементов в земледелии, охраной окружающей среды. Эти вопросы, как правило, решаются в рамках

моделей продуктивности различной формы, учитывающих роль основных факторов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур (Савич, Сычев и др., 2007).

Построение математических моделей продукционного процесса

Математические модели делят на два класса в соответствии с оптимизационным или имитационным режимом использования (Литвак, Бабарина и др., 1990). В первом случае для заданной функции находят оптимальную стратегию, во втором – предсказывают последствия от выбора различной стратегии при заданных значениях выходных переменных (Лисовой, 2000).

Математические принципы моделирования и в том и другом случае основываются на определении структурных и функциональных зависимостей между компонентами изучаемой системы, выявлении характера внутрисистемных связей. Для описания связи факториальных признаков и резуль- тативного признака нередко используют эмпирические модели различной сложности. На основании экспериментальных данных находят аналити- ческие выражения интересующего показателя как функции от почвенных условий (агрохимических свойств почвы), от доз удобрений, а при необ- ходимости и других аргументов. Обычно эти модели представляют собой регрессионные уравнения различного типа. Чаще всего для анализа связи используется линейная множественная функция:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \Sigma$$

или полином:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + a_{11}X_1X_2 + a_{12}X_1X_3 + \dots + a_{21}X_{12} + a_{22}X_{22}$$

Вместе с тем следует отметить, что эмпирические модели характери- зуются рядом недостатков, которые ограничивают возможность их ис- пользования для прогнозирования резуль- тативного признака. Например, при использовании указанных моделей отсутствует возможность экс- траполяции результатов за пределы условий, наблюдавшихся в опытах. Следовательно, регрессионные уравнения указанного типа нуждаются в совершенствовании с позиций интерпретации результатов исследова- ний, так как их можно применять только в пределах изучаемой выборки экспериментальных данных.

Не менее важным в характеристике математических моделей является тот факт, что введение в уравнение большого количества переменных де- лает множественный регрессионный анализ зависимым от случайных из- менений какого-либо одного из факторов (Ларина, 1999). При этом сам ре- грессионный анализ становится сложным и громоздким. В качестве идеаль- ной иллюстрации этого негативного свойства можно указать на полиномы, выведенные для озимой пшеницы, ячменя и картофеля, которые включают

до 19–24 членов уравнения (Стребков, Кирикой, 1985; Стребков, Кирикой и др., 1988; Стребков, 1989; Прошкин, 2013). Естественно, что экспериментальная верификация этих моделей для различных условий в силу их огромной информативной емкости даже в блоковой раскладке весьма сложный и трудно реализуемый процесс.

Другой негативный момент состоит в том, что при разработке уравнений множественной регрессии даже при соблюдении требований минимальности набора характеристик не соблюдается условие учета формы корреляционных связей. Так, при использовании метода пошаговой регрессии в процессе выведения уравнений множественной регрессии при свертке информации исключение переменных из уравнения осуществляется с помощью коэффициентов частной линейной корреляции. Такой подход вполне допустим при выведении линейной множественной функции, но вряд ли целесообразно применять его при разработке полинома (криволинейная корреляция). Подтверждением могут служить результаты проведенного нами корреляционного анализа связи эффективности азотных удобрений с агрохимическими свойствами почвы, дозами азота в опытах с озимой рожью на дерново-подзолистых почвах Центрального округа (табл. 111) (Сычев, Шафран и др., 2009).

Таблица 111

Коэффициенты корреляции (правый треугольник), корреляционное отношение (левый треугольник) между агрохимическими свойствами почвы, дозами азотных удобрений и прибавкой урожайности озимой ржи

Показатели	Прибавка урожайности	Содержание гумуса в почве	Содержание P_2O_5 в почве	Содержание K_2O в почве	Дозы азота
Прибавка урожайности	1,00	0,29 ³	0,19 ⁵	0,42 ²	0,49 ¹
Содержание гумуса в почве	0,57 ¹	1,00	0,24 ⁴	0,06 ⁶	0,21 ⁶
Содержание P_2O_5 в почве	0,88 ¹	0,88 ¹	1,00	0,04 ⁶	0,01 ⁶
Содержание K_2O в почве	0,77 ¹	0,81 ¹	0,77 ¹	1,00	0,14 ⁶
Дозы азота	0,97 ¹	0,28 ²	0,31 ²	0,18 ³	1,00

Коэффициенты корреляции, статистически значимые:

1 – на уровне $P = 0,001$; 2 – $P = 0,010$; 3 – $P = 0,100$;

4 – $P = 0,200$; 5 – $P = 0,400$; 6 – $P =$ связь отсутствует.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что оценить взаимосвязи между агрохимическими свойствами почвы с помощью показателей линейной связи практически невозможно. Эти связи в подавляющем большинстве случаев оказались несущественными.

Вместе с тем оценка указанной связи по характеристикам криволинейной корреляции свидетельствует о наличии зависимости, как правило, сильной или средней (по тесноте связи) между агрохимическими свойствами почвы и прибавкой урожайности озимой ржи от азотных удобрений. При этом следует отметить, что характер этой связи имеет устойчивый нелинейный характер. Определение степени приближения криволинейной зависимости

к прямолинейной с использованием критерия линейности корреляции свидетельствует, что гипотеза о линейной корреляции для таких пар признаков как прибавка урожайности – содержание подвижных форм фосфора или калия в почве, прибавка урожайности – дозы азотных удобрений, содержание гумуса – содержание подвижных форм фосфора или калия в почве отвергается ($F_{\phi} > F_{0,01-0,10}$), поэтому пользоваться линейной корреляцией и регрессией нельзя, нелинейность значима на 1–10%-ном уровнях значимости.

Именно эта особенность – недопустимость использования линейной связи при решении вопроса об исключении переменных из уравнения ставит под сомнение возможность использования полинома для объективного прогноза эффективности минеральных удобрений. В данном случае азотных удобрений при применении их озимую рожь.

Таким образом, можно констатировать наличие объективных и, что очень важно статистически значимых, причин в ограничении использования линейной множественной функции и полинома для описания изменчивости прибавки урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от доз минеральных удобрений и от вариации агрохимических свойств почвы.

Динамические модели

Математические модели, как показывает практика их использования (Гончар-Зайкин, 1988; Касицкий, 1988; Сычев, Завалин и др., 2009), позволяют компактно представлять данные, проводить экспрессные расчеты и оценки. Вместе с тем использование указанных моделей не обеспечивает возможности имитировать совокупность свойств почвы в их динамическом состоянии.

Одним из перспективных направлений в решении указанной проблемы, в частности в оценке совокупности взаимосвязей изучаемой системы, является построение и использование имитационных динамических моделей (Пачепский, 1990; Силин, 1990). Их основное преимущество в том, что вид модельных уравнений, математические методы решения и определения вводимых параметров-коэффициентов неизменны для широкого круга возможных ситуаций (Ларина, 1999).

В зависимости от детализации описания системы динамические модели делятся на детерминационные (Laskowski, Swann et al., 1983; Gysi, Adrianov, 1990) и стохастические (Малкина-Пых, 1995; Подколзин, 1998). Динамические модели в отличие от эмпирических дают возможность оценить влияние агротехнических приемов интенсификации земледелия на урожайность сельскохозяйственных культур при постоянно меняющихся условиях.

В последние десятилетия прошлого века широко проводились работы по развитию динамического моделирования. В качестве иллюстрации результатов исследований можно привести матричную классификацию динамических моделей по данным Международного института прикладного системного анализа (Австрия), представленную в таблице 112.

Таблица 112

Матричная классификация динамических моделей

Уровни	T < 1 сутки	1 сутки < t < 1 год	T > 1 год
Поле	Исследование природных процессов и явлений	Мониторинг окружающей среды. Оперативное управление природными условиями в процессе сельскохозяйственной деятельности	Мониторинг долгосрочного прогноза, планирование и управление природными условиями в сельскохозяйственной деятельности
Водосбор	Исследование природных процессов и явлений	Мониторинг окружающей среды. Оперативное управление количеством водных ресурсов	Мониторинг долгосрочного прогноза, планирование и управление природными условиями в сельскохозяйственной деятельности
Регион		Исследование природных процессов и явлений	Долгосрочный прогноз, планирование и управление изменением окружающей среды в результате эффективного использования земельных и водных ресурсов

Признавая актуальность и своевременность разработки этих моделей, следует отметить и их недостатки. Например, сильное варьирование значений вводимых параметров, что, безусловно, свидетельствует о неизбежном наличии элемента случайности и, как следствие, приводит к уменьшению точности прогноза.

Другим важным недостатком динамических моделей, имеющим принципиальное значение, является их громоздкость, необходимость введения большого количества информации о погодных условиях, свойствах почвы, необходимость задействования больших объемов компьютерной памяти и, как следствие, очень большая сложность их верификации.

Кроме того, следует отметить, что вопросам агрохимии в указанных моделях уделяется крайне незначительное внимание. Так, в сводке работ, иллюстрирующих тенденции динамического моделирования (Walker, Barnes, 1981) из тридцати представленных моделей формирования урожая только в пяти рассматривались агрохимические вопросы, в том числе только в одной – применение удобрений.

В связи с этим в сложившейся ситуации исключительный интерес представляют исследования Т.Н. Кулаковской по разработке динамических моделей продукционного процесса (1965, 1978). Анализируя модели превращения органического вещества под влиянием факторов внешней среды, модели влаго- и теплообмена, работы по моделированию круговорота питательных веществ автор в своей работе приходит к выводу, что более перспективным в развитии представлений об имитирующих моделях является учет взаимообусловленности и динамичности всех свойств почвы в единой неразрывно связанной системе.

Такие интегральные модели, отражающие оптимальное сочетание свойств почвы, и указывающие главные пути их достижения разработаны ею для дерново-подзолистых средне- и легкосуглинистых почв. Они включают оптимальные значения показателей, характеризующие состояние плодородия почвы (технологические свойства, морфологические

признаки, агрохимические свойства, биологические свойства), перечень приемов, обеспечивающих достижение оптимальных свойств почвы. Несомненным достоинством предлагаемых моделей является возможность прогнозировать во времени изменения исходного состояния почв под воздействием факторов интенсификации и управлять процессами расширенного воспроизводства плодородия почв.

Вместе с тем весьма существенным недостатком этих моделей является возможность оценки влияния факторов внешней среды на продукционный процесс только при оптимальных значениях. Безусловно, это ограничивает возможность применения данной модели и ставит вопрос о необходимости совершенствования идентификационного обеспечения экспериментальным материалом разрабатываемых динамических моделей. Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование не только традиционных приемов, как, например, описание влияния факторов внешней среды, в частности агрохимических свойств почвы, на продукционный процесс в системе «почва–растение–удобрение», но и выбор концепции построения модели. То есть встает вопрос о разработке (построении) динамической концептуальной модели.

Экспертные системы и экспертно-описательные модели

Освоение современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур требует решения многих задач, связанных с оптимизацией питания растений, улучшением качества продукции, охраной окружающей среды. Одной из возможностей в решении указанных вопросов является использование экспертных систем и экспертно-описательных моделей. При этом необходимо правильно оценивать их место в агрохимических исследованиях и возможность использования в практике. С помощью экспертных систем, возможно, прежде всего, воспроизводство функций практического мышления (Литвак, Бабарина и др., 1990).

Экспертно-описательные модели служат для определения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от агрохимических, биологических и агрофизических свойств почвы. Эти модели существенно различаются по целевым функциям, информационной базе, степени формализации, математическому аппарату (Орехова, Володин и др., 1985; Рассыпнов, 1989). Их конструктивность можно оценивать лишь применительно к решаемым задачам, определяющим ареалы экстраполяции. При изменении характеристик факторов изучаемой системы возможность экстраполяции резко осложняется. Это является следствием несовместимости моделей с новой информацией о характеристике объекта. Поэтому не всегда наблюдается удовлетворительное совпадение результатов моделирования и фактических изменений объекта. Отмеченные особенности экспертных систем и описательных моделей ограничивают возможность их использования для моделирования.

Концептуальные модели

Методические принципы современного концептуального моделирования основываются на последовательном совершенствовании модели в целях более полной характеристики самой модели (Моисеев, 1984; Дурманов, 1990; Нечаев, Полев, 1991) и на соответствии сложности модели заданной точности опытных данных (Емельянов, Калашников и др., 1978). Под сложностью понимается иерархичность структуры объектов (Ларина, 1999).

В зависимости от количества вводимых параметров концептуальные модели могут быть многокомпонентные и малокомпонентные (Малкина-Пых, 1995).

Модель прогноза эффективности минеральных удобрений, по нашим представлениям, должна быть внутренне непротиворечивой, включать данные о структуре, функциях и взаимосвязях объекта, а также гипотетические представления, которые необходимо уточнять в графическом или математическом виде. На базе концептуальной модели строится математическая модель. Цель ее построения – количественная проверка правильности и взаимосогласованности представлений и данных, заложенных в концептуальную модель.

Основная задача моделирования (в данном случае эффективности минеральных удобрений) заключается в обеспечении возможности достоверно прогнозировать изменчивость прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от минеральных удобрений при любой агрохимической ситуации, то есть при вариации последней.

Схема такой модели прогноза концептуально сводится к следующему:

- изучение объекта и построение априорной модели;
- формирование исходной информации (в данном случае создание информационной базы данных по эффективности минеральных удобрений в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы и доз удобрений);
- статистическая оценка выборки исходных данных (теснота, сопряженность, значимость связи изучаемых факторов системы с результативным признаком);
- построение имитационной модели – алгоритма расчета в виде аппроксимационной формулы.

При выборе той или другой формы модели для прогнозирования продукционных процессов в зависимости от агрохимических свойств почвы следует иметь в виду, что в опытах Географической сети с удобрениями и Агрохимической службы России информация по агрохимической характеристике почв в основном представлена данными по реакции почвенной среды, содержанию в почве подвижных форм фосфора и калия, по дозам элементов минерального питания. По остальным показателям она нередко фрагментарна, что ограничивает возможность ее использования. Поэтому при построении концептуальной модели целесообразно ориентироваться на разработку малокомпонентной модели.

Сама модель может быть представлена в различной форме: графически – рисунок, алгебраически – аппроксимационной формулой. Выходную информацию целесообразнее представить в форме табличной интерпретации,

показывающей изменчивость прибавки урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы и доз удобрений.

При разработке адекватной аппроксимационной формулы необходимо иметь возможность количественно оценить вклад каждого фактора системы в формировании прибавки урожайности. Одной из возможностей решения этой проблемы является использование предложенного Т.Н. Кулаковской метода оценки комплексного влияния вариации значений показателей агрохимической характеристики почвы на эффективность удобрений путем выражения их в относительных величинах. В этом случае доля каждого из факторов системы выражается в процентах или в виде коэффициентов. Такой подход не изменяет характера изучаемых связей, заметно упрощает расчеты и позволяет оценивать вклад факторов системы в формировании прибавки урожайности.

Не менее важным условием построения объективной аппроксимационной формулы является учет взаимовлияния факторов системы в продукционном процессе. В этом случае особенности корреляционных связей могут быть использованы как теоретическое обоснование для корректного прогноза изменчивости прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от минеральных удобрений с учетом конкретной агрохимической ситуации.

В общем виде последовательность расчета с учетом особенностей влияния агрохимических свойств почвы на эффективность минеральных удобрений можно представить в виде аппроксимационной формулы. В качестве примера приведем имитационные модели, выведенные нами для прогноза эффективности фосфорных удобрений при применении под озимую пшеницу при посеве на серых лесных почвах (а) и на каштановых почвах (б):

$$а) Y = (A/P_p - B) + (b_1 * P_d - b_2 * P_d^2)$$

$$б) Y = (A/P_p - B) + (A - B * pH) + (b_1 * P_d - b_2 * P_d^2),$$

где Y – прибавка урожайности, ц/га,

A и B – параметры уравнения гиперболы,

P_p – содержание подвижных фосфатов в почве, мг/кг P_2O_5 ,

P_d – дозы фосфорных удобрений, кг/га P_2O_5 ,

pH – реакция почвенной среды,

b_1 и b_2 – коэффициенты регрессии.

Иллюстрацией принципиальной возможности использования концептуальных моделей для прогноза эффективности минеральных удобрений в зависимости от конкретной агрохимической ситуации является верификация аппроксимационных формул по прогнозу эффективности азотных, фосфорных удобрений, представленная в наших работах в виде табличной интерпретации выходной информации (Сычев, Шафран и др., 2009; Прошкин, 2010). В качестве примера в таблице 113 приведены данные по прогнозированию эффективности азотных удобрений под озимую пшеницу в зависимости от вариации содержания в почве минерального азота, подвижных форм фосфора, калия и доз азота.

Таблица 113

**Прибавка урожая озимой пшеницы от азотных удобрений
на дерново-подзолистых почвах Центрального округа**

Содержание в почве, мг/кг		Урожай без удобрений, ц/га	Дозы азота, кг/га				
			30	60	90	120	150
Низкое содержание минерального азота в почве (< 5 мг/кг)							
< 5	< 80	7,3	5,2	6,0	6,2	5,6	4,4
	81–120	9,7	6,4	7,3	7,4	6,8	5,6
	> 120	12,1	6,8	7,6	7,8	7,3	5,9
51–100	< 80	9,3	7,2	8,3	8,6	8,3	7,2
	81–120	11,2	8,4	9,5	9,8	9,5	8,4
	> 120	13,6	8,8	9,9	10,2	9,9	8,8
> 100	< 80	12,2	7,4	8,5	9,1	9,4	9,1
	81–120	14,1	8,6	9,7	10,3	10,6	10,3
	> 120	16,5	9,0	10,1	10,8	11,0	10,8
Среднее содержание минерального азота в почве (5,1–10,0 мг/кг)							
< 5	< 80	10,2	4,7	5,5	5,6	5,1	4,0
	81–120	12,9	5,8	6,6	6,7	6,2	5,1
	> 120	16,2	6,2	6,9	7,1	6,6	5,4
51–100	< 80	13,0	6,5	7,5	7,8	7,5	6,5
	81–120	15,7	7,6	8,6	8,9	8,6	7,6
	> 120	19,1	8,0	9,0	9,3	9,0	8,0
> 100	< 80	17,0	6,7	7,7	8,3	8,5	8,3
	81–120	19,7	7,8	8,8	9,4	9,6	9,4
	> 120	23,1	8,2	9,2	9,8	10,0	9,8
Повышенное содержание минерального азота в почве (> 10 мг/кг)							
< 5	< 80	14,6	3,8	4,4	4,5	4,1	3,2
	81–120	18,4	4,7	5,3	5,4	5,0	4,1
	> 120	23,2	5,0	5,6	5,8	5,3	4,4
51–100	< 80	18,5	5,3	6,1	6,3	6,1	5,3
	81–120	22,5	6,2	7,0	7,2	7,0	6,2
	> 120	27,2	6,5	7,3	7,5	7,3	6,5
> 100	< 80	24,3	5,4	6,2	6,7	6,9	6,7
	81–120	28,2	6,3	7,1	7,6	7,8	7,6
	> 120	33,0	6,6	7,5	7,9	8,1	7,9

Приведенная в таблице информация свидетельствует о том, что использование концептуальных моделей прогноза эффективности минеральных удобрений позволяет оценить не только степень влияния неоднородности агрохимических свойств почвы, но и их комплекса на формирование прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от минеральных удобрений.

Особенностью концептуальной модели и весьма важным отличием ее от моделей других классов является то, что с ее помощью можно представить комплексную картину динамики количественных характеристик прибавок урожайности в зависимости от конкретной вариации агрохимической ситу-

ации, доз элементов минерального питания, то есть от реальных возможностей хозяйства (холдинга, фермера). В свою очередь это создает предпосылки воздействия на агрохимическую ситуацию посредством оптимизации факторов, оказывающих существенное влияние на формирование прибавки урожайности. Следовательно, появляется возможность разработки комплекса мероприятий по рациональному применению минеральных удобрений.

Одним из достоинств концептуальной модели является, прежде всего, ее относительная простота, возможность аналитического решения поставленной задачи (оценка влияния комплекса факторов на производственные процессы, выявление роли отдельных аргументов системы в формировании прибавки урожайности, оценка тесноты связи аргументов системы с резульативным признаком).

Изучение условий эффективного использования минеральных удобрений в настоящее время включает не только полевые исследования, но и структурную, логическую организацию полученных данных в виде моделей различных классов.

Сравнительная оценка моделей выявила преимущество концептуальной модели. Ее достоинством является возможность представить комплексную картину динамики количественных изменений прибавок урожайности в зависимости от вариации значений агрохимических показателей и доз питательных веществ. Концептуальная модель характеризуется относительной простотой, возможностью аналитического решения задачи по оценке влияния комплекса факторов на производственные процессы.

Таким образом, аналитический обзор литературных сведений о возможности прогноза эффективности минеральных удобрений с помощью современного концептуального моделирования позволяют быстро и с достаточной точностью в зависимости от предъявляемых требований решать важные задачи прикладных исследований. Для разработки моделей прогноза эффективности минеральных удобрений нами был использован вышеизложенный метод.

Моделирование оптимальных параметров свойств почв

К настоящему времени накоплен обширный материал по количественной оценке всей совокупности основных свойств почв и их влияния на продуктивность земледелия.

Наукой разработано большое количество моделей прогноза эколого-экономических и почвенных систем в глобальном, региональном и локальном масштабах (Шишов, Дурманов и др., 1991; Каштанов А.Н. и др., 1996; Нельсон, Сычев и др., 2000).

Л.Л. Шишов (1982), Л.Л. Шишов и И.И. Карманов и др. (1987) отмечают, что под моделью плодородия почв следует понимать совокупность агрономически значимых свойств и почвенных режимов, отвечающих определенному уровню продуктивности растений. Такое определение позволяет выделять модели почв различных уровней плодородия (в том числе очень высокого, высокого и среднего). Следует подчеркнуть, что в совокупность агрономически значимых свойств должны включаться, наряду с агрохими-

ческими показателями (чем обычно ограничиваются при характеристике оптимальных параметров и прогнозировании урожайности), морфологогенетические особенности почв, показатели их физического состояния, минералогические свойства и др. Иными словами изучение плодородия почв в системе разработки почвенных моделей следует поднять на уровень современных возможностей аналитических инструментальных исследований.

Важным теоретическим положением моделирования плодородия почв являются представления о модели как образе почв различных классификационных уровней, характеризующихся теми нормативными количественными показателями, которые являются диагностическими в генетической классификационной системе.

Модели плодородия антропогенно нарушенных почв должны существенно (а для ряда почвенных типов и радикально) отличаться от моделей их целинных аналогов. Особенно справедливо это для почв, освоение которых сопровождается резкими нарушениями почвенного профиля, – солонцов и других почв, измененных плантажированием, планировками при строительстве оросительных систем и т. д. При составлении моделей плодородия почв необходимо учитывать, что почва является сложно организованной иерархической системой, дифференцированной как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном.

Модели плодородия почв не следует понимать только как почвенные модели, независимые от возможностей произрастания и продуктивности растений. Модели плодородия почв должны соответствовать определенным сельскохозяйственным культурам или группам культур, то есть быть по существу моделями плодородия агроэкосистем. Система почва–растение единая, и кинетика жизни растений находится в единстве с сезонной кинетикой свойств почв и факторами почвообразования.

При интенсификации земледелия возрастает не только число регулируемых параметров среды, но и сложность их оптимизации. При этом изменяются и критерии оптимальности технологии возделывания сельскохозяйственных культур: наряду с урожайностью и качеством продукции все большее значение приобретают сохранение плодородия почв и защита окружающей среды в целом от загрязнения. Нельзя игнорировать даже незначительные побочные негативные последствия химизации и ирригации, так как всегда сохраняется опасность их кумуляции, в результате чего через определенное время изменения могут достигнуть критических значений.

В интенсивном земледелии меняется иерархия почвенных факторов, лимитирующих продуктивность агроценозов, и усложняется их природа. Если при экстенсивных технологиях их сравнительно нетрудно диагностировать (в первом минимуме обеспеченность влагой, азотом, фосфором), то сейчас все чаще урожайность ограничивается дефицитом того или иного микроэлемента, водно-физическими свойствами почв, избыточным содержанием в корнеобитаемом слое азота, фосфора или калия, нарушением поглощения других биогенных элементов и т. д. Естественно, что идентификация и количественная оценка лимитирующих параметров плодородия в таких случаях гораздо труднее, тем более что их значимость может меняться, на-

пример, в зависимости от условий влагообеспеченности в разные годы или от биологических особенностей отдельных сортов.

А.С. Фрид (1974) сформулировал возможные цели моделирования плодородия.

Научные: упорядочить имеющиеся знания в области плодородия, выявить недостаточно разработанные вопросы и мало изученные объекты, получить новые знания при последующем анализе моделей.

Практические: диагностика и прогноз плодородия, мониторинг, конкретизация задач хозяйственной деятельности с учетом многочисленности критериев оценки ее результатов.

Он предложил иерархическую классификацию моделей плодородия. На верхнем уровне располагаются информационные модели управления. Информационные модели представляют совокупность наших знаний об объекте моделирования, дают возможность их упорядочить. Они являются частью более широких современных информационных систем, таких как информационно-поисковые, банки данных, знаний и др. Модели управления плодородием связаны с задачами хозяйственной деятельности, поэтому должны быть практически реализуемыми и экономически эффективными. Они обязаны предусматривать возможность оптимизации управления, то есть выбор лучших стратегии и тактики достижения намеченных хозяйственных целей. Критериями оптимизации могут быть минимальные сроки, затраты, разброс во времени или некоторые компромиссные комбинации. Цели управления – получение заданной урожайности растений, повышение плодородия почв, охрана почв и окружающей среды и так далее. Следовательно, модели управления обязательно должны использовать информационные модели для выбора конечных состояний и прогноза.

Информационные модели разделяют на модели состояния плодородия (статические) и динамические. Статические модели описывают возможные состояния системы или отдельных ее компонентов. Динамические призваны отражать развивающиеся во времени процессы в системе, приводящие к переходу из одного состояния (уровня) к другому. Они обеспечивают возможность временного прогноза; для целей управления важно также, чтобы они учитывали влияние управляющих воздействий.

Модели состояния плодородия предлагается разделить на три типа: статические модели обеспеченности; статические модели круговорота, баланса вещества и энергии; модели равновесных почвенных систем (физико-химические, водно-физические и др.). Статистические модели обеспеченности описывают устойчивые во времени (многолетние или краткосрочные) связи показателей обеспеченности растений факторами жизни с показателями других компонентов системы. Этот класс моделей может быть дополнительно разделен на простые, однофакторные и комплексные, многофакторные модели с учетом взаимодействия факторов. Особенно важны статические модели круговорота и баланса вещества и энергии, относящиеся ко всей системе, хотя их можно разрабатывать и для отдельных ее компонентов. Такие модели характеризуют установившийся за многолетний период круговорот веществ и энергии при неизменном климате и управляющих воздействиях, содержат описание и оценку основных видов запасов и потоков в системе,

причем не только сельскохозяйственно полезных, но и вредных с точки зрения экономики и охраны окружающей среды. Модели равновесных почвенных систем позволяют оценить реальные и возможные запасы вещества в почве, необходимые растению.

Динамические модели условно делят на биологические, почвенные, биокосные. Они описывают рост и развитие растений, ценозов, почвенных флоры и фауны, микроорганизмов, миграцию веществ, динамику сорбции-десорбции, физических и механических свойств почвы, круговорота и баланса веществ и энергии. Причем характерное время динамических моделей плодородия – от минут и часов до многих лет.

А.С. Фрид и З.А. Прохорова (1986), изучив фактическую многолетнюю динамику содержания подвижных фосфатов в дерново-подзолистой почве в зависимости от различных антропогенных воздействий и природных факторов, построили соответствующую математическую модель, которая может быть использована для прогнозирования и при создании моделей управления плодородием почвы. Более того, возможность прогнозирования создает принципиальные предпосылки к тому, чтобы массовое обследование почв на содержание подвижных фосфатов проводить через более длительные сроки, так как основную тенденцию изменения содержания подвижных фосфатов можно получить расчетным путем, зная результаты предыдущего обследования и ежегодные дозы вносимых удобрений.

В.В. Ефремов (1982) под моделью плодородия почвы понимает совокупность ее оптимальных свойств, способствующих рациональному функционированию внутрипочвенных режимов с целью получения стабильных урожаев сельскохозяйственных культур, сохранения и повышения плодородия почвы. Она должна реализовать возможность упрощенного воспроизведения плодородия путем выявления главных свойств почвы и их взаимосвязей. Основные требования, предъявляемые к моделям плодородия почв – их нормативность, практическая значимость и репрезентативность. Такой подход положен автором в основу разработки экспертно-описательной модели плодородия чернозема типичного мощного тяжелосуглинистого на лессовидном суглинке.

Рассматривая продуктивность почв как категорию, изменяющуюся под влиянием средств интенсификации, Т.Н. Кулаковская и И.М. Богдевич (1985) классифицировали факторы, влияющие на повышение производительной способности почв. При этом выделяются две взаимосвязанные системы: система А, включающая факторы, влияющие на изменение свойств почвы, то есть на ее плодородия, и система Б – более широкая категория, отражающая продуктивность почв, где, наряду с приемами регулирования плодородия почв, выступает биоклиматический потенциал местности, обеспеченность удобрительными ресурсами, генетический потенциал растений и сортов, агротехнические условия. Воздействие средств интенсификации на группу факторов, улучшающих комплекс технологических и физико-химических свойств почв, ограничивающих урожай растений, приводит к существенно-му изменению плодородия почв, повышению степени их окультуренности до таких пределов, когда свойства почв не ограничивают потребности высокоинтенсивных культур и сортов растений. Другая группа факторов направ-

лена на поддержание и реализацию присущего данной почве плодородия. Сюда относятся системы севооборотов и обработки почвы.

Авторы предложили модель высококультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы.

Взаимосвязь между отдельными внутренними свойствами почв по ряду показателей имеет математическое описание в виде различных по степени сложности уравнений регрессии. Наибольшее влияние на свойства почв оказывают органические вещества, реакция почвенного раствора и почвенный поглощающий комплекс. Однако сложность и взаимообусловленность свойств и процессов, протекающих в почвенной среде, позволяет описать лишь некоторые динамические связи (гумус и емкость поглощения, pH и подвижность P_2O_5 , K_2O , N) при условии статического состояния других свойств почв, не участвующих в математической модели. Некоторые из них будут несущественны, но некоторые могут оказывать заметное влияние на анализируемые связи.

Полезность разработки частных математических моделей, что возможно лишь между отдельными блоками свойств почв, состоит в возможности оценить влияние тех или иных средств воздействия на плодородие почв.

Так, исследованиями авторов установлена высокодостоверная корреляционная зависимость между содержанием гумуса, общей емкостью поглощения и суммой поглощенных катионов кальция и магния. Уравнения регрессии показали, что увеличение содержания гумуса на 0,1% вызывает в среднесуглинистых почвах возрастание суммы поглощенных кальция и магния на 0,10–0,18 мг-экв, а в общей емкости поглощения – на 0,6 мг-экв/100 г почвы. На современном этапе важно на основании оптимальных значений свойств почв определить приемы, направленные на достижение оптимальных параметров.

И.И. Ельников (1985) отмечает, что важным методическим условием разработки оптимальных параметров свойств почв является научно обоснованный выбор критерия оценки оптимальности свойств почв. Основным критерием уровня почвенного плодородия считается урожай сельскохозяйственных культур. Поэтому за основу оптимизации свойств почв берутся только данные о корреляции свойств почв с урожаями сельскохозяйственных культур. Однако при оценке оптимальности свойств почв и элементов агрокомплекса возникают определенные трудности, если в качестве критерия использовать только урожай, даже учитывая его качество. Факторные опыты с удобрениями показали, что в результате взаимодействия «факторов плодородия» близкий по абсолютной величине высокий урожай одной и той же культуры может быть получен при существенно различных сочетаниях свойств почв и удобрений.

Возможность получения одинаковых величин урожая при различных комбинациях доз удобрений, свойств почв и элементов агрокомплекса создает проблему выбора той дозы и других показателей, которые следует включить в модель плодородия почвы. Трудность решения усугубляется и тем, что исследователь часто не располагает полной информацией о сочетаниях свойств почв, обеспечивающих один и тот же уровень высокого урожая. В таком случае отбор свойств почв для включения в модель плодородия проводится случайно, что может приводить к получению несопо-

ставимых данных. Поэтому, если в качестве критерия использовать только данные о продуктивности культур, возникает возможность неоднозначной оценки оптимальности свойств почв и систем регулирования их плодородия. Очевидно, при разработке критерия оптимальности свойств почв и моделей плодородия необходимо исходить из значения свойств почв для жизни растений. Значение большинства почвенно-агрохимических факторов плодородия (физические свойства почв, биологическая активность и др.) для жизни растений проявляется в основном через то, какие они создают условия для осуществления минерального питания растений по фазам вегетации, обеспечения их водой и воздухом.

Разработка оптимальных параметров на основе обобщения научных данных о влиянии различных факторов на усвоение растениями питательных веществ из почвы и удобрений является важнейшим этапом исследования. На этом этапе составляются предварительные прогнозы, которые должны уточняться с помощью специальных методов накопления исходных данных. Наиболее эффективными методами по накоплению исходных данных для выявления оптимума урожая в зависимости от различных факторов являются методы, основанные на теории планирования эксперимента. Некоторые исследователи предлагают шире использовать для оптимизации агрофизических свойств почв симметричные планы типа 3^2 , 3^3 , 3^4 или 4^2 , 4^3 . Но даже при использовании плана типа 3^4 одновременно можно изучать влияние не более четырех факторов при 3 уровнях варьирования. Дальнейшее увеличение числа изучаемых факторов ведет к серьезным трудностям в реализации опыта и подборе адекватных моделей, что делает невозможным использование этих методов для обоснования интегральных или ведущих показателей уровня плодородия почв. Решение этой задачи чрезвычайно важно, и на поисковой стадии оно должно включать для одновременного изучения влияние 30–40 свойств почв на урожай культур. Поэтому, кроме методов планирования эксперимента для оптимизации свойств почв с учетом условий минерального питания растений, широкое распространение должны получить и другие методы, основанные на использовании агрофонов длительных стационарных опытов по разработке систем применения удобрений; сопоставлении значений свойств почв и урожаев сельскохозяйственных культур на фермерских полях и близлежащих участках ГСУ с одновременной растительной и почвенной диагностикой минерального питания растений; использовании пестроты урожаев сельскохозяйственных культур и свойств почв в производственных условиях в пределах одного поля на основе почвенной карты с отображением структуры почвенного покрова и элементарных почвенных ареалов; постановке серии микрополевых опытов на основе планирования эксперимента с заданными агрофонами, отражающими последовательно изменение степени окультуренности почв одного генезиса; проведении специальных опытов на искусственных фосфорно-калийных фонах.

Л.Л. Шишов и Д.Н. Дурманов (1985), отмечают, что внедрение имитационных моделей может идти по нескольким направлениям. Так, они могут оценить различные варианты (траектории) повышения плодородия отдельных почв. Можно, например, предусмотреть целевой функцией достижение

заданного уровня параметров при разных сочетаниях ресурсов (органических и минеральных удобрений и т.п.). Такие модели облегчают в известной степени оценку альтернативных вариантов. Но, как показывает опыт, самой серьезной трудностью при построении имитационных моделей является недостаток систематизированной исходной информации, ее разрозненность или противоречивость, короткие временные ряды наблюдений. Общеизвестна уникальная ценность многолетних полевых опытов по управлению плодородием почв. Но они очень немногочисленны и репрезентативны только для ограниченных ареалов «поля экстраполяции». При этом не всегда характеристика почвенных свойств и режимов дается достаточно полно.

В конечном счете, управление плодородием сводится к достижению и стабилизации на заданном уровне всех его параметров. Сложность отражения их сопряженных изменений в рамках единой динамической модели привела исследователей к необходимости ее декомпозиции, то есть построению совокупности частных динамических моделей, решение которых осуществляется независимо друг от друга и имеет более ограниченные целевые функции. Предложены десятки таких моделей, описывающих закономерности солевого режима почв, баланса азота, фосфора или гумуса в зависимости от вносимых удобрений и т. д. Вместе с тем, авторы говорят об их информационной ограниченности, наличии ряда допущений. Даже при использовании дифференциальных уравнений, когда учитываются не только сами переменные, но и их производные, упускают объективную нелинейность многих почвенных процессов (так называемая квазилинеаризация). В явной или неявной форме, но исходя из гомогенности, автономности отдельных процессов и из положения, что между изменениями управляемой переменной и зависимой существует однозначная жестко детерминированная связь. Не всегда обращают внимание на инерционность многих процессов, запаздывание реакции почв на те или иные внешние воздействия, явления саморегуляции. Это особенно заметно при радикальных антропогенных изменениях почв, когда в короткое время меняются не только функциональные, но и структурные (морфологические) характеристики почв.

Модель прогноза урожая сельскохозяйственных культур

Модель урожая должна учитывать и правильно отражать законы незаменимости основных факторов жизни растений (питание, тепло, влага, свет), их неравнозначное влияние в разные периоды вегетации на рост культур, законы минимума, максимума, оптимума воздействия этих факторов на процесс урожая. При расчетах должны также учитываться потенциальные (биологические) возможности растений и неблагоприятные условия внешней среды. Эти факторы, согласно закону их незаменимости и равноценности, участвуют в формировании каждого элемента урожайности.

Основные законы, используемые при моделировании урожайности следующие. Принцип оптимумов, при котором оптимальные значения любого элемента урожайности образуются только при сочетании оптимальных значений величин основных элементов среды, которые обусловлены эволюци-

ей данного вида в месте его произрастания. Принцип биологических экстремумов позволяет установить биологически значимые пределы любого элемента среды. По закону Либиха (закон минимума) величина урожайности определяется фактором, находящимся в минимуме. Закон Блекмана – закон, ограничивающих факторов, при котором оптимум каждого элемента среды определяется уровнем остальных факторов в развитии. При изменении уровня одного из существенных факторов происходит изменение оптимумов остальных факторов или элементов. Таким образом, модель прогноза урожайности определяется функцией и понятием. Или урожай есть функция климата – удобрений – почвы – растения – способа ведения хозяйства.

Проанализировав факторы роста урожайности сельскохозяйственных культур не было обнаружено единого мнения о роли каждого из этих факторов на урожайность культур.

Долевое участие удобрений в зависимости от зоны колеблется от 10,4 до 36,7% и уменьшается от дерново-подзолистых почв к черноземам. Степень участия окультуренности почв составила 20,1–44,3%, увеличиваясь на черноземных почвах, что значительно ниже, чем в опытах (табл. 114).

Таблица 114

Долевое участие различных факторов в формировании урожая сельскохозяйственных культур, %(производственные условия)

Зона	Удобрение НРК	Степень окультуренности $I_{\text{опт}}$	Влияние погодных условий года
Северотаежная	34,4	21,3	44,3
Среднетаежная	36,7	23,5	39,8
Южнотаежно-лесная	30,5	20,1	49,4
Лесостепная	23,3	35,8	40,9
Степная	12,6	44,3	43,1
Сухостепная	10,4	30,5	59,1

По другим данным долевое участие различных факторов в приросте урожая составляет: минеральные удобрения – 50%, селекция – 30%, культура земледелия – 20%. Или роль удобрений в приросте урожая составляет 41%, селекция – 8%, погодные условия – 15% и прочие факторы – 31%.

По обобщенным данным полевых опытов Агрохимической службы и Географической сети, долевое участие почвенного плодородия на дерново-подзолистых почвах составляет 50–60%, серых и темно-серых лесных почвах – 73–78%, черноземах типичных – 78–82 и на черноземах обыкновенных и южных – 81–82% (Кулаковская, 1990; Христенко, 1993; Сычев, 2000).

Таким образом, анализ сопряженных данных урожайности и агрохимических свойств почв, проведенный на основании результатов полевых опытов Агрохимслужбы, показал тесную корреляционную зависимость продуктивности со степенью окультуренности почв ($r=0,53-0,57$). Наибольшая отзывчивость на улучшение комплекса агрохимических свойств отмечена у зерновых на дерново-подзолистых и серых лесных почвах ($r=0,53-0,55$). На этих почвах получены высокие ($r=0,68-0,77$) коэффициенты корреляции между урожаем картофеля и содержанием обменного калия.

Анализ количественной зависимости урожая от содержания элементов питания в почве в производственных условиях показал, что в зонах дерново-подзолистых и серых лесных почв наиболее тесную связь отмечали с величиной рН ($r=0,45-0,50$), далее идет фосфор ($r=0,30-0,50$), затем калий ($r=0,28-0,49$). В степной и сухостепной зонах коэффициенты корреляции по фосфору низкие ($r=0,25$), по калию недостоверны. Отмечена тесная корреляционная зависимость с дозами удобрений ($r=0,70-0,93$).

С 1965 по 1990 г. увеличение объемов применения минеральных и органических удобрений в России сопровождалось ростом урожайности сельскохозяйственных культур. Урожайность основных культур к 1990 г. в северотаежной зоне составляла 25,8 ц/га з.е., северотаежной – 29,0, южнотаежно-лесной – 20,1, лесостепной – 26,5, степной – 30,1 и сухостепной – 16,3 ц/га з.е.

Вместе с тем, отмечается отставание динамики роста урожайности от доз вносимых удобрений и, следовательно, увеличение их удельных затрат на единицу продукции. Дозы внесения удобрений с 1965 по 1985 г. в северотаежной зоне увеличились в 2,4 раза, урожайность – в 1,4; в среднетаежной зоне эти величины составляли соответственно 1,9 и 1,7; южнотаежно-лесной – 2,1 и 1,6; лесостепной – 3,0 и 1,2; степной – 3,8 и 1,4 и в сухостепной – 6,5 и 1,2.

За счет увеличения объемов внесения минеральных и органических удобрений возросла степень окультуренности почв во всех зонах, кроме сухостепной, на которую приходилось наименьшее количество удобрений из расчетов на 1 га пашни, так как основным лимитирующим урожайность фактором в этой зоне является обеспеченность растений влагой. Индекс окультуренности в северотаежной зоне в 1965–1970 гг. составлял в среднем 0,43; к 1990 г. – 0,53; в среднетаежной зоне эти величины составляли соответственно 0,56 и 0,83; южнотаежно-лесной – 0,40 и 0,67; лесостепной – 0,54 и 0,60 и в степной – 0,78 и 0,84.

Такое повышение уровня плодородия позволило, несмотря на резкое снижение объемов химизации, избежать катастрофического уменьшения урожайности в период с 1990 по 1998 г. В северотаежной зоне количество внесенных удобрений уменьшилось в 5,8 раза, урожайность – в 1,4 раза; в среднетаежной зоне эти величины составили 6,9 и 1,7 раза; южнотаежно-лесной – 15,5 и 1,6 раза; лесостепной – 3,6 и 1,2; в степной – 4,6 и 1,4 и сухостепной – 9,8 и 1,2 раза.

Долевое участие удобрений в формировании урожая сельскохозяйственных культур в производственных условиях в нечерноземной зоне составляет – 30,5–36,7%, лесостепной – 23,3% и в сухостепной и степной зонах – 10,4–12,6%.

Долевое участие степени окультуренности в нечерноземной зоне составляет 20,1–23,5%, в лесостепной, степной и сухостепной зонах – 30,5–44,3%.

Долевое участие погодных условий в районах Нечерноземной зоны колеблется от 39,8 до 49,4%; в районах лесостепной и степной зон – от 40,9 до 43,1%; в сухостепной зоне составляет 59,1%.

Однако несмотря на высокую степень участия в формировании урожая погодных условий, основными факторами, определяющими изменение плодородия и продуктивности севооборота, являются органические и мине-

ральные удобрения. Повысить степень окультуренности почвы без удобрений в короткие сроки невозможно. Следует подчеркнуть, что применение удобрений, особенно минеральных, более эффективно на высокоокультуренных почвах.

Следовательно, окультуривание почв позволяет свести к допустимому минимуму колебания продуктивности севооборотов.

Существует противоречие между целью получения высоких урожаев и сохранением или даже повышением почвенного плодородия. Мировой опыт сельского хозяйства доказывает, что исключить это противоречие можно лишь путем рационального применения удобрений. Это еще раз подчеркивают наши исследования.

Стоит еще раз подчеркнуть, что автор не абсолютизирует роль минеральных удобрений в повышении продуктивности земледелия, но в ближайшем будущем нет альтернативы применению минеральных удобрений как фактору повышения окультуренности почв и как следствие этого увеличению продукции растениеводства.

Вместе с тем, мы уже отмечали отставание динамики урожайности от доз вносимых удобрений. Причиной этого были лимитирующие факторы как на уровне технологий применения удобрений, так и на уровне общей экономической политики. Сказалось также отсутствие системного подхода к химизации земледелия. Примером этого могут служить интенсивные технологии возделывания зерновых культур, внедрение которых проводилось в 80-ые годы. Хозяйствами не был полностью реализован потенциал этих технологий, затраты минеральных удобрений и пестицидов во многих случаях не окупались. Сказались недостаточная техническая вооруженность, низкий уровень агротехнической дисциплины, чрезмерная концентрация удобрений на отдельных полях за счет остальных площадей и др.

Одной из причин неудач при освоении интенсивных технологий было неудовлетворительное состояние почв. При планируемом урожае зерновых культур 60–70 ц/га нужен другой, более высокий уровень почвенного плодородия, включая не только обеспеченность почв элементами питания, но и улучшение их водно-физических свойств. Вместе с тем, используя данные агрохимического обследования конкретных полей во многих случаях улучшить минеральное питание растений можно за счет его оптимизации, а не увеличением доз удобрений.

Ведущее значение в оптимизации почвенно-агрохимической системы питания растений имеет увеличение интенсивности баланса элементов питания.

В связи со снижением объемов применения минеральных удобрений встает задача рационального их использования. Для выбора оптимальных решений в области применения удобрений используют экономико-математические методы.

Функциональная зависимость урожайности от различных факторов выражается посредством производственных функций. Используемые производственные функции могут быть самые различные, но они должны отображать качественно и количественно с достаточной степенью аппроксимации анализируемый процесс формирования урожая. Для установления влияния удобрений на урожай пользуются различными функциями. Большинство

этих функций чаще всего оказываются уравнениями регрессии. При этом методе выдвигается требование, чтобы сумма квадратов отклонений фактически наблюдаемых величин была минимальной по отношению к расчетным. В настоящее время имеется большое количество исследований, где для оценки влияния различных факторов на урожай сельскохозяйственных культур применяется регрессионно-корреляционный анализ. Первоначально необходимо установить тесноту связи между урожаем и интересующими факторами. Одной из наиболее простых математических моделей описания процессов изменения степеней связи между показателями является определение парных коэффициентов корреляции (Козеичева, 2011; Швыркина, 2014).

Рабочими считаются модели, значение корреляционного отношения которых больше 0,7. В ВИУА и ВНИИА были рассчитаны производственные функции почти для всех зерновых культур, пропашных культур. Производственные функции, поскольку они отражают количественные закономерности действия удобрений и других факторов на урожай, используют для разработки нормативов и рекомендаций по применению удобрений.

Модель прогноза эффективности применения азотных удобрений

Влияние агрохимических свойств почвы, доз элементов питания на эффективность минеральных удобрений, как правило, достаточно полно характеризуют структурные взаимосвязи в системе «почва–растение–удобрения». В этом случае анализ изменений оптимума одних свойств почвы при вариации других обеспечивает возможность объективно оценить изменчивость прибавки урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от различных сочетаний агрохимических свойств почвы и доз удобрений.

Оптимальные уровни обеспеченности почвы подвижными формами элементами минерального питания в известной мере определяется сочетанием и вариацией значений различных почвенных факторов (Аникст, 1983). Поэтому оптимальные показатели содержания питательных веществ, например, подвижных форм фосфора и калия в почве необходимо постоянно уточнять с учетом динамики их содержания в почве. В связи с этим важной составляющей комплексного анализа стохастических связей в системе «почва–растение–удобрения» является системный подход к выбору наиболее перспективных комбинаций агрохимических свойств почвы и доз азотных удобрений, которые обеспечивают возможность получения максимального прироста урожайности при достаточно высокой окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожайности.

Для описания влияния вариации агрохимических свойств почвы на эффективность минеральных удобрений перспективно использование методов математической статистики. Это обеспечивает возможность характеристики изменчивости величины прибавки урожайности сельскохозяйственных

культур в зависимости от уровня обеспеченности почвы элементами минерального питания растений, доз удобрений.

Для иллюстрации указанной возможности в качестве примера проведена оценка влияния агрохимических свойств почвы на эффективность азотных удобрений при внесении под озимую рожь. В качестве информационного поля использовали материалы Географической сети опытов с удобрениями, данные Агрохимслужбы Российской Федерации и других научных учреждений при возделывании озимой ржи на дерново-подзолистых почвах Центрального округа. В работе проанализированы и обобщены данные 148 полевых опытов.

Для выявления связи между независимыми переменными и результативным признаком в опытах с удобрением озимой ржи на дерново-подзолистых почвах Центрального региона был проведен анализ корреляционной зависимости между агрохимическими свойствами почвы, дозами азотных удобрений и прибавкой урожайности озимой ржи. Результаты анализа, представлены в таблице 115.

Как общую тенденцию можно отметить наличие ясно выраженной криволинейной зависимости между факторами системы результативным признаком. Сильная, по тесноте связи, зависимость наблюдалась между прибавками урожайности озимой ржи и содержанием в почве подвижных форм фосфора и калия в почве и особенно доз азотных удобрений. Средняя по силе корреляционная связь наблюдалась между прибавкой урожайности и содержанием гумуса в почве.

Таблица 115

Коэффициенты корреляции (r), корреляционное отношение (η) между агрохимическими свойствами почвы, дозами азота и прибавкой урожайности озимой ржи

Показатели	r	уровень значимости	η	уровень значимости
Содержание в почве гумуса	0,29	0,100	0,57	0,001
Содержание в почве P ₂ O ₅	0,19	0,400	0,88	0,001
Содержание в почве K ₂ O	0,42	0,010	0,77	0,001
Дозы азота	0,49	0,001	0,97	0,001

Следует отметить, что характер связи прибавки урожайности озимой ржи от агрохимических свойств почвы, доз азотных удобрений имеет устойчивый нелинейный характер. Определение степени приближения криволинейной зависимости к прямолинейной с использованием критерия линейности корреляции свидетельствует о том, что гипотеза о линейной корреляции для таких пар признаков как прибавка урожайности – содержание подвижных форм фосфора или калия в почве, прибавка урожайности – дозы азотных удобрений, содержание гумуса – содержание подвижных форм фосфора или калия в почве отвергается ($F_{\phi} > F_{0,01-0,10}$) и пользоваться линейной корреляцией и регрессией нельзя, нелинейность значима на 1–10%-м уровнях значимости.

Использование методов математической статистики для описания влияния вариации агрохимических свойств почвы на эффективность минеральных удобрений создает предпосылки для характеристики изменчивости величины прибавки урожайности сельскохозяйственных культур в зависимо-

сти от уровня обеспеченности элементами минерального питания растений, доз удобрений. Наличие стохастических связей между соответствующими независимыми переменными и результативным признаком позволяет расчитать уравнение регрессии, характеризующее возможную зависимость прибавки урожайности от изучаемых факторов.

Имитационное моделирование позволяет выявить факториальные признаки, которые характеризуются наиболее тесными корреляционными связями с результативным признаком. Их выявление необходимо для получения представления о комплексе условий, обеспечивающих формирование максимально возможной прибавки урожая при том или другом сочетании изучаемых факторов системы.

Выбор того или иного агрохимического свойства, а также их сочетаний для описания действия факторов на формирование прибавки урожайности проводится на основе оценки тесноты, формы и достоверности связи изучаемых факторов. Исходя из изложенной выше оценки моделей различного класса для обеспечения возможно более объективного прогноза эффективности азотных удобрений описание изменчивости прибавки урожая, количественная оценка влияния агрохимических свойств почвы на результативный признак в системе «почва–растение–удобрение» проведено с использованием концептуальной модели.

Высокие значения статистических характеристик связи в изучаемой системе свидетельствуют, что при характеристике влияния факторов на формирование прибавки урожайности озимой ржи можно ограничиться общепризнанным минимумом агрохимических свойств почвы, принятыми дозами азотных удобрений и пренебречь неучтенным влиянием малозначительных признаков. Это не нарушает четкость изучаемых зависимостей, заметно упрощает расчеты и одновременно позволяет на основании системного анализа установленных закономерностей количественно оценить вклад каждого из изучаемых факторов на формирование прибавки урожайности.

В соответствии с принятой для концептуальной модели последовательностью доля участия факторов системы почва-растение-удобрение в формировании прибавки урожайности определяется как в относительном, так и количественном выражении.

Расчет относительного вклада (ОВ) выполняется по формуле:

$$ОВ = \hat{\eta}_{P_{2O5}}^2 * 100 / S(\hat{\eta}_{P_{2O5}}^2 + \hat{\eta}_{K_2O}^2 + \hat{\eta}_{Дозаазота}^2),$$

где ОВ – относительный вклад фактора,

$\hat{\eta}^2$ – индекс детерминации.

Для оценки количественного вклада (КВ) изучаемых факторов в формирование прибавки урожайности полученные характеристики соотносят с максимумом функции (МФ) изучаемого фактора:

$$КВ = МФ \times ОВ$$

Расчеты относительного и количественного вклада в формирование прибавки урожайности выполняются отдельно по каждому фактору системы: обеспеченность почвы подвижным фосфором, подвижным калием, дозы азотных удобрений.

Сведения об агрохимических свойствах почвы характеризующие уровни обеспеченности почвы подвижными формами фосфора, калия, максимумы функций приводятся в виде справочной информации. Для изучаемой выборки эти данные представлены ниже:

	Низкое	среднее	максимум функции
P_2O_5 , мг/кг	30	76	158
K_2O , мг/кг	50	100	217

Информация о количественном вкладе факторов изучаемой системы дает возможность проведения дифференцированной оценки влияния агрохимических свойств почвы, доз азотных удобрений на формирование прибавки урожайности озимой ржи. Другими словами, разработка и использование алгоритмов обеспечивает реальную возможность оценить степень влияния неоднородности почвенных свойств на формирование прибавки урожайности.

Обязательным условием при разработке алгоритмов является учет криволинейного характера связи между факториальными и результативным признаками. Особенностью такой связи является то, что увеличение значений факториального признака сопровождается, как правило, быстрым возрастанием результативного, а затем после достижения некоторого максимума, либо остается постоянным, либо начинает уменьшаться (Прошкин, 2010, 2012, 2013). В связи с этим при выведении формул расчета вклада факторов использовалась характеристика соотношения линейного и квадратичного членов уравнения параболы ($a/2b$). Поэтому в общем виде формула, характеризующая долю участия (ДУ) в формировании прибавки урожайности озимой ржи таких факторов как обеспеченность почвы подвижными формами фосфора и калия, может быть представлена следующим алгебраическим выражением:

$$\begin{aligned} \text{ДУ } P_2O_5 &= v_1 P_2O_5 - v_2 P_2O_5^2 \\ \text{ДУ } K_2O &= v_1 K_2O - v_2 K_2O^2 \end{aligned}$$

Адекватность формул может быть проверена путем сопоставления их графической формы с точечными графиками, построенных на экспериментальных точках.

Результаты расчетов, характеризующие изменчивость вклада обеспеченности почвы подвижными формами фосфора и калия в формирование прибавки урожайности в зависимости от вариации их содержания в почве (низкое, среднее, максимум функции) сводят в таблицы и используют в последующих расчетах.

Далее выполняется определение доли участия доз азотных удобрений в формировании прибавки урожайности при различной обеспеченности почвы подвижными формами фосфора и калия. Этот расчет выполняется в несколько этапов.

Первый этап. Определяется количественный вклад доз азота в формирование прибавки урожайности озимой ржи детерминированный обеспеченностью почвы подвижным фосфором, подвижным калием.

Второй этап. По фактическому материалу (доза азота – содержание элемента в почве – прибавка) выявляется оптимальная доза азота для того или иного содержания подвижных форм фосфора и калия в почве.

Третий этап. На основании данных о величине количественного вклада (первый этап) и оптимальной дозе (второй этап) выводятся формулы для определения доли участия доз азотных удобрений в формировании прибавки урожайности при низком, среднем, оптимальном (максимум функции изучаемого фактора) содержании подвижных форм фосфора и калия в почве.

Экспертная оценка изменчивости величин прибавки урожайности озимой ржи от азотных удобрений в зависимости от степени обеспеченности почвы усвояемым азотом, проведенная по материалам ВИУА, показала, что на почве с низкой обеспеченностью усвояемым азотом возможное увеличение эффективности азотных удобрений по сравнению со средней обеспеченностью характеризуется коэффициентом прироста в 1,4, а при высокой степени обеспеченности – соответственно 0,65.

Оценивая в целом предлагаемую последовательность расчета можно констатировать, что она является алгоритмом решения задачи по прогнозированию прибавки урожайности озимой ржи. Использование данного алгоритма обеспечивает возможность реализации концептуальной модели взаимосвязи и взаимодействия факторов в процессе формирования прибавки урожайности озимой ржи с обязательным учетом изменчивости характеристик комплекса агрохимических свойств почвы и применяемых доз азотных удобрений.

Результаты расчетов в соответствии с принятой последовательностью сводятся в соответствующие таблицы и в итоге представляют как выходную информацию (табл. 116).

Полученная информация обеспечивает возможность дифференцированной оценки роли факторов системы в формировании прибавки урожайности. Так, можно отметить, что оптимизация, например, только фосфатного питания растений обусловила прирост величины прибавки урожайности в зависимости от дозы азота на 2,2–3,4 ц/га, оптимизация калийного питания – на 1,3–1,43 ц/га. Одновременная оптимизация фосфорного и калийного питания растений увеличила прирост величины прибавки урожая на 3,5–4,7 ц/га по сравнению с низкой обеспеченностью почвы подвижными формами фосфора и калия.

Представление об особенностях влияния агрохимических свойств почвы на формирование урожайности на эффективность имеет исключительное значение в решении вопроса об экономном расходовании минеральных удобрений для формирования единицы урожайности. Расчеты по окупаемости азотных удобрений прибавкой урожайности озимой ржи в зависимости от доз и содержания питательных веществ приведены в таблице 117.

Под термином «окупаемость» минеральных удобрений, используемом в этой таблице, понимается величина прибавки урожайности, полученная от внесения 1 кг питательных веществ удобрений.

Как общую тенденцию можно отметить четко выраженную изменчивость окупаемости азотных удобрений прибавкой урожайности озимой ржи от вариации обеспеченности почвы элементами минерального питания. При оптимизации условий питания растений азотом окупаемость азотных удобрений уменьшается более чем в 2 раза, а при оптимизации условий фосфорного и калийного питания она увеличивается на 60–73 и 22–33% соответственно.

Таблица 116

Прибавка урожая озимой ржи от азотных удобрений в зависимости от доз и содержания питательных веществ в дерново-подзолистых почвах Центрального округа, ц/га

Содержание в почве, мг/кг		Урожай без удобрений, ц/га	Дозы азота, кг/га					
			30	60	90	120	150	180
Среднее содержание минерального азота в почве								
Низкое	Низкое	8,0	2,7	3,3	3,8	4,0	4,1	4,0
	Среднее	9,7	3,4	4,0	4,5	4,7	4,8	4,7
	Повышенное	12,2	4,0	4,7	5,1	5,4	5,5	5,4
Среднее	Низкое	10,7	4,0	4,8	5,4	5,8	6,0	6,0
	Среднее	12,4	4,7	5,5	6,1	6,5	6,7	6,7
	Повышенное	15,0	5,3	6,2	6,8	7,2	7,4	7,4
Повышенное и высокое	Низкое	14,0	4,9	5,8	6,5	7,0	7,3	7,4
	Среднее	15,7	5,6	6,5	7,2	7,6	8,0	8,1
	Повышенное	18,2	6,2	7,1	7,8	8,3	8,6	8,7

Таблица 117

Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожайности озимой ржи в зависимости от доз и содержания питательных веществ в дерново-подзолистых почвах, кг/кг

Дозы азота, кг/га	Содержание в почве		
	низкое	среднее	повышенное и высокое
Минеральный азот			
30	22,0	15,7	10,3
60	12,8	9,2	6,0
90	9,4	6,8	4,4
120	7,6	5,4	3,5
150	6,3	4,5	2,9
180	5,2	3,7	2,4
Подвижный фосфор			
30	11,3	15,7	18,7
60	6,7	9,2	10,8
90	5,0	6,8	8,0
120	3,9	5,4	6,3
150	3,2	4,5	5,3
180	2,6	3,7	4,5
Подвижный калий			
30	13,3	15,7	17,7
60	8,0	9,2	10,3
90	6,0	6,8	7,6
120	4,8	5,4	6,0
150	4,0	4,5	4,9
180	3,3	3,7	4,1

Примечание: данные по окупаемости азотных удобрений приведены при элиминировании среднего содержания сравниваемых показателей агрохимической характеристики почвы.

Комплексная оценка окупаемости азотных удобрений с учетом агрохимических свойств почвы, уровня планируемой урожайности позволяет выделить поля, на которых возделывание озимой ржи с применением азотных удобрений обеспечит максимальную агротехническую и экономическую эффективность, планировать применение азотных удобрений для конкретных полей с объективной оценкой их экономического эффекта.

Таким образом, можно констатировать, что внесение азотных удобрений на фоне фосфорно-калийных на дерново-подзолистых почвах Центрального округа является необходимым агрохимическим приемом при возделывании озимой ржи. Диапазон колебаний прибавки урожайности озимой ржи от азотных удобрений может быть значительным. Этот разброс обусловлен изменчивостью обеспеченности почвы элементами минерального питания, дозами азотных удобрений. Поэтому для каждой дозы азота необходимо подбирать свое сочетание агрохимических свойств почвы, которое обеспечит возможность получения при данной агрохимической ситуации максимального эффекта от применения минеральных удобрений.

Статистический анализ изменчивости прибавки урожайности озимой ржи в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы показал, что перспективным решением при оценке влияния совокупности агрохимических свойств почвы, доз азотных удобрений на процессы формирования прибавки урожайности озимой ржи является использование алгоритма решения задачи, представляющего концептуальную модель прогноза эффективности азотных удобрений.

Модель прогноза эффективности применения фосфорных удобрений

Свойства почвы влияют на растения не однозначно. К одним и тем же свойствам при равном их количественном выражении растения относятся неодинаково на разных по генезису почвах (Сычев, 2003). В связи с этим, несомненно, важно оценить характер влияния содержания в почве гумуса, подвижных форм фосфора и калия, реакции почвенной среды, доз фосфора на эффективность фосфорных удобрений, статистически оценить значимость изучаемых зависимостей и соответственно достоверность изменчивости результативного признака (прибавки) от вариации агрохимических свойств почв применительно к различным типам почв.

Для решения поставленной задачи в качестве информационного поля использовали материалы Географической сети опытов с удобрениями, данные Агрохимслужбы Российской Федерации и других научных учреждений, в которых в условиях различной агрохимической ситуации, то есть при разных уровнях обеспеченности почвы подвижными формами питательных веществ, различной реакции почвенной среды и дозах фосфора развевывались опыты с дозами фосфора.

Объектом исследования выбраны озимая и яровая пшеница. В работе проанализированы и обобщены результаты полевых опытов с удобрением озимой и яровой пшеницы на различных почвах Европейской части России, Уральском, Сибирском округах. Для статистического анализа использовались сводки экспериментальных данных состоящих соответственно из 20...250 строк, то есть измерений прибавки урожайности пшеницы и такого же количества измерений значений каждого из изучаемых факторов: содержание в почве гумуса, подвижного фосфора, подвижного калия, показатель реакции почвенной среды, доз фосфора.

Влияние изучаемых факторов системы: почва – удобрения – прибавка урожая на изменчивость результативного признака оценивалась коэффициентом корреляции (r) и корреляционным отношением (h), выражающих тесноту (силу) связи между расчетными и экспериментальными значениями выходной величины; по коэффициенту детерминации (d_{yx}) и индексу детерминации (h^2) оценивалась доля изменчивости выходной величины, которая обуславливается колебаниями изучаемых факторов. Возможность использования линейной или криволинейной корреляции для описания связи факторов системы определялась по степени приближения криволинейной зависимости к прямолинейной по критерию линейности корреляции (F). Изменчивость числовых значений изучаемых факторов (признаков) оценивалась по коэффициенту вариации.

Анализ закономерностей распределения значений признаков в изучаемых выборках свидетельствует о нормальном распределении частот совокупности результатов наблюдений и, следовательно, о возможности использования общепринятых статистических характеристик для описания существенных особенностей эмпирических распределений и выяснения основных закономерностей варьирования результатов наблюдений. На рисунках 27 и 28 в качестве примера, подтверждающего отмеченную возможность, приведены гистограммы и кривые распределения частот прибавки урожайности яровой пшеницы от фосфорных удобрений при оптимизации показателей рН, содержания подвижного фосфора в почве. Поэтому перспективным направлением в этом случае является использование параметрических критериев, описывающих изменчивость показателей прибавки урожайности с помощью статистических характеристик в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы. Это позволит получить представление не только о направлении связей, их тесноте, доли изменчивости результативного признака, обусловленного вариацией агрохимических свойств почвы, но дать этому количественную оценку, оценить достоверность связей.

Статистический анализ зависимости эффективности фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницу от реакции почвенной среды свидетельствует о различном характере связи между этими признаками, который, по-видимому, в какой-то мере определяется как особенностями культур, так и типом почв, погодными условиями региона.

Для озимой пшеницы при возделывании ее на дерново-подзолистых (Центр), серых лесных почвах (Центр, Приволжье), черноземах оподзоленных и выщелоченных (Центр) изменчивость прибавки урожайности в зависимости от вариации степени кислотности почвы целесообразнее описывать с использованием характеристик криволинейной корреляции.

На дерново-подзолистых, серых лесных почвах, судя по тренду, изменчивость прибавки от фосфорных удобрений при различных значениях показателей рН хорошо иллюстрируется кривой типа гиперболы, на черноземах оподзоленных и выщелоченных – кривой типа параболы. Причем во всех без исключения случаях гипотеза о линейности отвергается ($F_{\phi} > F_{\tau}$). Нелинейность значима на 1%-м уровне.

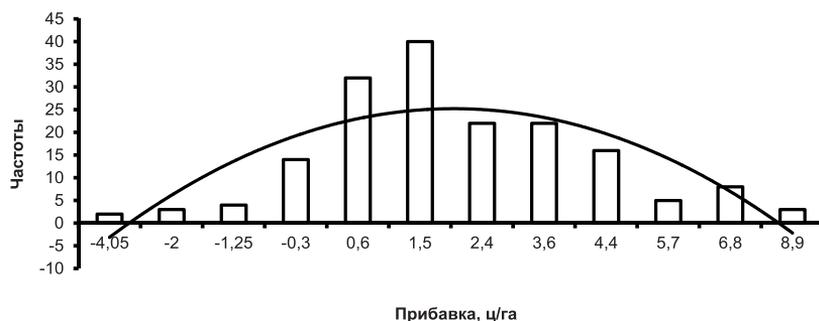


Рис. 27. Гистограмма и кривая распределения частот прибавки урожая яровой пшеницы от фосфорных удобрений при оптимизации показателей рН. Черноземы оподзоленные и выщелоченные. Сибирский округ

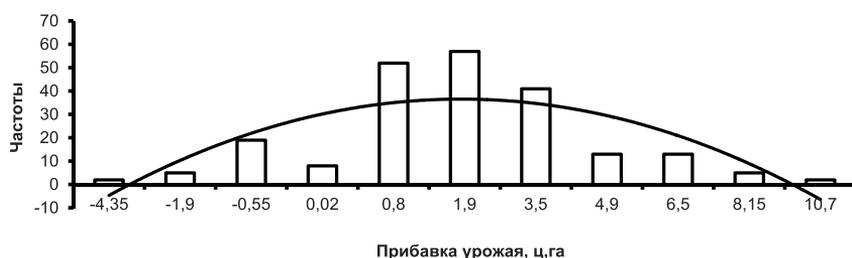


Рис. 28. Гистограмма и кривая распределения частот прибавки урожая яровой пшеницы от фосфорных удобрений в зависимости от содержания подвижного фосфора в почве. Черноземы оподзоленные и выщелоченные. Сибирский округ

Неустойчивый характер связи между изучаемыми признаками системы «почва–удобрение–растение» наблюдается при посеве озимой пшеницы на черноземах выщелоченных, типичных, обыкновенных, южных, мицеллярно-карбонатных. Характерно, что в этом случае гипотеза криволинейности отвергается ($F_{\phi} < F_{\tau}$), то есть для описания связи можно использовать только линейную корреляцию и регрессию. Но, как свидетельствуют коэффициенты детерминации, изменчивость прибавки урожайности всего лишь на 1–16% определяется вариацией показателей рН. Что указывает на весьма слабую сопряженность между факториальным и результативным признаком. А это в свою очередь ставит под сомнение возможность получения объективной оценки связи между изучаемыми признаками.

Проведенный анализ статистических характеристик связи показал, что влияние реакции почвенной среды на эффективность фосфорных удобрений под озимую пшеницу в определенной мере связано с типом почв. Так, на дерново-подзолистых, серых лесных почвах, черноземах оподзоленных

прибавка урожайности в интервале значений рН 4,0...5,2–6,4 закономерно и нелинейно возрастает, на черноземах выщелоченных, типичных, обыкновенных, южных, мицеллярно-карбонатных при рН 6,0–7,3 зависимость между признаками практически отсутствует, а на каштановых почвах (рН 6,5–8,0) зависимость отрицательная (рис. 29).

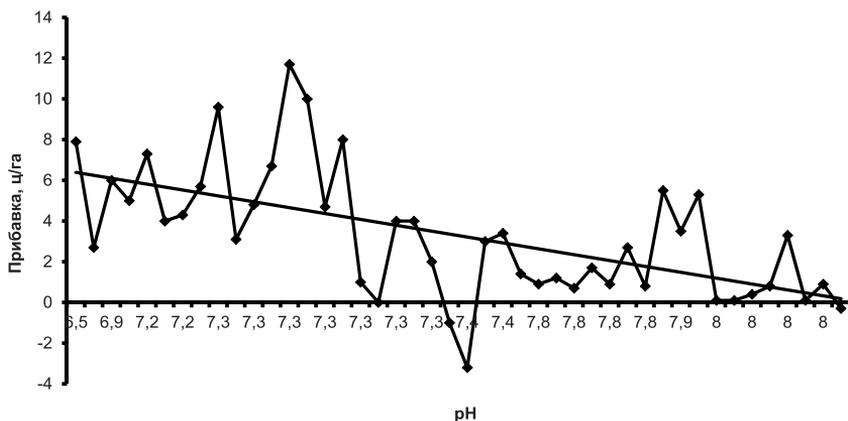


Рис. 29. Изменчивость прибавки урожайности озимой пшеницы от фосфорных удобрений на каштановых почвах Южного округа при различных значениях показателей рН (ломаная линия и тренд)

Если признать эту закономерность неслучайной, а объективно существующей, то выявленные различия можно принять как отклик на содержательный статус рассматриваемого свойства почвы и на основании этих данных констатировать, что влияние кислотности почв на эффективность фосфорных удобрений остается заметным только при определенных условиях (кислые, щелочные почвы). Эти же данные позволяют использовать выявленные различия для прогноза эффективности фосфорных удобрений на определенных типах почв.

Влияние кислотности почвы на эффективность фосфорных удобрений под яровую пшеницу имеет явно неустойчивый характер. Можно отметить три ситуации.

Первая, наиболее значительная по количеству объектов. Зависимости между изменчивостью прибавки урожайности яровой пшеницы от фосфорных удобрений и вариацией показателей кислотности почвы (рН) не наблюдается при возделывании ее на дерново-подзолистых почвах (Приволжье), серых лесных почвах (Сибирь), черноземах оподзоленных и выщелоченных (Урал), черноземах выщелоченных (Приволжье), черноземах типичных и обыкновенных (Приволжье, Урал), черноземах южных (Приволжье), черноземах карбонатных и солонцеватых (Урал). В этом случае корреляционная зависимость между признаками при оценке, как по коэффициенту корреляции, так и корреляционному отношению проявляется как слабая. Значения указанных показателей колеблются в интервалах $-0,14...0,12$ и $0,18...0,34$ соответственно.

Вторая. Достоверная криволинейная по форме корреляция имела место в трех случаях. В Приволжском округе в опытах с яровой пшеницей зави-

симось между факториальным и результативным признаками проявляется как средняя по силе ($\eta = 0,56$), на черноземах выщелоченных (Центр), на черноземах оподзоленных и выщелоченных (Сибирь) корреляционная зависимость характеризуется как сильная по тесноте (η равняется 0,76 и 0,72 соответственно). Гипотеза линейности корреляции во всех случаях отвергается ($F_{\phi} > F_r$).

Третья. Линейная обратная средняя по силе ($r = -0,54$ при $t = 0,010$) корреляция между изучаемыми факторами наблюдалась в одном лишь случае – при возделывании яровой пшеницы на серых лесных почвах в Центральном округе. Гипотеза нелинейности корреляции, безусловно, отвергается.

Оценивая в целом рассмотренные данные, необходимо принять во внимание, что массивы информации, положенные в основу расчетов, формировались по результатам опытов, проводимых многочисленными исполнителями. Не исключены, вероятно, различные отклонения в агротехнике, ее нарушения, ошибки в анализах и т.п. Варьировали, конечно, и погодные условия. Все это оказывало, по-видимому, дестабилизирующее влияние на систему «почва–удобрение–растение». В конечном итоге именно это и привело к получению несколько противоречивых результатов, характеризующих влияние кислотности на изменчивость прибавки урожайности яровой пшеницы от фосфорных удобрений на различных типах почв.

Результаты корреляционного анализа, характеризующие влияние обеспеченности почв подвижным фосфором на эффективность фосфорных удобрений, показали наличие четко выраженной зависимости изменчивости прибавки урожайности озимой и яровой пшеницы от фосфорных удобрений от вариации содержания фосфора в почве. Вместе с тем для объективной оценки связи между изучаемыми признаками необходим обоснованный выбор формы корреляции. Это обусловлено тем, что значения коэффициентов корреляции, корреляционного отношения, как правило, достаточно высокие. Так, в опытах с озимой пшеницей интервал колебаний коэффициентов корреляции составил от $-0,61$ до $0,35$, корреляционного отношения $0,51 \dots 0,89$, в опытах с яровой пшеницей от $-0,64$ до $0,37$ и $0,56 \dots 0,90$ соответственно.

Весьма значительный размах колебаний значений коэффициентов корреляции ограничил возможность использования линейной корреляции для характеристики связи обеспеченности почв подвижным фосфором с эффективностью фосфорных удобрений. Значения корреляционного отношения, в большинстве случаев, были более устойчивыми, высокими и достоверными (0,1%-й уровень значимости. Именно поэтому оценка степени приближения степени приближения криволинейной зависимости к прямолинейной по критерию линейности корреляции (F) показала, что для описания связи урожайности озимой и яровой пшеницы с содержанием подвижного фосфора в почве следует использовать криволинейную корреляцию ($F_{\phi} > F_r$). Исключение составляет для озимой пшеницы черноземы южные (Приволжский округ), для яровой пшеницы – черноземы мицеллярно-карбонатные (Южный округ). В этих случаях необходимо использовать линейную корреляцию.

Зависимость эффективности фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницу от содержания подвижного калия в почве проявляется не

всегда и выражается более низкими коэффициентами корреляции, корреляционных отношений, чем от содержания подвижного фосфора. На серых лесных почвах, на черноземах типичных, обыкновенных (Приволжский округ), на черноземах мицеллярно-карбонатных (Южный округ), на дерново-подзолистых почвах (Центральный округ), черноземах выщелоченных (Приволжский и Сибирский округа) такая зависимость отсутствует. Здесь очень уместно отметить и такую особенность – криволинейная зависимость проявляется как средняя по силе, но в подавляющем большинстве случаев, как показывает определение приближения криволинейной зависимости к прямолинейной, теоретические значения критерия линейности корреляции (F_T) больше фактического. (F_Φ). Другими словами, для описания связи между признаками допустимо использование как линейной, так и нелинейной корреляции. Но если учесть значения коэффициентов детерминации, которые колеблются в интервале от 0,004 до 0,21, то становится понятной необъективность такой оценки.

Зависимость между прибавкой урожайности озимой пшеницы и дозами фосфора, как правило, имеет криволинейный характер. Почти во всех случаях, исключение составляют каштановые почвы, гипотеза линейности корреляции отвергается ($F_\Phi > F_T$) при весьма высоком (0,1%-ном) уровне значимости нелинейной связи.

Изменчивость прибавки урожайности озимой пшеницы от удобрений, обусловленная вариацией доз фосфора в зависимости от природно-сельскохозяйственной зоны составила 17–79%. Более тесная связь эффективности удобрений с дозой фосфора наблюдалась при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистых и серых лесных почвах Центрального и Приволжского округов, на черноземах типичных, обыкновенных, южных, мицеллярно-карбонатных ($r = 0,72–0,89$). В остальных случаях значения корреляционного отношения были значительно меньше.

Зависимости величины прибавки урожайности яровой пшеницы от доз фосфора также присущ криволинейный характер. Причем теснота связи, как правило, достаточно высокая. Значения корреляционных отношений колебались от 0,53 до 0,88 в зависимости от региона возделывания.

Максимум функции, как для озимой, так и для яровой пшеницы в большинстве случаев находится в интервале 90–120 кг/га.

Результаты исследований позволили оценить эффективность фосфорных удобрений под озимую и яровую пшеницу от содержания в почве подвижных форм фосфора и калия, реакции почвенной среды, доз фосфора применительно к различным типам почв Европейской части России, Уральского и Сибирского округов.

Оценка изменчивости прибавки урожайности озимой и яровой пшеницы от фосфорных удобрений с использованием коэффициента вариации свидетельствует, что она в значительной мере определяется вариацией агрохимических свойств почвы. Так, оптимизация реакции почвенной среды оказывала положительное влияние на устойчивость прибавки урожайности пшеницы, а увеличение содержания подвижного фосфора в почве напротив способствовало росту вариабельности прибавки урожайности пшеницы от фосфорных удобрений.

Вместе с тем закономерности связи между зависимой переменной (результативный признак) и независимой переменной (факториальный признак) заметно варьируют и проявляются неодинаково. В частности, следует отметить нестандартную ситуацию, характеризующую зависимость между содержанием гумуса в почве и эффективности фосфорных удобрений. Она достоверна и статистически значима, но в то же время зависимость может быть как прямой, так и обратной или отсутствовать вообще. Это дает основание для предположения, что такой фактор как гумусированность почвы не является самостоятельным, а оптимальные пределы его зависят от сопутствующих свойств почвенной среды.

Влияние кислотности почвы на эффективность фосфорных удобрений связано с типом почв. На дерново-подзолистых, серых лесных почвах, черноземах оподзоленных при переходе от кислой к слабокислой реакции почвенной среды прибавка урожайности пшеницы плавно и нелинейно возрастает. На каштановых почвах при изменении значений рН от 6,5 к 8,0 зависимость между признаками отрицательная.

Связь эффективности фосфорных удобрений с содержанием подвижного фосфора в почве в подавляющем большинстве случаев криволинейная. Эффективность фосфорных удобрений наиболее высока при низком содержании подвижных форм фосфора в почве. По мере увеличения его содержания в почве она закономерно и нелинейно снижается.

Заметного влияния обеспеченности почв подвижными формами калия на изменчивость прибавок урожайности пшеницы от фосфорных удобрений не выявлено. Коэффициенты детерминации, характеризующие долю изменчивости результативного признака, обусловленного колебаниями изучаемого фактора крайне незначительны.

Влияние доз фосфора на вариацию прибавки урожайности пшеницы от фосфорных удобрений описывается уравнением параболы. Максимум функции для дозы фосфора в большинстве случаев находится в интервале 90–120 кг/га.

Выявленные особенности связей в системе почва растение – удобрения – могут быть использованы как теоретическое обоснование для прогноза эффективности фосфорных удобрений в зависимости от конкретной агрохимической ситуации и доз фосфора.

Корректный прогноз изменчивости прибавки урожайности возможен, вероятно, лишь при использовании такой последовательности расчета, которая позволяет учесть все рассмотренные выше особенности корреляционных связей в системе «почва–растение–удобрения». Другими словами, концептуальная модель прогноза эффективности фосфорных удобрений должна обеспечивать возможность достижения максимальной прибавки урожайности под воздействием совокупного влияния кислотности почвы, обеспеченности почвы подвижными формами фосфора, доз фосфора, когда эти факторы количественно находятся в относительно благоприятном сочетании. Если фактические значения факторов отклоняются от оптимума, то в последовательности расчета следует учесть, чтобы их воздействие было пропорционально сумме всех исследуемых функций влияния, включающих лимитирующие факторы.

В общем виде модель прогноза эффективности фосфорных удобрений является стохастической малокомпонентной и может быть описана аппроксимационным алгоритмом в следующей алгебраической форме:

$$Y = (A/Rп - B) + (b_1 \times Py - b_2 \times Py^2) \text{ для серых лесных почв,}$$

$$Y = (A/Rп - B) + (A - B \times pН) + (b_1 \times Py - b_2 \times Py^2) \text{ для каштановых почв,}$$

где Y – прибавка урожая, ц/га,

A и B – параметры уравнения,

$Rп$ – содержание подвижных фосфатов в почве, мг P_2O_5 /кг,

Py – дозы фосфорных удобрений, кг P_2O_5 /га,

$pН$ – реакция почвенной среды,

b_1 и b_2 – коэффициенты регрессии.

Верификация модели позволяет определить долю участия степени кислотности почвы, обеспеченности почвы подвижными формами фосфора, доз фосфора и их взаимодействие в формировании прибавки урожайности озимой пшеницы.

Отправной точкой в расчетах является тенденция наблюдаемых значений результативного признака, в данном случае прибавки урожайности озимой пшеницы от фосфорных удобрений, группироваться вокруг центра распределения частот, то есть статистической характеристики, которая является средней арифметической. В выборке, характеризующих эффективность фосфорных удобрений на каштановых почвах она составила 4,4 ц/га. Принимая указанную величину прибавки урожайности за 100%, в соответствии с предлагаемым Т.Н. Кулаковской методом комплексной оценки взаимодействия факторов по сумме индексов (1978) рассчитывается относительный вклад того или иного фактора. Формула расчета имеет следующий вид:

$$OB_{\Phi_1} = \dot{\eta}_{\Phi_1} \cdot 100 / \sum (\dot{\eta}_{\Phi_1} + \dot{\eta}_{\Phi_2} + \dot{\eta}_{\Phi_3}), \quad (1),$$

где OB – относительный вклад фактора, %;

$\dot{\eta}$ – индекс детерминации;

$\Phi_1 \dots \Phi_3$ – изучаемые факторы.

Количественный вклад изучаемых факторов определяется по величинам их относительного вклада и прибавке урожайности по формуле:

$$KB = \Pi \times OB, \quad (2)$$

где KB – количественный вклад ц/га; Π – прибавка урожайности, ц/га.

Расчеты для характеристики относительного и количественного вклада в формирование прибавки урожайности выполняют отдельно по каждому фактору системы и сводят в таблицу (табл. 118).

Таблица 118

Факторы модели и их вклад в формирование прибавки урожайности

Факторы	Корреляционное отношение	Относительный вклад факторов, ц/га	Прибавка, ц/га	Количественный вклад факторов, ц/га
pH	0,63	33	4,4	1,452
Обеспеченность P_2O_5	0,77	40		1,76
Дозы фосфора	0,51	27		1,188
S	1,91	100		4,4

Следующим этапом является оценка изменчивости вклада таких факторов формирования прибавки урожайности как рН почвы и обеспеченность ее подвижными формами фосфора. Для этого в соответствии с аппроксимационным алгоритмом выводятся уравнения регрессии отдельно для каждого фактора системы. В данном случае для реакции почвенной среды это уравнение имеет вид прямой линии: $Y = 8,2968 - 0,992рН$; для обеспеченности почвы подвижными формами фосфора – уравнение гиперболы: $Y = 1,9464/P_2O_5 - 0,1773$ (содержание P_2O_5 закодировано 1:10).

По уравнениям регрессии, в соответствии с принятой в алгоритме последовательностью рассчитывается вклад факторов в формирование прибавки урожайности. Результаты расчетов приведены в таблице 119.

Таблица 119

Вклад степени кислотности почвы и ее обеспеченности подвижными формами фосфора в формировании прибавки урожайности на каштановой почве

рН		P ₂ O ₅		Суммарный вклад, ц/га
Значение	Вклад, ц/га	Содержание, мг/кг	Вклад, ц/га	
6,9	1,452	10	1,7691	3,2211
		23	0,67	2,122
		38	0,335	1,787
		60	0,1471	1,5991
7,7	0,6584	10	1,7691	2,4275
		23	0,67	1,3284
		38	0,335	0,9934
		60	0,1471	0,8055
8,2	0,1624	10	1,7691	1,9315
		23	0,67	0,8324
		38	0,335	0,4974
		60	0,1471	0,3095

Далее оценивают влияние вариации реакции почвенной среды, содержания подвижного фосфора в почве на изменчивость вклада доз фосфора в формировании прибавки урожайности. В связи с тем, что зависимость между дозами фосфора и величиной прибавки урожая нередко хорошо иллюстрируется кривой типа параболы алгоритм расчета может быть представлен фрагментом уравнения квадратической параболы:

$$KB_{д} = a C_n - b C_n^2,$$

где КВД – количественный вклад фактора при том или другом уровне его значений, ц/га;

a и b – коэффициенты,

C_n – содержание элемента питания в почве (мг/кг) или доза азота (кг/га).

Коэффициенты a и b определяют по максимуму функции изучаемого фактора и его доли участия в формировании прибавки урожайности.

$$b = KB \times M_{ф}^2,$$

где b – коэффициент квадратичного члена уравнения,

$M_{ф}^2$ – квадрат максимума функции;

$$a = b \times 2M^2\phi,$$

где a – коэффициент линейного члена уравнения регрессии.

Аналогичные расчеты приведены при анализе материалов по эффективности фосфорных удобрений, при возделывании ее на различных почвах. Выходная информация представлена в виде итоговых таблиц (табл. 120, 121).

Таблица 120

Прогноз прибавки урожайности озимой пшеницы от фосфорных удобрений на серых лесных почвах, черноземах оподзоленных и выщелоченных Центрального округа, ц/га

Содержание P_2O_5 , мг/кг	P_{30}	P_{45}	P_{60}	P_{90}	P_{120}
Серые лесные почвы					
<50	4,5	5,0	5,4	5,9	6,1
51–75	2,0	2,2	2,3	2,6	2,6
76–100	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5
101–150	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9
>150	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
Черноземы оподзоленные и выщелоченные					
<50	3,8	4,2	4,5	4,7	4,5
51–75	1,7	1,8	1,9	2,0	1,9
76–100	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1
101–150	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6
>150	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3

Таблица 121

Прогноз прибавки урожайности озимой пшеницы от фосфорных удобрений на каштановых почвах Южного округа, ц/га

pH	Содержание P_2O_5 , мг/кг	P_{30}	P_{45}	P_{60}	P_{90}	P_{120}
< 7,0	<15	3,7	3,9	4,1	4,3	4,4
	16–23	3,2	3,4	3,5	3,7	3,8
	24–30	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2
	31–45	2,1	2,2	2,3	2,1	2,2
	>45	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2
7,0–8,0	<15	2,8	3,0	3,1	3,3	3,3
	16–23	2,4	2,6	2,7	2,9	2,9
	24–30	2,0	2,2	2,2	2,4	2,4
	31–45	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4
	>45	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
> 8,0	<15	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7
	16–23	1,9	2,1	2,2	2,2	2,3
	24–30	1,6	1,8	1,8	1,9	2,0
	31–45	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
	>45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Согласно приведенным данным, можно констатировать возможность прогнозирования влияния, как отдельных агрохимических свойств почвы, так и их комплекса на эффективность фосфорных удобрений. Это в свою очередь позволяет представить общую картину динамики количественных

характеристик изменчивости прибавок урожайности от удобрений при вариации агрохимической ситуации и обеспечивает потенциальную возможность теоретически обосновать положение о том, что прогнозируемая прибавка урожайности является следствием изменения условий минерального питания и влияния удобрений.

Результаты расчетов для удобства использования сводятся таблицу 122

Таблица 122

Суммарный вклад доз фосфора в формирование прибавки урожайности при разных значениях pH и P₂O₅, ц/га

P ₂ O ₅ , мг/кг	Показатели	Дозы фосфора, кг/га				
		30	60	90	120	150
pH 6,9						
10	pH	0,234	0,4014	0,5022	0,5364	0,594
	P ₂ O ₅	0,2876	0,4914	0,6156	0,6588	0,621
	S	0,5207	0,8928	1,1178	1,1952	1,125
23	P ₂ O ₅	0,10932	0,18732	0,234	0,24936	0,2334
	S	0,34332	0,58872	0,7362	0,78576	0,7374
38	P ₂ O ₅	0,05424	0,093	0,11628	0,124308	0,1164
	S	0,28824	0,4944	0,61848	0,66048	0,6204
60	P ₂ O ₅	0,23625	0,0405	0,050625	0,054	0,50625
	S	0,257625	0,4419	0,552825	0,5904	0,554625
pH 7,7						
10	pH	0,10608	0,18192	0,22752	0,24288	0,228
	P ₂ O ₅	0,2876	0,4914	0,6156	0,6588	0,621
	S	0,3928	0,6733	0,8431	0,9017	0,849
23	P ₂ O ₅	0,10932	0,18732	0,234	0,24936	0,2334
	S	0,2154	0,36924	0,46152	0,49224	0,4614
38	P ₂ O ₅	0,05424	0,093	0,11628	0,12408	0,1164
	S	0,16032	0,27492	0,3438	0,36696	0,3444
60	P ₂ O ₅	0,023625	0,0405	0,050625	0,054	0,050625
	S	0,129705	0,22242	0,278145	0,29668	0,278625
pH 8,2						
10	pH	0,02626	0,04502	0,0563	0,06009	0,0564
	P ₂ O ₅	0,2867	0,4914	0,6156	0,6588	0,621
	S	0,313	0,5364	0,6719	0,7189	0,6774
23	P ₂ O ₅	0,10932	0,18732	0,234	0,24936	0,2334
	S	0,13558	0,23234	0,2903	0,30945	0,2898
38	P ₂ O ₅	0,05424	0,093	0,11628	0,12408	0,1164
	S	0,0805	0,13802	0,17258	0,18417	0,1728
60	P ₂ O ₅	0,023625	0,0405	0,050625	0,054	0,050625
	S	0,049885	0,08552	0,106925	0,11409	0,107025

Представленные материалы позволяют рассматривать их как нормативные показатели, привязанные к конкретным типам почв и дифференцированы по их агрохимическим свойствам.

Предлагаемая концептуальная модель эффективности фосфорных удобрений позволяет получить количественную статистически достоверную оценку влияния агрохимических факторов на формирование прибавки урожайности. Например, при возделывании озимой пшеницы на серых лесных почвах, на черноземах оподзоленных и выщелоченных ведущая роль при-

надлежит обеспеченности почв подвижным фосфором и дозам фосфорных удобрений в формировании прибавки урожайности, на дерново-подзолистых, каштановых почвах, кроме указанных факторов, проявляется существенное влияние реакции почвенной среды.

Модель прогноза применения калийных удобрений

Анализ результатов исследований по эффективности калийных удобрений при внесении под зерновые культуры на примере озимой пшеницы свидетельствует, что влияние агрохимических свойств почвы, доз калия на изменчивость прибавки урожайности сельскохозяйственных культур заметно различается. Иллюстрацией могут служить данные, характеризующие связь прибавки урожайности озимой пшеницы от калийных удобрений с агрохимическими свойствами различных почв (табл. 123).

Таблица 123

Статистическая характеристика связи прибавки урожайности озимой пшеницы от калийных удобрений с агрохимическими свойствами почвы и дозами калия (Центральный округ)

Аргументы системы	Корреляция						Критерий линейности	
	линейная			криволинейная			Fф	Fт
	коэффициенты		уровень значимости	корреляционное отношение	индекс детерминации	уровень значимости		
	корреляции	детерминации						
Дерново-подзолистые почвы								
pH	-0,21	0,04	0,400	0,58	0,33	0,001	6,4	99,5
P ₂ O ₅	0,08	0,006	–	0,24	0,06	0,200	0,8	99,5
K ₂ O	-0,29	0,08	0,200	0,60	0,36	0,001	2,4	9,4
Дозы	0,25	0,06	0,200	0,84	0,71	0,001	10,0	6,0
Серые лесные почвы								
pH	0,02	0,0	–	0,39	0,15	0,001	8,9	99,5
P ₂ O ₅	0,02	0,0	–	0,50	0,25	0,001	13,5	99,5
K ₂ O	-0,15	0,02	0,200	0,91	0,83	0,001	35,1	3,4
Дозы	0,10	0,01	0,400	0,89	0,79	0,001	38,9	4,4
Черноземы выщелоченные и оподзоленные								
pH	-0,07	0,00	–	0,08	0,00	0,400	–	–
P ₂ O ₅	0,08	0,00	–	0,18	0,03	0,001	–	–
K ₂ O	-0,20	0,04	0,200	0,85	0,72	0,001	24,2	2,5
Дозы	0,03	0,00	–	0,86	0,74	0,001	–	–
Черноземы обыкновенные								
pH	-0,05	0,03	–	0,44	0,19	0,001	10,0	6286
P ₂ O ₅	-0,03	0,00	–	0,08	0,00	–	–	–
K ₂ O	-0,59	0,35	0,001	0,83	0,69	0,001	6,1	5,9
Дозы	0,39	0,15	0,010	0,77	0,59	0,001	6,0	5,9

Влияние таких агрохимических свойств как реакция почвенной среды, содержание подвижного фосфора в почве на эффективность калийных удобрений под озимую пшеницу как видно из приведенных данных, в большинстве случаев имеет неустойчивый характер. Так, линейная зависимость эффективности калийных удобрений от указанных выше факторов практически отсутствовала, а при оценке по индексу детерминации можно отметить слабую корреляционную зависимость между признаками и весьма значительный размах изменений величин этого показателя – от 0,00 до 0,33.

Неустойчивый характер влияния данных факторов ограничивает его использование в возможности прогноза эффективности калийных удобрений.

В значительно большей мере эффективность калийных удобрений определяется содержанием подвижного калия в почве и дозами калия. Увеличение содержанием подвижного калия в почве сопровождается четко выраженной тенденцией снижения эффективности калийных удобрений. Это подтверждается как обратной линейной связью между изучаемыми показателями, так и высокими значениями корреляционного отношения (0,69...0,84), то есть корреляция проявляется как сильная по тесноте связи. При этом зависимость эффективности калийных удобрений от доз калия имеет ясно выраженный криволинейный характер ($F_{\phi} > F_T$).

Особенности связей свидетельствуют о том, что корректный прогноз изменчивости прибавки урожайности озимой пшеницы при применении калийных удобрений возможен, прежде всего, при использовании в расчетах показателей обеспеченности почв подвижным калием и его доз.

Последовательность расчета показана на примере прогноза эффективности калийных удобрений под озимую пшеницу на дерново-подзолистых почвах Центрального округа.

Принятый в расчетах интервал колебаний значений изучаемых показателей определяется фактом содержания подвижного калия в дерново-подзолистых почвах Центрального округа. Такой подход обеспечивает возможность объективной экстраполяции прогноза эффективности калийных удобрений под зерновые культуры на почвах этого региона.

Последовательность расчета относительного, количественного вклада в формирование прибавки урожайности показана в таблице 124.

Средняя величина прибавки урожая озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах Центрального округа составила – 3,9 ц/га. Принимая эту величину за 100%, рассчитываются вклады отдельных факторов в прибавку урожая.

Таблица 124

Определение вклада факторов в прибавку урожая

Факторы	η	Относительный вклад	Прибавка, ц/га	Количественный вклад, ц/га
K ₂ O	0,92	0,52	3,9	2,028
Дозы	0,84	0,48		1,872
Σ	1,76			

Следующим этапом является выявление влияния вариации содержания подвижного калия, доз калия на изменчивость прибавки урожая озимой

пшеницы от калийных удобрений. В этом случае доля участия каждого фактора рассчитывается по уравнениям регрессии (в данном случае гиперболы):

- для подвижного калия это уравнение гиперболы:

$$Y = 20,2383/X - 1,3884;$$

- для доз калия:

$$Y = 2,03747 - 6,808/X.$$

Последовательность расчета и результаты показаны в таблице 125.

Результаты расчетов, характеризующих изменчивость вклада изучаемых факторов в динамику варибельности результативного признака (прибавки урожайности) в зависимости от их вариации показаны в таблице 126.

Таблица 125

Определение вклада в прибавку урожая в зависимости от содержания K_2O и доз калия

Вклад обеспеченности почвы K_2O			
X	$20,6819/X$	-1,4187	Y
6	3,4470	-1,4187	2,0283
10	2,0682	-1,4187	0,6495
14,5	1,4263	-1,4187	0,0075
Вклад доз калия			
X	$2,03747$	$-6,8088/X$	Y
3	2,03747	-1,7418	0,2956
4,5	2,03747	-1,51306	0,6678
6	2,03747	-1,1348	1,1494
9	2,03747	-0,7565	1,6311
12	2,03747	-0,5674	1,872

Таблица 126

Суммарный вклад факторов

Доза		K ₂ O		Суммарный вклад
значение	вклад	значение	вклад	
3	0,2956	6	2,028	2,3236
		10	0,6493	0,9449
		14,5	0,0075	0,3031
4,5	0,6678	6	2,028	2,6957
		10	0,6493	1,317
		14,5	0,0075	0,6753
6	1,1494	6	2,028	3,1774
		10	0,6493	1,7987
		14,5	0,0075	1,1569
9	1,6311	6	2,028	3,6591
		10	0,6493	2,2804
		14,5	0,0075	1,6386
12	1,872	6	2,028	3,9
		10	0,6493	2,521
		14,5	0,0075	1,8795

Итоги расчетов в виде выходной информации представлены в таблицах 127 и 128.

Таблица 127

Прибавка урожая озимой пшеницы от калийных удобрений, ц/га

K ₂ O, мг/кг	Урожай без удобрений, ц/га	Доза, кг/га				
		30	45	60	90	120
<80	13,3	2,3	2,7	3,2	3,7	3,9
80–120	23,5	0,9	1,3	1,8	2,3	2,5
>120	31,0	0,3	0,7	1,2	1,6	1,9

Таблица 128

Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы, кг/кг

K ₂ O, мг/кг	Доза, кг/га				
	30	45	60	90	120
<80	7,7	6,0	5,3	4,1	3,3
80–120	3,0	2,9	3,0	2,6	2,1
>120	1,0	1,6	2,0	1,8	1,6

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Показатели сельскохозяйственной оценки климата

В СССР с 1920-х гг. интенсивно разрабатывались принципы сельскохозяйственной оценки климатов. Начало им положено работами Г.Т. Селянинова и П.И. Колоскова. Исследования в этом плане далее были продолжены И.А. Гольцберг, Ф.Ф. Давитая, С.А. Сапожниковой, Д.И. Шашко и другими.

При построении схемы сельскохозяйственной оценки климатов советские исследователи исходили из принципа единства растений и среды, выражающегося в потребности растений в определенных условиях существования и бесспорном положении о том, что отдельные климатические факторы неравноценны по своему значению для сельскохозяйственных растений.

Климатические условия той или иной местности определяются большим числом климатических элементов (температурой и влажностью воздуха, облачностью, давлением, осадками, ветром и т. д.). Те из факторов, которые оказывают существенное влияние на объекты и процессы сельскохозяйственного производства (температура, влага в почве, осадки, свет), в совокупности формируют агроклиматические условия данного района. Прочие факторы (давление; оптические явления и т. д.), не оказывающие существенного влияния на объекты и процессы сельскохозяйственного производства, не относятся к величинам, формирующим агроклиматические условия. Таким образом, между климатическими и агроклиматическими условиями существует определенная разница.

Совокупность агроклиматических факторов, создающих условия для получения определенных величин урожаев сельскохозяйственных культур, составляет агроклиматические ресурсы данной территории.

Исходя из такого принципиального подхода, схема сельскохозяйственной характеристики климата на современном этапе исследований складывается из оценки:

- термических и световых ресурсов вегетационного периода и его подпериодов;
- условий влагообеспеченности вегетационного периода и его подпериодов;
- условий перезимовки растений;
- явлений, неблагоприятных для сельского хозяйства.

Необходимо отметить, что при сельскохозяйственной оценке климата, помимо средних многолетних величин, широко применяют и другие показатели. Например, наряду со средними суточными температурами используют дневные и ночные температуры, суточные амплитуды температур, температуру самого холодного и теплого месяцев, суммы температур, вероятность и обеспеченность любых значений температуры при известной ее средней величине и т. д.

В общеклиматических исследованиях при оценке климата данной территории, прежде всего, исходят из генезиса климата или из заданных градаций определенных метеоэлементов (температуры, осадков и т. д.). По этим признакам выделяют типы, районы, провинции и другие таксономические единицы климатов.

В агроклиматических исследованиях сельскохозяйственную оценку климата дают на основе лишь агроклиматических условий, оказывающих существенное влияние на жизнь растений.

А.Р. Константинов (1978) выделяет три типа агроклиматического районирования. Основной формой районирования является первый тип, согласно которому крупные зоны выделяются с использованием таких показателей как сумма биологически активных температур, сумма осадков, дефицит влажности воздуха, средне запасы влаги в почве, минимальные и максимальные температуры воздуха. Второй тип сочетает агроклиматическое районирование с характеристиками тепло- и влагообеспеченности отдельных культур, определяются зоны их возможного возделывания. Третий тип районирования составляется на основе многолетних показателей урожайности.

При разработке отраслевых видов районирования важно наиболее полное согласование этих районирований с природно-сельскохозяйственным, выражающим в единой системе природные комплексы, выстроенные по системе соподчинения от высших до самых низших таксонометрических единиц. Комплексное природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда страны (Каштанов, Гайдамака и др., 1983) построено именно по системе соподчиненность таксонометрических единиц; подразделы комплексного районирования рассматриваются как подсистемы и описываются соответствующими агроклиматическими показателями.

К частным районированиям по элементам агроклимата относятся: почвенно-географическое, сельскохозяйственная экология, география почвенного плодородия, микроклиматология и местный климат, биоклиматический потенциал, гидротермический показатель, тепловой баланс поверхности, безморозный и вегетационный период, почвенная влага, характеристики заморозков, суховея, пыльных бурь и др. К частным районированиям можно отнести географическое районирование по культурам. Особенностью частных районирований является более детальный учет макро-, мезо- и микроклимата соответственно с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур. Целесообразно применительно к прогнозируемым климатическим изменениям корректировать общее и частное районирования.

Выделение почвенно-климатических зон рационального размещения сельскохозяйственных культур может быть выполнено по методу сопряжен-

ного агроклиматического анализа по фазам развития растений и их продуктивности.

На территории России выделено 8 природных зон и 28 природно-сельскохозяйственных провинций, в том числе 5 зон относятся к основной земледельческой ее части, различающейся по природным условиям и отраслевой структуре сельскохозяйственного производства.

К основным земледельческим зонам страны относятся среднетаежная, южно-таежная, лесостепная, степная и сухостепная зоны. Внутри зон существуют определенные внутризональные почвенно-климатические различия, соответствующие особенностям сельскохозяйственного использования земель.

Климат и почва являются основными факторами ландшафто-образования, определяющими продуктивность агроценозов. Области избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности – тундра и тайга – через зону достаточного увлажнения (лесостепь) переходят в зону недостаточного увлажнения – степь, полупустыню и пустыню. Таким образом, тепловой и водный баланс являются климатообразующими, почвообразующими и ландшафтно-образующими факторами. Поэтому температура и влажность воздуха приняты за основу их характеристики. А.Р. Константинов (1978) отмечает, что возможность расчета любой из составляющих баланса по температуре и влажности позволяет оценить вызванные ими изменения других составляющих, а также непосредственно климата, почвы и ландшафта. Наиболее полно и комплексно условия формирования урожайности характеризуются типом ландшафта, аккумулирующего в себе влияние климата и почвы. Наличие связи между климатом и типом почвы, казалось бы, приводит к тому, что учет температуры и влажности означает и автоматический учет влияния на урожайности почвенного плодородия. Однако относительно устойчивая связь климатических условий с типом почвы существует лишь в зональных закономерностях. Здесь теснота связи характеризуется коэффициентом корреляции 0,5–0,7. Внутри же зон, эта связь большей частью нарушается ($r=0,2-0,4$) из-за влияния различных азональных факторов: различия рельефа, увлажненности почвы, растительности. Именно поэтому все виды схемы агроклиматического, почвенно-климатического, природно-сельскохозяйственного районирования территории предусматривают дальнейшее подразделение зон и провинций на округа и районы. Имеются схемы, доходящие до выделения элементарных почвенных ареалов, участков с определенным микроклиматом.

Е.Н. Романова, Г.И. Мосолова и др. (1983) провели микроклиматическое районирование территории страны. Из выделенных 10 районов применительно к земледельчески освоенной части ЕТС с позиции микроклиматической оценки представляют интерес следующие микрорайоны: слабовсхолмленные равнины с большой пестротой гранулометрического состава почв; волнистые равнины с малоразличающимися по гранулометрическому составу почвами, приуроченными к черноземной зоне; холмистый рельеф ЕТС, включающий широкие, плоские, открытые долины; низменные равнины северной части ЕТС (заболоченные территории), где болотные массивы

чередуются с суходолами. С изменением микроклимата меняется и климат почв, что очень важно оценивать при применении минеральных удобрений. Одним из основных факторов образования микроклимата почв является рельеф.

Установлено, что распределение прямой солнечной радиации на склонах различных экспозиции и крутизны влияет на формирование гидротермического режима почв. Крутые южные склоны теплее пологих, крутые северные холоднее пологих. Различия возрастают с увеличением аридности климата. Восточные и западные склоны аккумулируют лучистую энергию Солнца примерно одинаково, но западные оказываются теплее вследствие меньших потерь на испарение, связанных с освещенностью во второй половине дня.

Не только экспозиция склонов, но и их конфигурация обуславливает различия в климате почв. Так, почвы отрицательных форм рельефа всегда влажнее и холоднее почв положительных форм рельефа (Федосеев, 1959). При этом влажность почв вогнутых склонов возрастает от вершины к подножию, а на выпуклых склонах снижается к основанию и всегда вершины склонов теплее, чем низины (Каштанов, Явтушенко, 1997).

Большое значение для формирования термических и гидрологических условий почв склонов имеют сила, скорость, направление ветра и особенности перераспределения выпадающих осадков.

Процессы эрозии усиливают значение рельефа в формировании микроклимата почв. Так, на дерново-палево-подзолистых почвах Белоруссии различия в теплообеспеченности несмытых почв плакора и сильносмытых южного склона достигают в зависимости от погодных условий 70–230°C. Соответственно влагообеспеченность почв южного склона более низкая – на 40–60 мм в 0–100 см слое почвы. На плакоре отмечается весеннее переувлажнение (Тищук, Хох и др., 1985).

Следовательно, особенности рельефа, и в первую очередь экспозицию склонов, необходимо учитывать при размещении сельскохозяйственных культур и их сортов на территории хозяйств в пересеченной местности.

Важную роль в образовании климата почв имеет гранулометрический состав. Его оценка для оптимизации параметров климата почв зависит от климата тех или иных зон и провинций. На севере при недостатке тепла и избытке влаги более благоприятны для земледелия теплые и сухие почвы легкого гранулометрического состава (пески, супеси), на юге – холодные, влажные суглинистые и глинистые почвы.

Термическая неоднородность почвенного покрова достигает значительных величин. Так, разница в сумме активных температур выше 10 °C на глубине 0,2 м составляет между суглинистыми и песчаными почвами 340 °C. По этому показателю тяжелосуглинистые почвы на 150 °C оказываются холоднее суглинистых, соответственно переход среднесуточной температуры почвы через 10 °C на песчаных почвах наблюдается на 12 сут. ранее, а на тяжелосуглинистых на 5 сут. позднее, чем на суглинистых. Аналогично изменяется продолжительность периода активных температур.

Следует отметить, что с продвижением в южном направлении различия в теплообеспеченности легких и тяжелых почв возрастают. Так, в степной

зоне обыкновенных и южных черноземов (Оренбургская область) песчаные почвы по сумме активных температур выше 10 °С теплее тяжелосуглинистых на 1170 °С или в 9 раз.

В.Н. Димо и П.И. Тихонравова (1991) подчеркивают необходимость учитывать термические особенности почв при размещении сельскохозяйственных культур. Иначе неизбежны невосполнимые потери урожая, так как растения страдают как от недостатка тепла, так и от его избытка. В то же время требуется знать и возможности влагообеспеченности почв разного гранулометрического состава.

Авторами сделана попытка оценить факторы формирования микроклимата и выделить основные мелиоративные воздействия на микроклимат почв. Они отмечают, что климат и микроклимат почв регулируют взаимосвязанными тепловыми и водными мелиорациями. Основные из них: осушение, орошение, сведение леса, полезащитное и сплошное лесоразведение, защита полей кустарниковой и высокостебельной растительностью, снежные мелиорации, искусственный обогрев плантаций для борьбы с заморозками, создание системы обработки почвы и агротехнических приемов возделывания культурных растений.

На изменение климата почв непосредственно влияют осушение и орошение.

В пределах одной почвенно-климатической зоны можно наблюдать значительное варьирование влагозапасов в зависимости от местоположения, а также погодных условий, что необходимо учитывать при организации орошения и расчете поливных норм.

Орошение влияет на микроклимат почв и приземного слоя воздуха, создавая благоприятное для растений соотношение тепла и влаги. В результате изменения составляющих теплового баланса изменяется микроклимат орошаемых полей, увеличиваются влажность и затраты тепла на испарение, а следовательно, снижается температура почвы.

Эффективный прием регулирования водного и теплового режимов – мульчирование, то есть специальное покрытие почв торфом, соломой, мульчбумагой и полимерными пленками – светопрозрачной и черной. В результате мульчирования уменьшаются колебания температуры и влажности почвы, снижаются испарение и температура почвы, сохраняется влага, изменяется климат приземного слоя воздуха.

На микроклимат орошаемого поля наиболее эффективно воздействует дождевание, изменяя температуру и влажность почв. Так, в течение 15 суток после полива температура пахотного слоя солонцового комплекса Заволжья поддерживалась на более низком уровне, чем до полива. В пасмурные дни эти различия были выражены слабее.

Любой прием мелиорации почвы в той или иной степени регулирует ее климат. Так, на водный режим почв воздействуют чистые пары, особенно черные, однако их гидрологическая роль неодинакова в разных почвенно-климатических зонах. Особое значение в регулировании водного режима имеют кулисные пары, способствующие снегозадержанию и ветрозащите. В засушливом Заволжье кулисы подсолнечника к посеву яровых сохранили 40 мм влаги в метровом слое почвы. Парование из-

меняет также тепловой режим почвы, влияя на скорость теплооборота вследствие снижения теплопроводности и в то же время способствуя большему поглощению солнечной энергии шероховатой поверхностью рыхлой почвы днем и излучению ночью.

Погодные условия и плодородие почв

Наличие органической связи между климатом и плодородием почвы делает неэффективным анализ влияния на урожайность климатических и погодных условий отдельно от почвенных.

Содержание в почве элементов минерального питания, в доступной для растений форме значительно колеблется по годам. Погодные условия не только определяют количество доступных веществ (на полях без применения удобрений), но и коэффициенты их использования растениями. Так на основе многолетних агрохимических опытов (Марковский, 1972) было определено, что из метрового слоя обыкновенных черноземов растения используют (с колебаниями по годам) от 9,6 до 20,4% гидролизуемого азота, от 1,9 до 4,3% подвижного фосфора и от 3,1 до 6,8% обменного калия (в процентах от валового содержания этих элементов в почве).

Г.В. Дегтяревой (1981) для заблаговременной оценки уровня азотного питания до сева яровой пшеницы была определена его зависимость от ряда агрометеорологических факторов предшествующего года. Зависимость содержания нитратного азота в пахотном слое почвы весной (черноземы, предшественник – яровые зерновые) от суммы осадков май – август предшествующего года характеризуется коэффициентом корреляции – 0,74, от ГТК этого же периода – $r = -0,75$, от запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см на зяби перед ее замерзанием $r = -0,48$. Автор делает два вывода: во-первых, увеличение амплитуды колебаний по годам содержания нитратного азота в направлении с северо-запада на юго-восток является одной из причин роста изменчивости урожайности яровой пшеницы по мере усиления засушливости климата. Во-вторых, ежегодный исходный уровень минерального питания растений может быть определен заблаговременно путем учета косвенных агрометеорологических показателей – влагообеспеченности вегетационного сезона, послеуборочного и предзимнего увлажнения почвы и урожая в предшествующем году.

Уровень азотного питания растений подвергается значительным колебаниям по годам. Установлено, что на одной и той же почве количество азота может претерпевать значительные изменения. Содержание нитратного азота – основного показателя обеспеченности азотом растений на обыкновенных и южных черноземах может колебаться от «следов» до 5–6 мг на 100 г почвы (Чуб, 1989). В остаточном содержании нитратного азота по годам прослеживается закономерность – чем влажнее год и выше урожай предшественника, тем больше из почвы выносятся питательных веществ. Так, если во влажные годы после уборки кукурузы в пахотном слое были найдены лишь следы нитратного азота, то после засушливых лет при пониженном

урожае кукурузы в почве оставалось от 0,7 до 1,95 мг нитратного азота. В многолетних агрохимических опытах института было определено, что во влажные годы после уборки всех основных предшественников яровой пшеницы содержание подвижного азота бывает средним и низким. В засушливые годы паропропашные и колосовые предшественники по послеуборочному содержанию нитратов приближаются к чистому пару. Было также установлено, что в осенний период происходит определенное увеличение исходного содержания нитратного азота. Однако определение этого показателя весной, в момент появления всходов, показало близкое совпадение со значением, полученным после уборки. Таким образом, содержание нитратного азота после уборки предшественника может быть использовано, как правило, в качестве надежного показателя обеспеченности азотом урожая последующего года (Пронько, 2002, 2004).

Особое значение в повышении способности растений противостоять экстремальным условиям имеет обеспеченность их подвижными формами фосфора и калия.

Отечественными и зарубежными исследованиями установлено, что для нормального роста и развития растений должны быть созданы такие фосфатный и калийный уровни, чтобы они могли обеспечить потребность культурных растений в подвижных формах фосфора и калия на протяжении всего периода вегетации (Сушеница, 2007; Сычев, Кирпичников, 2009). При этом накопленные в почве за счет удобрений запасы фосфора и калия более важны для формирования высокой урожайности, чем повышенные дозы соответствующих удобрений, внесенных на бедных почвах непосредственно под культуру. После создания оптимальных уровней содержания в почве фосфора и калия, фосфорные (калийные) удобрения следует вносить в дозах, соответствующих выносу указанных элементов прогнозируемым урожаем, для поддержания этих уровней. Несмотря на более высокие прибавки урожая от фосфорных (калийных) удобрений на бедных соответствующими элементами почвах, общий уровень урожайности на почвах с низкой обеспеченностью фосфора (калия) остается более низким, чем на почвах, хорошо обеспеченных фосфором (калием). Особенно недостаток фосфора (калия) проявляется в районах с низким количеством осадков и в условиях холодного климата с коротким вегетационным периодом.

Обеспеченность фосфором почв имеет довольно ярко выраженную зональность, что связано с климатическими и почвообразующими факторами. По мере нарастания сухости климата и уменьшения гумусности почв валовое количество фосфатов в почвах уменьшается. Так, высокое содержание фосфора в среднемощных обыкновенных черноземах северо-запада Правобережья Саратовской области (136–166 мг P_2O_5 на 100 г почвы в слое 0–10 см) снижается по мере продвижения на юго-восток в маломощных обыкновенных, солонцеватых и южных черноземах до 106–127 мг. По мере снижения гумусности и мощности гумусного горизонта запасы фосфора также снижаются (Чуб, 1989).

Обобщение данных накопленного десятилетиями производственного опыта возделывания различных сельскохозяйственных культур в нечерноземной зоне страны показало, что фосфор и калий способствуют лучшей

перезимовке озимых зерновых культур, вызывая в растениях большее накопление сахаров, тогда как избыток нитратного азота (обычно, более 30–40 кг/га в пахотном слое) снижает их зимостойкость вследствие усиления ростовых процессов в противовес предзимней закалке растений. В засушливых условиях, которые реже и с меньшей интенсивностью проявляются в условиях нечерноземной зоны по сравнению с южными регионами, возрастает роль фосфора, недостаток которого в почвах должен устраняться внесением суперфосфата или фосфоритованием кислых почв, слабообеспеченных подвижными формами данного элемента. В районах, чаще всего подвергающихся засухам, то есть с распространением преимущественно темноокрашенных почв, прежде всего – черноземов, наряду с азотными особое значение имеет обеспечение посевов фосфорными удобрениями. В отличие от почвенного азота, представленного главным образом легкоподвижной его формой – нитратами, фосфор в почвах малоподвижен и не передвигается к корням растений с массовым, тем более умеренным, потоком воды, корневые системы растений в засушливых условиях не могут нормально развиваться и обеспечивать полноценное фосфорное питание растений за счет контактного, то есть превалирующего способа поглощения из почвы анионов фосфорной кислоты. Поэтому применение фосфорных удобрений, при недостатке подвижного фосфора в почве, позволяет значительно смягчить последствия экстремальных погодных явлений. Отмечено, что удобрения проявляют свое положительное влияние на преодоление растениями недостаточной влагообеспеченности, но только при достаточном обеспечении их фосфором и калием. В свою очередь, повышенное содержание азота в почве повышает эффективность фосфорных удобрений и в условиях недостатка почвенной влаги. Содержание калия в почвах южных районов страны, подверженных засухам, как правило, достаточно для обеспечения растений в условиях недостатка влаги. В лесостепной и степной зонах разница в эффективности калийных удобрений в нормально увлажненные и сухие годы составляет в среднем не более 0,5–0,8 ц/га зерновых единиц, поэтому во внесении калийных удобрений их резервного фонда будут нуждаться в первую очередь калийлюбивые культуры на слабообеспеченных этим элементом почвах.

Калий помогает растениям не только накопить углеводы у озимых зерновых культур и многолетних трав и улучшить их перезимовку, но и противостоять избыточному увлажнению почвы во время активной вегетации растений, стимулируя углеводный обмен и тем, уменьшая негативное влияние относительного избытка азота, вызывающего в этих условиях, как правило, несбалансированное увеличение вегетативной массы вплоть до полегания растений (Ниловская, Карманенко, 2009). Дополнительное, помимо традиционного, обеспечение сельскохозяйственных посевов азотом необходимо, как и фосфором, при недостатке влаги, при холодной затяжной весне из-за понижения биологической активности нечерноземных почв, на почвах с пониженным содержанием гумуса, особенно песчаных и супесчаных, при плохой перезимовке озимых зерновых и многолетних кормовых трав.

Следует отметить, что не только содержание, но и соотношение важнейших элементов минерального питания в почве подвержено большим

колебаниям. В частности, засушливые условия противоположно действуют на накопление доступного азота и фосфора. Если содержание нитратного азота в почве в такие годы возрастает, то в содержании подвижных фосфатов отмечается тенденция к уменьшению. Обратная картина бывает во влажные годы. В сухие годы подвижного фосфора в почве накапливается меньше, чем в умеренно влажные. Причем различия в содержании фосфора увеличиваются по мере созревания озимой пшеницы (табл. 129).

Таблица 129

Динамика подвижного фосфора в слое почвы 0–30 см (мг/100 г почвы) под озимой пшеницей в зависимости от метеорологических условий

Тип года по увлажнению	Фазы развития озимой пшеницы					
	посев	весеннее отрастание	выход в трубку	колошение	молочная спелость	полная спелость
Сухой	1,53	1,52	1,50	1,40	0,86	1,24
Сравнительно влажный	1,61	1,62	1,61	1,71	1,64	1,65

Такая закономерность характерна для засушливых зон. Уровень использования почвенных запасов фосфора в зависимости от погодных условий в нечерноземной зоне более стабилен. Наименьшие различия по влиянию погодных условий на уровень усвоения питательных веществ из почвы прослеживаются у яровой пшеницы (Осипова, 2000; Ниловская, Карманенко, 2009).

Погодные условия вегетационного периода могут существенно изменять состояние органического вещества в почве. После уборки урожая в почве остается большое количество корневых и пожнивных остатков, которое зависит от культуры, применяемой агротехники и в значительной степени от погодных условий. В засушливые годы, благодаря более интенсивному развитию корневой системы по сравнению с надземной массой, сравнительно большее количество органических веществ остается в почве. Анализ интенсивности разложения органических остатков и влияния их на почвенное плодородие показал, что важное значение имеет не только количество, но и химический состав органических остатков. Чем больше в растительных остатках азота и уже отношение углерода к азоту, тем интенсивнее они разлагаются и быстрее оказывают положительное влияние на почвенное плодородие. После засушливых лет пожнивные и корневые остатки содержат больше азота, что способствует более интенсивному их разложению и положительно влияет на почвенное плодородие.

Таким образом, большой переходящий фонд азота после засушливых лет возникает не только в результате меньшего выноса азота из почвы с урожаем, но и повышенного его содержания в пожнивных и корневых остатках (Дегтярева, 1981; Обущенко, 2004). Засушливые условия создают предпосылки для активизации микробиологических процессов на следующий год, так как имеется большой фонд неразложившегося органического вещества. Как правило, пониженная продуктивность растений после влажных лет обусловлено не только большим выносом питательных веществ с урожаем

в предшествующем году, но и снижением минерального питания в результате подавленности микробиологической деятельности почвы.

Использование элементов питания из почвы сильно варьирует по почвенно-климатическим зонам. Л.М. Державин (1992) для выявления зависимости значений коэффициентов использования фосфора и калия от уровня их содержания в почве в различных зонах обработал результаты полевых опытов агрохимической службы с основными культурами.

Коэффициенты использования фосфора из почвы значительно колебались в зависимости от почвенно-климатических условий и биологических особенностей культур. Так, при среднем содержании фосфора в почве в опытах с озимой пшеницей они находились в пределах 7,7–14,9%, озимой рожью – 7,5–8,5, яровой пшеницей – 6,6–21,5, яровым ячменем – 7,1–10,7, картофелем – 8,8–20,5, сахарной свеклой – 12,2–20,9, льном-долгунцом – 16,3–18,5%. Наибольшие колебания в значениях коэффициентов установлены в опытах с яровой пшеницей.

Значения коэффициентов использования калия из почвы в большей степени, чем фосфора, варьировали в пределах провинции, культуры, уровня содержания обменного калия в почве. Коэффициенты вариации их значений в опытах с озимой пшеницей достигали 55,4%, озимой рожью – 89,2, яровой пшеницей – 55,9, яровым ячменем – 95,1, картофелем – 84,9, сахарной свеклой – 40,5, льном-долгунцом – 85,8%.

Коэффициенты использования из почвы калия, как и фосфора, снижались при увеличении содержания в ней этого элемента. Так, увеличение содержания обменного калия в почве от низкого до высокого снижало значения указанных коэффициентов в опытах с озимой пшеницей в 2,7–3,4 раза, озимой рожью – 3,9, яровой пшеницей – 2,7–2,8, яровым ячменем – 1,8–2,6, картофелем – 2,9, сахарной свеклой – 2,3–2,6, льном-долгунцом (при увеличении содержания обменного калия в почве от низкого до повышенного) – в 2,0–2,3 раза.

Использование растениями запасов в почве калия, как и фосфора, зависело от почвенно-климатических условий и биологических особенностей культур.

Влияние агроклиматических факторов на особенности применения удобрений

Многолетние исследования, проведенные научными учреждениями страны, дали возможность установить в географическом аспекте закономерности действия удобрений. Было установлено, что при продвижении к юго-востоку и востоку в Европейской части в связи с усилением континентальности климата эффективность удобрений уменьшается. В Азиатской части снижение действия удобрений наблюдается с востока на запад (Минеев, Ивлев, 1975; Панников, Минеев, 1987; Усков и др., 2014).

В Институте экспериментальной метеорологии исследовались причины изменения почвенного плодородия в зависимости от метеорологических

факторов. Было проведено почвенно-климатическое районирование эффективности удобрений (Федосеев, 1985). Проведенный статистический анализ эффективности минеральных удобрений (в дозах 120–180 кг/га действующего вещества), вносимых под зерновые колосовые культуры, по многолетним данным 69 сельскохозяйственных опытных станций, сети станций ВИУА, ЦИНАО, Госсортосети и Госкомитета по гидрометеорологии выявил ряд климатических показателей, значимо связанных с эффективностью NPK парными коэффициентами корреляции 0,42–0,62. К ним относятся: осадки, температура воздуха за летние месяцы, дефицит влажности воздуха, гидротермический коэффициент, влажность почвы и коэффициент континентальности климата.

Чтобы наиболее эффективно использовать удобрения, важно знать прогноз увлажненности в предстоящем году. Это позволит оперативно маневрировать ресурсами минеральных удобрений, направлять их туда, где ожидается хорошая обеспеченность культур влагой и где удобрения смогли бы дать наибольший эффект.

Научными учреждениями страны, в частности ВИУА, были проведены многолетние исследования с целью выявить влияние удобрений при различных погодных условиях. Было выявлено, например, что при средних осадках за осенне-зимний период в количестве 50–60% от многолетней нормы азотные подкормки неэффективны. При выпадении 80% осадков от этой нормы эффективны лишь небольшие дозы азота. При выпадении многолетней нормы осадков рекомендуется подкормка в дозе N_{60} , а при большей норме осадков необходимо вносить более высокие дозы азота. Это объясняется тем, что при выпадении обильных осадков происходит вымывание азота из почвы. Например, на дерново-подзолистых почвах европейской части страны в этих условиях теряется весной около половины нитратов, накопленных с осени, в степной зоне – 35%, в Сибири – около 10% (Панников, 2003).

Показано, что наибольшая отзывчивость озимых на удобрения NPK наблюдается на подзолистых почвах увлажненной зоны (годовая сумма осадков 550–600 мм) со средней плотностью почвы 1,40–1,60. По мере продвижения на юг, в зону черноземов и каштановых почв, эффективность удобрений уменьшается в 3–4 раза. В пределах Европейской части эффективность удобрений по мере роста засушливости климата уменьшается с северо-запада на юго-восток. Так эффективность удобрений под озимые уменьшается от 0,7–0,9 на северо-западе, до 0,2 т/га – на юго-востоке, под яровую пшеницу – соответственно от 0,8 до 0,2–0,3 т/га и под ячмень – от 1,0–1,1 до 0,2–0,3 т/га. В более влажных районах Кубани эффективность удобрений под озимую пшеницу вновь возрастает в среднем до 0,6–0,7 т/га, под яровую пшеницу – до 0,5 т/га, под ячмень – до 0,5–0,7 т/га. На территории Западной Сибири эффективность удобрений под яровую пшеницу уменьшается от 0,5–0,6 т/га в зоне дерново-подзолистых почв до 0,1 т/га в зоне черноземов и темно-каштановых почв. В условиях Дальнего Востока эффективность удобрений высокая и составляет 0,7–0,8 т/га. Высокая эффективность удобрений отмечается на Среднем Урале, в Зауралье, на глубокопромерзающих почвах островных лесостепей Восточной Сибири. Обобщения массовых опытов в пределах одной зоны, особенно нечерноземной не показали чет-

ких изменений эффективности удобрений в зависимости от климатического фактора (Артюшин, Державин и др., 1971).

На основании обобщения результатов полевых опытов Агрохимслужбы отсутствие изменений эффективности удобрений в пределах одной зоны возможно объяснить следующим образом: отсутствует единый подход к объединению результатов опытов в одну статистическую совокупность. Существующее обобщение результатов опытов с удобрениями в пределах страны удовлетворяет в основном потребности административно-экономического районирования, в то время как имеется большая необходимость в географическом сопоставлении результатов опытов в соответствии с общеприродным и специализированным почвенно-агрохимическим районированием земледельческой территории. Принятое обобщение опытов по административно-экономическим районам, а далее и по округам в силу неоднородности в пределах одного экономического района почвенного покрова и климатических условий оказывается недостаточно эффективным не только для дальнейшего совершенствования методики обобщения опытных данных по агрохимическим свойствам почв и эффективности удобрений, но и для решения ряда важных сельскохозяйственных задач, связанных с дальнейшим развитием химизации земледелия в стране. Как известно, границы административно-экономических районов страны и округов далеко не всегда совпадают с границами природного и специализированного почвенно-агрохимического районирования. Поэтому дальнейшее совершенствование методики обобщения опытов с использованием методов математической статистики и следует связывать, прежде всего, с успехами агрохимического районирования. Что касается наиболее освоенной в сельскохозяйственном отношении европейской части дерново-подзолистой зоны, то здесь наблюдается хотя и неполное, но близкое соответствие административных границ с контурами природных провинций, выделенных при проведении работ по почвенно-географическому районированию. В соответствии с отмеченным районированием основная масса опытов государственной агрохимической службы и географической сети проведена в южно-таежной подзоне дерново-подзолистых почв, с достаточным увлажнением и с превышением годовых осадков над испарением по средним многолетним данным в 1,0–1,33 раза. Внутри европейской части зоны выделены следующие провинции:

- Прибалтийская провинция дерново-подзолистых слабогумусированных почв;
- Белорусская провинция дерново-подзолистых слабогумусированных почв и низинных болот. Типичными для этих провинций можно считать сводки опытов по Северо-Западному экономическому району, республикам Прибалтики и Белоруссии, а в соответствии с почвенно-агрохимическим районированием – сводки опытов по Западному агрохимическому району;
- Среднерусская провинция дерново-подзолистых среднегумусированных почв. Для этой провинции типичны сводки опытов на дерново-подзолистых почвах по Центральному нечерноземному району;
- Вятско-Камская провинция дерново-подзолистых высокогумусированных почв включает южные части Кировской и Пермской областей и большую часть Удмуртии. Для этой провинции типичны сводки опы-

тов по Приуралью и сводки опытов по Восточному агрохимическому району Европейской части страны.

Наибольшее количество осадков за год (550–700 мм) при испаряемости 350–400 мм выпадает на территории Прибалтийской провинции, несколько меньше (500–600 мм) при испаряемости 450–500 мм – на территории Среднерусской провинции и почти столько же (490–600 мм) при испаряемости 420–450 мм на территории Вятско-Камской провинции. Более сильно меняется показатель континентальности климата К: в Прибалтийской провинции он равен 126, в Белорусской – 145, в Среднерусской – 154, в Вятско-Камской – 177. Поэтому географические различия эффективности удобрений, по-видимому, в первую очередь определяются изменением температурного фактора или континентальностью климата, а также распределением осадков за вегетационный период.

По данным ВИУА, колебание условий погоды сказывается на эффективности удобрений на одной и той же почве сильнее, чем свойства различных почв в одинаковых климатических районах.

По данным Д.У. Кука (1975) наибольшее влияние на урожай картофеля оказывали типы почвы и погодные условия. При небольших дозах на эффективность фосфорных и калийных удобрений погодные условия и тип почвы влияли в одинаковой степени. Отзывчивость на вторую дозу фосфора уже больше зависела от погодных условий. Отзывчивость картофеля на азот при обоих уровнях обеспечения азотом также больше зависела от погодных условий, чем от типа почвы.

Опыты, проведенные в Алтайском НИИ земледелия и селекции сельскохозяйственных культур (Олифер, Старостенко, 1985; Полуянова, Терехова и др., 2011) показали, что эффективность удобрений зависит от погодных условий предыдущего года. После сухих лет она значительно снижается. Объясняется это высокой обеспеченностью почвы питательными веществами, главным образом подвижным азотом, которые не были использованы растениями в условиях засухи прошедшего года. И, наоборот, после влажного года следует ожидать высокой эффективности удобрений. Расчеты показали, что коэффициент корреляции между ГТК предыдущего лета и эффективностью удобрений равен 0,72.

В льняном севообороте на дерново-подзолистой окультуренной песчано-легкосуглинистой и слабоокультуренной среднесуглинистой почве условия увлажнения играли решающую роль в формировании урожая льна и качества льноволокна. В засушливых условиях прибавка урожая волокна от минеральных удобрений практически отсутствовала, а при хорошем увлажнении составляла 2,0 ц/га. При этом доля участия удобрений в формировании урожая волокна увеличилась с 1,3 до 16,4% (Налиухин, 2015).

В опытах с яровой твердой пшеницей на обыкновенном черноземе эффективность различных доз и соотношений удобрений была разной в зависимости от погодных условий. В условиях повышенного увлажнения фосфорно-калийные удобрения оказались неэффективны, тогда как азотно-фосфорные, азотно-калийные и полное минеральное удобрения дали существенные прибавки урожая. В засушливый год эффективность удобрений по всем вариантам не обнаружилась (Додухова, Едемская, 2015).

М.А. Диброва (1985) проведя анализ влияния погодных условий на продуктивность сахарной свеклы в зоне неустойчивого увлажнения Кубани, отмечает, что с увеличением гидротермического коэффициента урожай повышался. Эффективность удобрений повышалась с увеличением с ГТК. Тем не менее, на формирование урожая большее влияние оказывают конкретные погодные условия.

В качестве примера можно привести оценку эффективности доз минеральных удобрений при различных погодных условиях рис. 30 (Зоидзе, 1987).

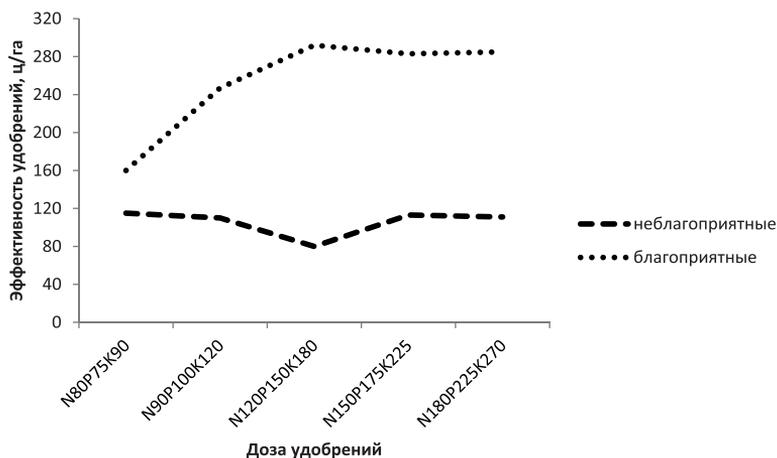


Рис. 30. Изменение эффективности разных доз удобрений

На рисунке 30 хорошо видно, что при одних и тех же дозах удобрений прибавка урожая клубней картофеля, то есть эффективность данного агротехнического мероприятия, в разные по погодным условиям годы различна: в благоприятные годы эффективность очень высокая, в неблагоприятные – низкая.

В данном опыте на формирование урожая оказали конкретные погодные условия. Сделан вывод, что погодные условия вегетационного периода оказывают настолько сильное влияние на развитие растений, что в годы с экстремальными условиями вносимые минеральные удобрения вообще не оказывали положительного влияния на урожайность или вызывали ее снижение (Бахтенко, 2001). Влияние осадков проявилось очень резко: их количество за период вегетации ячменя в пределах 260 мм способствовало увеличению урожайности в 2 раза и более.

На песчаных и супесчаных почвах в опытах при ГТК=1,4–1,7 урожай картофеля составил 265–322 ц/га, прибавка при этом равнялась 158–202 ц/га. Избыточное увлажнение в период клубнеобразования (ГТК>1,7) даже на легких почвах снижает урожай. На среднесуглинистой почве наибольший урожай 355 ц/га и прибавка 140 ц/га получены при ГТК=1,2. В годы с ГТК, равным 2,0 и более или меньше 1,2, урожай и прибавка его от удобрений снижались. На тяжелосуглинистой почве для среднепоздних сортов картофеля наиболее благоприятен ГТК – 1,5.

В опытах с озимой пшеницей, проведенных на ЦОС ВИУА, выявлено, что в среднем за весеннее отрастание – цветение благоприятные годы характеризовались показателем ГТК – 1,6, а в избыточно увлажненные годы ГТК=2,0, в сухие – 0,5. Ту же закономерность наблюдали и до полного созревания озимой пшеницы – ГТК составил 1,22; 1,70; 0,86, что и определило урожай культуры в разные по увлажнению годы.

В районах неустойчивого и недостаточного увлажнения (Левобережье лесостепи, северная степь, ЦЧР, Поволжье) проявляется положительная связь гидротермического коэффициента с урожаем и эффективностью удобрений: чем выше ГТК, тем больше урожай корнеплодов и его прибавка от удобрений. При этом эффективность невысоких доз удобрений под сахарную свеклу (НРК)_{60–90} кг/га выявляется уже при низких значениях ГТК=0,4–0,5, что соответствует выпадению 85–115 мм осадков за май–август при средней температуре воздуха 19–22 °С.

Повышенные дозы удобрений до 120 кг/га и более (каждого элемента) по сравнению с умеренными дают дополнительный эффект лишь при ГТК=0,75 и более.

П.И. Крупкиным и Н.Н. Крыжановской (1976) изучалось влияние погодных условий на эффективность разных видов, доз и сочетаний удобрений в условиях Канской лесостепи Красноярского края. Опыты проводились на комплексах черноземов выщелоченных, оподзоленных и обыкновенных, типичных для региона, по пару, пропашным и зерновым предшественникам. Разнообразие свойств почв и погодных условий в сильной степени отразилось на эффективности удобрений. Значительные колебания эффективности удобрений в пределах одного года обусловлены большим разнообразием свойств черноземов, на которых закладывались опыты. Сопоставление среднеарифметических прибавок урожая от удобрений из 5–6 опытов, полученных в течение одного года, показывает, что в разные годы они значительно отличались друг от друга. Этот факт обусловлен различиями погодных условий по годам.

По отзывчивости на удобрения независимо от условий погоды культуры составляли следующий ряд: ячмень - > яровая мягкая пшеница - > яровая твердая пшеница.

Среди элементов минерального питания наибольшее влияние на повышение урожайности яровых зерновых, особенно яровой мягкой пшеницы, в нормальные по увлажнению и влажные годы оказывал азот (Шафран, Сычев, 2015). Раздельное внесение фосфорных, калийных, фосфорно-калийных удобрений существенно не влияло на повышение продуктивности яровой пшеницы в такие годы. В то же время в сочетании с азотом, как правило, были эффективными как фосфорные, так и калийные туки.

В опытах с озимой рожью отличались резкие колебания урожая по годам, обусловленные главным образом (на 77%) метеорологическими факторами. Наибольшая изменчивость величины урожая отмечена в варианте с внесением под озимую рожь N 60. Применение полного минерального удобрения отдельно и в сочетании с последствием навоза оказывало стабилизирующее действие на величину урожаев озимой ржи по годам, снижая

относительную изменчивость урожаев (коэффициент вариации) с 27–31 до 22–25%.

Показано, что по значимости в стабилизации урожаев ржи отдельные виды питательных веществ удобрений располагаются в такой последовательности: P_2O_5 -> K_2O -> N, снижая варьирование урожаев соответственно на 3,1; 1,1 и 0,6%. Последствием навоза приводит наряду с повышением продуктивности озимой ржи к заметному увеличению колебаний урожайности культуры по годам.

Многолетние исследования, проведенные А.Ф. Стулиным (1994) показали, что на черноземе выщелоченном в условиях Воронежской области, несмотря на его высокое потенциальное плодородие, о чем свидетельствует продуктивность кукурузы в благоприятные годы, когда урожай зеленой массы достигает 300 и зерна 40 ц/га, применение удобрений является существенным фактором повышения урожая. Достоверная прибавка урожая кукурузы в засушливые годы от внесения удобрений была в пределах 14–99 ц/га зеленой массы, 9,1–19,6 ц/га зерна, в нормальные годы соответственно 10–102 и 7,2–16,2 ц/га, во влажные годы – 21–127 и 7,5–21,7 ц/га. Величина прироста урожая кукурузы зависит как от вида и сочетания удобрений, так и от количества осадков и их распределения, и температурного режима периода вегетации.

Накопленный к настоящему времени научный и производственный опыт однозначно указывает на целесообразность корректировки минерального питания растений дополнительным применением минеральных удобрений в случае проявления аномалий погодных условий. Целесообразность этого подтверждается результатами статистической обработки большого массива экспериментального материала, относящегося к основным районам развития земледелия.

Влияние агрометеорологических условий на урожайность сельскохозяйственных культур

В нашем представлении добиться значительного роста урожайности сельскохозяйственных культур, обеспечения ее устойчивости, ослабления зависимости ее от неблагоприятных природно-климатических условий, исключение потерь урожая возможно только при учете почвенно-климатических, погодных и агротехнических условий. Задача агрометеорологии при этом должна заключаться в определении степени благоприятности погодных и почвенно-климатических условий для формирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Анализ динамики ежегодных урожаев сельскохозяйственных культур за продолжительные периоды в разных почвенно-климатических зонах показывают, что колебания и изменения урожайности обусловлены следующими факторами (Усков и др., 2014): пространственно-временной неоднородностью агроклиматического потенциала территорий, технологической и агрохимической обеспеченностью уровня продуктивности, колебаниями и изменениями по годам погодных условий.

В целом с повышением культуры земледелия урожайность сельскохозяйственных культур растет. Если при этом зависимость урожайности от погодных и климатических условий ослабляется, то обсуждаемая проблема носит временный характер и в будущем потеряет свою актуальность. Если повышение культуры земледелия не уменьшает зависимости урожайности от условий среды, то данная проблема актуальна сейчас и будет актуальна в будущем.

Многие исследователи давно указывали на возрастание зависимости продуктивности сельскохозяйственных культур от погодных условий с повышением культуры земледелия.

Подчеркивалось, что чем выше организация производства, продуктивные сорта, использование удобрений и агротехники, то есть чем выше урожай, тем более высоким должны быть коэффициенты корреляции между урожаем и условиями погоды (Зоидзе, 1987).

Проанализировав колебания урожайности в различных странах мира (Англия, Канада, Германия, США) установлено, что количество вносимых в почву удобрений, уровень агротехники существенно различались, однако, колебание урожайности наблюдалось во всех странах. Для мелких хозяйств с малой площадью поля причины могут быть разные. В среднем для больших территорий исключено, чтобы свойства сортов, плодородие почвы, применяемая агротехника существенно менялись из года в год. Естественно, что эти факторы изменяются, но постепенно и направлено, что ведет к тенденции увеличения урожайности. Следовательно, есть фактор, который меняется из года в год. Этим фактором является погода.

Влияние климатических факторов на урожай и биопродуктивность отмечается многими авторами. При этом, корреляция с урожайностью устанавливается как для отдельных параметров климата (количество осадков, суммы температур более 10° за теплый период, по месяцам и декадам), так и для обобщенных показателей: коэффициента увлажнения, гидротермического коэффициента.

Так, например, показано, что биологическая продуктивность прямо пропорциональна величине суммы температур более 10° (Карманов, 1980), однако, для сахарной свеклы, однолетних и многолетних трав урожай от $E_t > 10^{\circ}$ возрастает медленнее. Показано, что коэффициент биологической продуктивности прямо пропорционален коэффициенту увлажнения. Однако, при $K=1,1$ дальнейший его рост не влияет на увеличение биопродуктивности. При этом многолетние травы уменьшают урожай с уменьшением коэффициента увлажнения, а зерновые, однолетние травы и подсолнечник реагируют слабее.

Х.Г. Тооминг (1984) установил понятия эталонных урожаев: биологического потенциального и действительно возможного. Потенциальный урожай обеспечивается ресурсами солнечной радиации. Однако потенциальный урожай в действительности ограничивается отклонением метеорологических факторов от оптимальных значений. Определяя действительно возможные урожаи, он вводит функцию снижения урожая водным дефицитом, недостатком теплового или других метеорологических факторов.

А.Р. Константинов (1974, 1978) разработал основы оценки почвенно-климатических ресурсов, определив положения, которые необходимо учитывать при выборе методов анализа экспериментальных данных. Статистические ряды агрометеорологических наблюдений, проводимых по единой методике, ограничены, а члены выборки обладают большой связанностью, вследствие чего число независимых наблюдений сокращается. Анализ влияния всех факторов, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур заведомо невозможно учесть. Дать количественную характеристику влияния на урожайность типа почвы, вида культуры, ее сорта, вида и дозы удобрений, приемов агротехники и так далее, используя обычные статистические методы, часто бывает трудно. Он предлагает использовать остаточный метод анализа, который позволяет последовательно исключать влияние на урожайность каждого из определяющих факторов, и применим для построения комплексной физико-статистической модели «климат–почва–урожай». Рассматриваемая модель учитывает четыре комплексных фактора урожайности – биологические особенности культур, метеорологические факторы, плодородие почвы и уровень агротехники. Эта модель позволила определить величины возможных урожаев озимой и яровой пшеницы и кукурузы. Метеорологический блок включает: среднегодовую температуру воздуха; среднегодовую влажность воздуха, сумму осадков за год, среднюю температуру воздуха за вегетационный период, среднюю влажность воздуха за период вегетации, количество продуктивной влаги, высоту снежного покрова за период с t воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, сумму температур воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, гидротермический коэффициент. Блок плодородия учитывает реакцию почвенной среды, объемный вес почвы, влагозапасы почвы. Блок агротехники включает: предшественники, вид удобрений, количество удобрений и др. В биологический блок входит вид культуры, отзывчивость на удобрения, выход зерна, зимостойкость, подверженность болезням, вредителям и прочие показатели.

При помощи статистических группировок и парной корреляции устанавливается наличие или отсутствие связи урожая с плодородием почв, производственными и климатическим факторами. Множественная корреляция дает возможность выявить наиболее существенное влияние на продуктивность культур рассматриваемых факторов и включить важные из них в многофакторную модель урожая. Автор подчеркивает, что нельзя раздельно районировать такие факторы урожайности, как агроклиматические условия и почвенное плодородие.

Интересны результаты оценки уровня реализации потенциальной урожайности зерновых культур, проведенной А.Р. Константиновым (1978) на примере Калужской области. Потенциальная урожайность рассчитывалась по формулам связи урожайности на госсортоучастках с почвенно-климатическим условиями. Средняя взвешенная величина, вычисленная по каждому району, сравнивалась со средней фактической урожайностью в районе. Разница между потенциальной и фактической урожайностью озимой пшеницы на большей части территории области составляла 10–20 ц/га, в одном из районов – 26 ц/га. У озимой ржи различия в потенциальной и фактической урожайности составляли 20–25 ц/га, овса – 15–20 ц/га, ячменя – 20–25 ц/га.

Н.М. Богдевичем, Ф.В.Шатиловой и др. (1985) зависимость урожайности от климатических условий предлагается описывать следующей зависимостью:

$Y_{\text{НРК}} = f(\text{рН}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}, \text{гумус}, \text{КПУ})$, где КПУ – коэффициент погодных условий.

$Y_{\text{N}} = f(\text{N}, \text{рН}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}, \text{Г}, \text{КПУ})$

$Y_{\text{P}} = f(\text{P}, \text{рН}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}, \text{Г}, \text{КПУ})$

$Y_{\text{K}} = f(\text{K}, \text{рН}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}, \text{Г}, \text{КПУ})$, где Y_{N} , Y_{P} , Y_{K} – прибавки от азотных, фосфорных, калийных удобрений; N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений; рН, P_2O_5 , K_2O , Г – показатели агрохимических свойств почв. КПУ позволяет в относительных единицах оценить действие погоды на урожай в конкретном году по отношению к наилучшим погодным условиям, принятым за 100.

В то же время Л.Н. Петровой (1986) показано, что связь каждого из отдельных факторов внешней среды с урожайностью неустойчива. Автор отмечает, что при выделении характерных типов погодной обстановки для конкретной культуры необходима комплексная оценка сложных и динамических взаимоотношений между факторами внешней среды и растениями.

Сопоставление основных метеорологических показателей с урожаем озимой пшеницы в среднем по Ставропольскому краю, зонам, сортоучасткам на экспериментальных полях за длительный период показало, что использование какого-либо одного из параметров для оценки условий формирования урожая недостаточно. Связь каждого из них с урожаем неустойчива или вообще отсутствует. Следовательно, при выделении характерных типов погодной обстановки для конкретной культуры необходима комплексная оценка сложных, а главное, динамических взаимоотношений между факторами внешней среды и растениями. При этом немаловажное значение имеет оценка культуры земледелия, применяемой агротехники, поскольку, чем они лучше, тем меньше зависимость урожая от погодных условий.

Предложенная Л.Н. Петровой классификация погодных условий, подтвержденная данными по урожаю озимой пшеницы, представляет основу для определения типа погоды по метеорологическим параметрам и составления любых сценариев для ее последующего использования в моделях. Эти сценарии могут формироваться либо на основе произвольной расстановки типов лет с учетом частоты их встречаемости, либо заменой части неблагоприятных лет в базовом десятилетии на засушливые.

В.П. Дмитриенко и А.М. Кекухом (1965) разработана модель географического максимума урожайности, которая позволяет определить тот уровень урожайности, которого можно достигнуть на данной территории при оптимальных погодных условиях и определенном уровне земледелия. Повышение уровня агротехники способствует росту географического максимума урожайности. Модель географического максимума включает показатели эффективного плодородия почвы, уровни обработки почвы, количество удобрений и суммарный коэффициент полезности климата для конкретной культуры. Ими был предложен суммарный коэффициент полезности кли-

мата для конкретной культуры, с учетом которого разработана модель географического максимума урожайности, меняющаяся от уровня агротехники и удобрений. В то же время, Шатилов И.С. и Чудновский А.Ф. (1980) считают, что в основу программирования зависимости урожая от климатических факторов должен быть положен весь технологический процесс от посева до уборки с учетом агрометеорологической обстановки.

Е.Е. Жуковским (1982) предложен метод программирования урожайности на вероятностной основе: $Y_{\text{пр}} = O_c + t_0 \sigma_{\text{yc}}$, где O_c – среднее значение урожайности на конкретном поле с учетом климатических ресурсов и реального плодородия почв; σ_{yc} – среднее квадратичное отклонение урожая, t_0 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от хозяйственного параметра h . Хозяйственный параметр h представляет собой отношение потерь, которые несет хозяйство, когда фактический уровень Y_c ниже выбранного уровня $Y_{\text{пр}}$, к потерям при таком же отклонении Y_c от $Y_{\text{пр}}$ в другую сторону (Сычев, 2003).

И.М. Стребковым (1983, 1989) разработаны математические модели, в которых блок погоды выражен через обобщенный коэффициент погодных условий (КПУ) и представляет собой отношение среднего урожая в опыте за данный год к урожаю на тренде.

$$\text{КПУ} = \frac{Y}{Y_{\text{тр}}}.$$

Это отношение характеризует совокупное влияние всего комплекса погодных условий на урожай изучаемой культуры в данном году. Если отношение меньше единицы, то это означает, что погодные условия складывались для растений менее благополучно, если больше единицы – благополучно. Степень отклонения от единицы указывает на степень благоприятности или неблагоприятности складывающихся погодных условий. КПУ наиболее полно описывает действие погодных условий на урожай.

С помощью предложенного им способа количественного выражения погодных условий получены достаточно работоспособные математические модели системы «почва–климат–удобрения–урожай».

Обобщение многолетних стационарных опытов с помощью указанных моделей позволило с большей достоверностью определить степень взаимодействия основных факторов системы, их частное и совокупное влияние на урожай. Изменяясь от экстремальных значений до области оптимума, каждый фактор вносит свою долю в варьирование урожая (прил. 12). Вопреки установленному мнению и в Нечерноземной полосе – зоне достаточного увлажнения – погодным условиям принадлежит наиболее существенная роль в определении продуктивности растений. На их долю приходится в среднем от 44 до 55% общей прибавки урожая, в том числе для озимой пшеницы 50%, для ячменя 54%, для картофеля 44%. На долю удобрений приходится соответственно 28, 23 и 28%, а на долю оптимизации содержания подвижного фосфора в почве – 22, 22 и 28% общего прироста урожая.

В зависимости от погодных условий урожай изучаемых культур колеблется:

на слабоокультуренных почвах

(содержание подвижного фосфора <5 мг/100 г почвы)

	озимой пшеницы	от 4,1 до 30–31 ц/га
без удобрений	ячменя	от 5,4 до 24«
	картофеля	от 50 до 100«
	озимой пшеницы	от 25 до 50–53«
с удобрениями	ячменя	от 15 до 35–37«
	картофеля	от 125 до 280«

на хорошо окультуренных почвах

(содержание подвижного фосфора 12–15 мг/100 г почвы)

	озимой пшеницы	от 17 до 52 ц/га
без удобрений	ячменя	от 14 до 35–36«
	картофеля	от 100–120 до 270–280«
	озимой пшеницы	от 30 до 60–65«
с удобрениями	ячменя	от 18–20 до 43–46«
	картофеля	от 140–150 до 400–410«

И.М. Шапошниковой (1987) разработана экспертно-описательная модель плодородия черноземов с учетом метеорологических показателей. Плодородие почв конкретных территорий и участков с точки зрения их растениеводческих свойств, с учетом метеорологических факторов было оценено на основании расчета почвенно-экологического индекса ПЭи:

$$ПЭ_{и} = 12,5(2-V) \cdot n \frac{\sum_{t} ^{\circ} > 10^{\circ} (КУ-0,05)}{КК+100},$$

где V – плотность почвы слоя 0–100 см;

n – «полезный» (безбалластный) объем почвы в слое 0–100 см;

$\sum_{t} ^{\circ} > 10^{\circ}$ – среднегодовая сумма температур выше 10 °С;

КУ – коэффициент увлажнения (по Иванову);

КК – коэффициент континентальности (по видоизмененной Кармановым формуле Иванова).

Показатели, входящие в формулу, определены экспериментально согласно методике комплексной агрохимической характеристики почв: плотность $V=1,16 \text{ г/см}^3$, безбалластный объем почвы $n=0,99$, величины $\sum_{t} ^{\circ} > 10^{\circ}$.

В среднем за 23 года коэффициент увлажнения (КУ) равнялся 0,6, коэффициент континентальности (КК) – 178, почвенно-экологический индекс (ПЭ_и) – 67 на почве среднего уровня удобрённости и 77 – на высоком. Однако по годам исследований эти показатели существенно различались, поэтому годы исследований по метеорологическим условиям классифици-

ровали на две группы. Годы, отнесенные к I группе, были засушливыми, с повышенным температурным режимом весной и летом. Коэффициент увлажнения в среднем составил 0,49, коэффициент континентальности – 173, почвенно-экологический индекс – 60. Годы II группы отличались сравнительно благоприятным температурным режимом, с осадками выше среднегогодового количества, КУ – 0,74; КК – 185; ПЭ_и – 84. Следовательно, система параметров двух уровней удобрения обыкновенного чернозема рассчитывалась на получение урожая сельскохозяйственных культур в годы, неблагоприятные и благоприятные (табл. 130).

Таблица 130

Урожайность основных культур (ц/га) зернопаропропашного севооборота в годы неблагоприятные (I) и благоприятные (II)

Культура	Средняя удобрённость		Высокая удобрённость	
	I	II	I	II
Озимая пшеница по пару	40–45	50–55	55–60	60–65
Озимая пшеница после непаровых предшественников	20–25	35–40	35–40	45–50
Горох	15–18	20–25	20–25	25–30
Кукуруза на силос	150–180	300–350	250–300	350–450
Яровой ячмень	15–25	25–30	25–30	30–35
Подсолнечник	15–18	20–25	25–28	28–30

Следовательно, даже в самые неблагоприятные годы можно ослабить отрицательное действие экстремальных погодных условий повышением плодородия почв, прежде всего увеличением содержания подвижного фосфора до оптимальных его значений. Внесение удобрений в этих условиях обеспечивает в самые неблагоприятные годы урожая: озимой пшеницы 25–30 ц/га, ячменя 18–20 ц/га, картофеля 140–150 ц/га. Погодные условия оказывают влияние на проявление других факторов системы: например, в благоприятные годы, значительно возрастает эффективность минеральных удобрений, увеличиваются прибавки от обеспеченности почв подвижным фосфором.

Л.М. Державин (1992) для изучения влияния агрохимических свойств почв и погодных условий на урожайность и эффективность удобрений использовал следующие уравнения:

m

$$Y(\Delta Y) = B_0 + \sum_{i=1}^m B_i X_i;$$

mm

$$Y(\Delta Y) = B_0 + \sum_{i=1}^m B_i X_i^{0,5} + \sum_{j=1}^m B_{ij} X_i^{0,5} X_j^{0,5}$$

mm

$$Y(\Delta Y) = B_0 + \sum_{i=1}^m B_i X_i + \sum_{j=1}^m B_{ij} X_i X_j,$$

где $Y(\Delta Y)$ – урожайность (прибавка урожая), т/га;

B_0 – свободный член;

m – число наблюдений;

X_1, X_2, \dots, X_{ij} – независимые переменные.

В.Е. Тихоновым (2003) при оценке урожайности озимой пшеницы, в зависимости от климатических условий, в Оренбургской области на черноземах и каштановых почвах показано, что общая закономерность изменения урожая зерновых культур состоит в их случайном колебании по годам на фоне тренда (сглаженная кривая, отображающая проявление постоянно действующего фактора – хозяйственной деятельности человека).

В.Е. Тихонов (2003) считает, что продуктивность агроценозов по годам можно рассматривать, как случайный процесс, с двумя составляющими: детерминированный, обусловленный трендом, и собственно случайный – результат действия агрометеорологических условий. Динамика отклонения урожая от тренда рассматривается автором, как некоторое наложение гармонических колебаний.

Общий вид модели, описывающей зависимость урожайности от погодных условий вегетации представляется в следующем виде:

n

$$Y = a + \sum_{i=1}^n a_i X_i, \text{ где } Y - \text{описываемая зависимость; } a_0, a_1 \dots a_n -$$

$i=1$

коэффициенты; $X_1 \dots X_n$ – влияющие на урожай факторы погоды.

При описании зависимости урожая яровой пшеницы от климатических факторов автором получены следующие зависимости (табл. 131).

Таблица 131

Зависимость урожая яровой пшеницы от климатических факторов для степной и сухостепной зон обыкновенных черноземов и каштановых почв

Независимая переменная	Коэффициента	Доля влияния фактора, %
Предуральская провинция степной зоны обыкновенных черноземов		
KY – 5–6	302,9	29,5
(KY – 8–9) ²	–83,9	12,7
Заволжская провинция степной зоны обыкновенных черноземов		
KY – 5	298,3	14,4
(KY – 6–7) ²	– 1246,8	12,2
KY – 5–6–7	– 1496,1	25,8
OC – 12n – 1–2	0,31	6,5
Заволжская провинция сухостепной зоны темно-каштановых почв		
OC – 12n – 1–2	0,53	41,8
KY – 5–6–7	308,5	19,0
Казахстанская провинция степной зоны южных черноземов		
OC – 8g–9n	–0,33	8,7
(KY – 5–6–7)	812,3	26,6

Примечание: KY – коэффициент увлажнения, OC – осадки, мм; 5, 6, 7 – месяцы текущего года, OC – 12 – n – осадки 12 месяцев предыдущего года.

Влияние климатических условий на урожай сельскохозяйственных культур весьма существенно и достигает 50% от общей прибавки урожая. При этом доля влияния климатических условий на урожай отдельных сельскохозяйственных культур неодинакова. Доля влияния климатических условий на урожай сельскохозяйственных культур отличается и для разных типов почв, их окультуренности и удобрённости. В то же время, урожай сельскохозяйственных культур определяется не только климатическими условиями года выращивания культуры, но и климатическими условиями предыдущего года, в связи с существующим влиянием климатических условий на свойства почв, состав растительных остатков предыдущей культуры, на микробиологическую активность почв.

С нашей точки зрения, урожай сельскохозяйственных культур и свойства почв, в большей степени, определяются не усредненными климатическими показателями за весь период вегетации, а параметрами климатических показателей в отдельные фазы развития растений, их соответствием экологическим требованиям выращивания отдельных сельскохозяйственных культур. Климатические факторы, в значительной степени, влияют на биопродуктивность не в соответствии с величиной отдельных климатических показателей, а пропорционально их отношению. Большое значение для формирования свойств почв и биопродуктивности угодий имеет закономерная смена климатических параметров во времени.

При оценке зависимости урожая от климатических условий необходимо учитывать эффекты синергизма и антагонизма, протекающие при взаимодействии факторов друг с другом.

При оценке зависимости урожая от климатических факторов необходимо учитывать предысторию развития системы почва-растение в определенных климатических условиях: количество осадков, сумма температур за определенные месяцы прошедшего года. Часто это количество осадков зимой, температура зимой и т. д.; NPK в почве и в растениях осенью; Al, Mn в почве весной и т. д.

Зависимость урожая от климатических факторов более точно описывается не методом парных корреляций для зависимости урожая от любого фактора, а эмпирической зависимостью урожая от закономерной смены климатических показателей во времени в течение вегетации, от соответствия этой смены экологическим требованиям отдельных культур в течение вегетации.

В ряде случаев более тесная зависимость урожая от климатических факторов отмечается не при использовании абсолютных значений показателей климата, а процента их отклонений от оптимума. Более тесная зависимость урожая от климатических факторов отмечается и при использовании соотношений отдельных показателей климата (коэффициента увлажнения, отношения W/t° , R/W , N/P и т. д.).

С нашей точки зрения, в моделях все параметры внешней среды необходимо учитывать для тех периодов жизни растений, когда их влияние на развитие растений наиболее значимо (а не в среднем за сезон). Однозначное влияние любого фактора на урожай проявляется только в определенных пределах его воздействия.

Таким образом, при оценке влияния климатических факторов на хозяйственный урожай необходимо учитывать и его влияние на свойства почв, изменение которых в результате погодных условий может превышать долю влияния на растения непосредственно климатических показателей. При оценке влияния климатических факторов на хозяйственный урожай необходимо учитывать и их влияние на возможность обработки почв, применение удобрений и средств защиты растений, уборку урожая и, в ряде случаев, на его сохранность.

Адаптация сельскохозяйственных исследований к изменению климата

Изменения климата происходили всегда, неизбежны и в будущем. Однако если говорить о временных масштабах от нескольких десятков лет до нескольких сотен лет, то для их объяснения и прогноза наряду с «быстродействующими» малыми естественными факторами, необходимо рассматривать направленные наиболее сильные антропогенные воздействия – значительное повышение концентрации парниковых газов.

Это в настоящее время является доминирующей научной концепцией, согласно которой главной причиной современного потепления является усиление парникового эффекта атмосферы, вызванное антропогенными эмиссиями парниковых газов, в первую очередь CO₂ (Мохов, 2012, 2013; Замолодчиков, 2016).

На территории России в настоящее время на сельское хозяйство приходится около 10% учитываемых антропогенных источников парниковых газов (рис. 31).

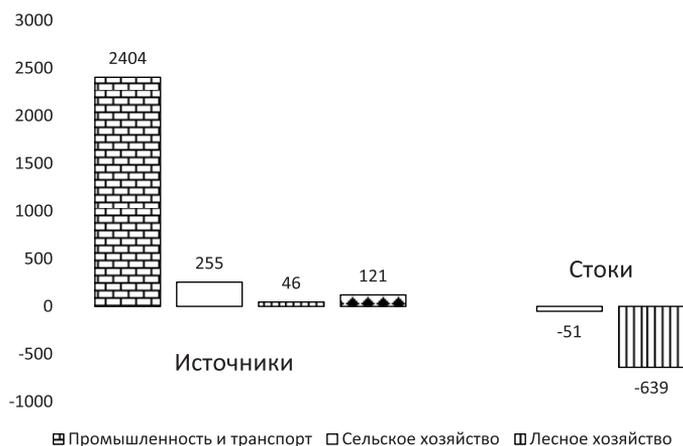


Рис. 31. Антропогенные источники и стоки парниковых газов в Российской Федерации (данные кадастра за 2014 г.)

Большая часть сельскохозяйственных источников связана с почвами сельскохозяйственных угодий, меньшая – с животноводством (рис. 32).

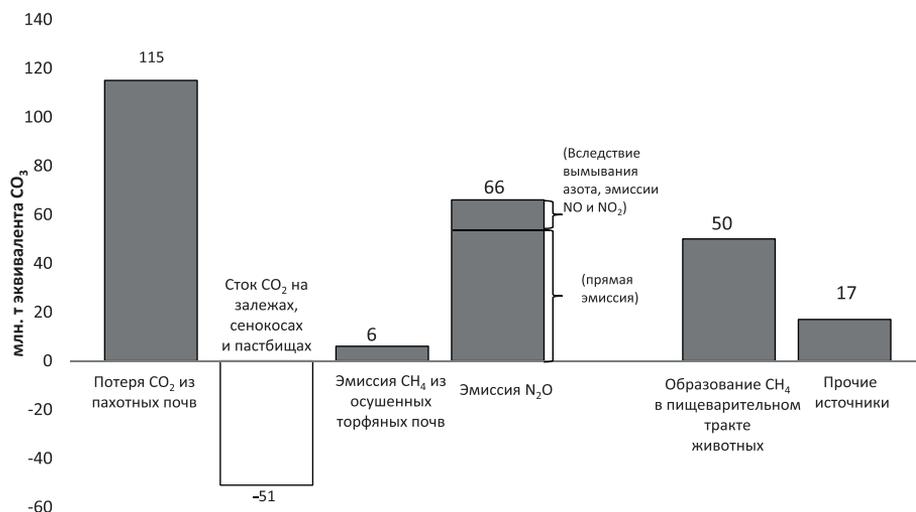


Рис. 32. Антропогенные источники и стоки парниковых газов в сельском хозяйстве России (данные кадастра за 2014 г.)

Почвы относятся к главным компонентам глобальных циклов углерода и азота и являются существенными источниками или стоками ряда газов, которые воздействуют на парниковый эффект атмосферы. Диоксид углерода, метан и оксид диазота вносят прямой вклад в парниковый эффект за счет поглощения инфракрасного излучения. Кроме того, косвенные эффекты CH₄ и N₂O связаны с их воздействием на атмосферные концентрации других соединений.

К газам, важным, в первую очередь, в связи с косвенным влиянием на парниковый эффект, относятся монооксид углерода, летучие органические соединения (помимо CH₄), а также NO и NO₂. Все названные соединения являются субстратами фотохимических реакций в тропосфере, влияющих на концентрацию озона. Поступление аммиака в атмосферу воздействует на содержание аэрозолей. Кроме того, результатом атмосферных выпадений NO, NO₂ и NH₃ оказывается дополнительная эмиссия N₂O из почв и океана.

В связи с этим обмен углерода и азота между почвой и атмосферой, напрямую определяющий свойства почвы и ее плодородие, важен также как фактор, воздействующий на глобальный климат.

Почва является местом временного депонирования углерода, фиксированного растениями при фотосинтезе. Минерализация органических соединений почвенными микроорганизмами приводит к возвращению углерода в атмосферу.

Таким образом, воспроизводство органического вещества и регулирование влияния почвы на атмосферную концентрацию диоксида углерода представляют собой две стороны единой проблемы. Динамика органического вещества прямо связана с плодородием почвы, и контролируемые ее факторы сравнительно подробно изучены. Эта научная информация оказывается

востребованной также для решения задачи, которая начала рассматриваться в последние десятилетия, – оценки почвы как фактора состава атмосферы.

Обобщение результатов несистематических исследований, выполненных за последние 60 лет, позволяет судить о различиях дыхания пахотных почв в пределах территории страны. Так, годовое дыхание дерново-подзолистых почв агроценозов по данным 47 наблюдений оценивается в 4,2 т/га, дыхание разных подтипов черноземов по данным от 1 до 10 наблюдений оценивается в 1,3–7,3 т/га (Кудеяров, Заварзин и др., 2007).

Количество наблюдений для разных типов почв изменяется от 1 для бурых лесных почв до 47 для дерново-подзолистых, что недостаточно для того, чтобы сделать обобщения по областям и регионам.

22 апреля 2015 г. принято распоряжение Правительства № 716-р, которое предусматривает распространение системы учета источников и стоков парниковых газов на региональный уровень и уровень субъектов хозяйственной деятельности. Предусматривается также разработка регионами программ по ограничению эмиссии и повышению качества поглотителей этих газов.

Для решения поставленных задач по учету и ограничению выбросов парниковых газов каждым субъектом хозяйственной деятельности требуется проведение систематического контроля их эмиссии и поглощения в агроценозах.

Стационарные длительные полевые опыты Геосети являются перспективными экспериментальными площадками для изучения обмена углерода и азота между почвой и атмосферой, поскольку они:

- охватывают все сельскохозяйственные регионы РФ;
- являются постоянными экспериментальными площадками, на которых моделируют условия, которые затем распространяются на большие производственные территории;
- содержат необходимую информацию о количестве и динамике органического углерода в почве.

Длительные опыты позволяют получить информацию:

- о связи изучаемых показателей с почвенными и климатическими условиями в широком интервале их изменения;
- о влиянии различных агротехнологий на поглощение и эмиссию парниковых газов, содержание и трансформацию соединений углерода и азота в почве.

Отдельные методы, которые используются в настоящее время для изучения процессов обмена углерода и азота между почвой и атмосферой, ориентированы на получение информации о разных показателях (табл. 132).

Эти особенности методов определяют выбор между ними в зависимости от задач конкретного исследования и, конечно требуют значительных усилий по организации исследований.

Однако во всех стационарных опытах есть регулярная информация о содержании органического углерода в почве, урожаях культур и вносимых удобрениях в течение всего времени проведения эксперимента. На этой информации основан наиболее точный метод оценки чистой продуктивности

экосистемы – метод определения динамики органического углерода почвы, который имеет самое большое значение для анализа результатов обмена почвы и атмосферы углекислым газом.

На данных о динамике запаса органического углерода почвы основана оценка величины почвенно-атмосферного обмена для интервалов порядка нескольких лет и более продолжительных, балансовые расчеты стока и эмиссии углерода в агроценозе, оценка влияния применяемых агротехнологий на уровень гумусированности почв.

Таблица 132

**Процессы выделения и поглощения парниковых газов
в почвах и методы их оценки**

Процесс	Показатели	Методы оценки
Аэробное окисление органического вещества почвы $[C^{\circ}] + O_2 \rightarrow CO_2$	Потенциальная активность аэробного окисления	Инкубационный
	Дыхание почвы	Статический камерный
	Чистый обмен CO_2 между экосистемой и атмосферой	Турбулентной ковариации; определение динамики запаса органического углерода
Метаногенез $2 [C^{\circ}] + 2 H_2O \rightarrow CO_2 + CH_4$	Потенциальная активность образования CH_4	Инкубационный
	Поток CH_4 между почвой и атмосферой	Статический камерный; турбулентной ковариации
Окисление метана $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	Потенциальная активность окисления CH_4	Инкубационный
	Поток CH_4 между почвой и атмосферой	Статический камерный; турбулентной ковариации
Денитрификация $2 [C^{\circ}] + 2 NO_3^- + 2 H^+ \rightarrow 2 CO_2 + N_2O + H_2O$	Потенциальная активность денитрификации	Инкубационный
	Поток N_2O между почвой и атмосферой	Статический камерный
Гумификация	Разложение и закрепление органического углерода в почве	Определение содержания $C_{орг}$ в почве в течение нескольких ротаций севооборота

В процессе фотосинтеза в первичной продукции агроценоза происходит ассимиляция углекислого газа атмосферы. Часть ассимилированного углерода поступает в почву с растительными остатками и аккумулируется в органическом веществе почвы. Накопление углерода в составе гумуса почв является наиболее эффективным способом снижения эмиссии CO_2 в пахотных почвах. Направленность и величина сальдо баланса ($\pm \Delta C_{П}$) определяют характер участия углерода первичной продукции, аккумулированной в результате фотосинтеза, в сохранении плодородия почв и дают возможность четко оценить экологическую эффективность используемого агроприема (типа севооборота, системы удобрения).

Расчетный метод количественного определения эмиссионных потерь CO_2 из почв агроценозов основан на анализе информационных баз данных длительных опытов, позволяющих достаточно корректно оценить составляющие цикла углерода за период опыта при использовании агротехнологий различной интенсивности и, следовательно, существенно отличающихся уровнем продуктивности (Шевцова, Романенков и др., 2015).

Количество атмосферного углекислого газа, поглощенного агроценозом (СПА), определяют по содержанию углерода в чистой первичной продукции, массе корневых и пожнивных остатков.

$$C_{\text{ПА}} = C_{\text{УР}} + C_{\text{ОСТ}} + C_{\text{УД}}$$

Приходную часть баланса почвенного углерода ($C_{\text{ПП}}$) составляют растительные остатки возделываемых культур ($C_{\text{ОСТ}}$) и углерод навоза ($C_{\text{УД}}$), вносимого в отдельных вариантах опытов.

$$C_{\text{ПП}} = C_{\text{ОСТ}} + C_{\text{УД}}$$

Массу корневых и пожнивных остатков определяют прямым отбором и взвешиванием, или рассчитывают по регрессионным уравнениям Ф.И. Левина, содержание углерода в растительных остатках ($C_{\text{ОСТ}}$) и в органических удобрениях ($C_{\text{УД}}$) определяют по справочным данным или химическими методами.

По разности конечного ($C_{\text{П2}}$) и начального ($C_{\text{П1}}$) запаса углерода в почве рассчитывают величину депонирования фотосинтетического углерода в устойчивое органическое вещество почвы или его потери (сальдо баланса углерода почвы).

$$\pm \Delta C_{\text{П}} = C_{\text{П2}} - C_{\text{П1}}$$

Результирующий нетто поток CO_2 агроценоза может быть представлен как разность между поглощением CO_2 из атмосферы и эмиссией оксида углерода в результате дыхания почвы. Дыхание почвы зависит от жизнедеятельности гетеротрофов, корневого дыхания, разложения мертвого растительного материала и определяется камерным или расчетным методом по разности между углеродом, поглощенным из атмосферы, и закрепленным в почве.

$$C_{\text{ЭА}} = (C_{\text{УР}} + C_{\text{ОСТ}} + C_{\text{УД}}) - (C_{\text{П2}} - C_{\text{П1}})$$

Расходную часть баланса – эмиссию диоксида углерода из почвы ($C_{\text{ЭП}}$) рассчитывают по разности между приходными статьями баланса и количеством депонированного в почву углерода.

$$C_{\text{ЭП}} = (C_{\text{ОСТ}} + C_{\text{УД}}) - (C_{\text{П2}} - C_{\text{П1}})$$

Для минеральных почв наиболее распространенный метод определения общего содержания углерода, входящего в органические соединения, – окисление раствором дихромата калия в серной кислоте (метод Тюрина). Модификации этого метода описаны в ГОСТах и методических руководствах по анализу почв (Орлов, Гришина, 1981; ГОСТ 26213-91; Procedures for soil analysis, 2002). Однако он неприменим для анализа почв органо-генных почвенных горизонтов, в этом случае используется сухое озоление (ГОСТ 27784-88).

После определения содержания органического углерода и плотности сложения пахотного горизонта рассчитывают запас углерода. По его многолетней динамике определяют знак и величину чистого обмена экосистемы.

Исследование эмиссии и стоков парниковых газов в полевых опытах Геосети

Для оценки воздействия природных и агротехнических факторов на обмен углерода и азота между пахотными почвами и атмосферой во ВНИИ агрохимии была разработана программа исследований эмиссии и стока парниковых газов в полевых опытах Геосети (Сычев, Чистотин и др., 2016). Реализация программы позволит уточнить относящиеся к сельскохозяйственному сектору данные, которые необходимы для ведения национального кадастра парниковых газов и для контроля выполнения международных обязательств Российской Федерации по ограничению их выбросов. Полученная информация также необходима для оценки воздействия экономических и технологических мероприятий на выбросы, поглотители и накопители парниковых газов.

На основании проведенных исследований были разработаны следующие требования к системе мониторинга эмиссии и стоков парниковых газов в полевых опытах Геосети:

1. При выборе опытов должно быть учтено распределение макроклиматических и почвенных параметров для пахотных земель России.

2. Измерения следует проводить на контроле, на залежи или разделительной полосе, на варианте бессменного пара (если он имеется в опыте), на вариантах с оптимальными и максимальными дозами минеральных, органических удобрений и их комбинациями и по всем изучаемым агротехническим факторам. Продолжительность исследований дыхания почвы, потока CH_4 и N_2O через поверхность почвы должна составлять не менее трех лет.

3. При проведении мониторинга парниковых газов в длительных опытах необходимо определение следующих показателей:

- содержание органического углерода в почве в конце каждой ротации севооборота;
- дыхание почвы, поток CH_4 и N_2O через поверхность почвы в период с температурой воздуха выше $0^\circ\text{C} - 1$ раз в декаду, ниже $0^\circ\text{C} - 1$ раз в месяц;
- температура и влажность почвы одновременно с измерением потоков газов;
- температура воздуха (средняя, минимальная и максимальная за сутки), количество осадков – ежедневные данные ближайшей метеостанции;
- урожайность основной и побочной продукции ежегодно;
- количество пожнивных и корневых остатков ежегодно;
- содержание углерода и азота в органических удобрениях, пожнивных и корневых остатках ежегодно;
- плотность сложения почвы и реакция почвенной среды в конце каждой ротации севооборота;
- гранулометрический состав почвы однократно в начале исследований;
- содержание обменного аммония и нитратов в почве в конце каждой ротации севооборота.

Набор определяемых показателей дает возможность оценки уровней факторов среды, которые контролируют потоки диоксида углерода, метана и оксида диазота между почвой и атмосферой. Информация, касающаяся части измеряемых показателей, имеется для всей площади пахотных почв Российской Федерации. Благодаря этому полученные параметры зависимостей могут быть использованы для расчета суммарных оценок эмиссии и поглощения газов.

Изменение запаса почвенного углерода определяется его поступлением с растительными остатками и органическими удобрениями, а также потерями при минерализации. Таким образом, применение органических удобрений, возделывание сидератов и заделка соломы в почву являются способами непосредственного воздействия на баланс углерода. Кроме того, все агротехнические факторы повышения урожайности увеличивают поступление углерода в почву, так как количество растительных остатков положительно коррелирует с фитомассой.

При этом масса растительных остатков зависит от биологических особенностей конкретной культуры. При современной средней урожайности в России она составляет (в пересчете на сухое вещество): для озимой пшеницы, кукурузы и многолетних трав 3,5–5,0 т/га, для яровых зерновых, подсолнечника и однолетних трав 2–3 т/га, для картофеля около 2 т/га. В чистых парах поступление органического вещества в почву минимально.

С названными различиями связано воздействие структуры посевных площадей в севообороте на приходную часть баланса углерода. Вследствие различных требований культур к обработке почвы, их соотношение в севообороте определяет также выделение углерода в атмосферу.

По результирующему эффекту на воспроизводство органического вещества полевые культуры образуют следующий убывающий ряд: многолетние травы – озимые зерновые и однолетние травы – яровые зерновые – пропашные – чистый пар. Многолетние травы являются единственной группой культур, при возделывании которых без внесения органических удобрений поступление углерода в почву превышает его потери. При этом для каждой из культур модификация системы обработки почвы позволяет регулировать интенсивность минерализации органического вещества.

Аналогичная непосредственная связь существует между проблемами минимизации потерь азота удобрений и ограничения эмиссии N_2O из почвы. При этом надо иметь в виду, что потери на вымывание также увеличивают выделение N_2O в атмосферу, поскольку значительная часть азота, поступившего в водоемы, подвергается денитрификации.

Количество азота почвы, который может использоваться в микробных процессах образования газообразных соединений или вымываться за пределы почвенного профиля, зависит от норм минеральных и органических удобрений. Доля азота, фактически поступающего из почвы в другие резервуары, определяется климатическими условиями, почвенными параметрами и агротехникой; эта доля колеблется от ~1 до ~50%. Главные природные факторы, воздействующие на размер потерь азота удобрений, – гранулометрический состав почвы и водный режим. Поэтому эффект агротехниче-

ских приемов снижения потерь больше в районах с высоким увлажнением и на легких почвах. К таким приемам относится:

1) выбор вида и формы удобрений. Использование аммонийных удобрений сокращает размер денитрификации и вымывания азота в сравнении с нитратными формами. Органические и медленнодействующие минеральные удобрения также характеризуются пониженными потерями азота;

2) срок внесения и способ заделки. Для минеральных азотных удобрений применение под предпосевную обработку почвы и в подкормку предпочтительнее, чем поверхностное внесение или внесение под вспашку;

3) применение ингибиторов нитрификации одновременно с внесением азота в аммонийной форме.

Поток метана между почвой и атмосферой определяется соотношением интенсивности почвенных процессов метаногенеза и окисления метана. В связи с противоположной зависимостью этих процессов от окислительно-восстановительного потенциала, водный режим почвы является важнейшим фактором обмена CH_4 с атмосферой. Он может быть изменен в результате водных мелиораций.

Аммонийный азот оказывает ингибирующее действие на микробное окисление метана. Этим объясняется понижение интенсивности поглощения CH_4 почвой при внесении минеральных удобрений, содержащих N в аммонийной форме.

Прогноз изменения агроклиматических условий Европейской территории России к 2030 г.

Совместный анализ содержания органического вещества почвы и продуктивности сельскохозяйственных культур является основой для обоснования методов управления многолетней динамикой агроэкосистем. Учет наблюдаемых и ожидаемых изменений климата в связи с этим должен включать оценку влияния климатических факторов на поступление органического вещества в почву, а также влияния изменения температуры и влажности почвы на скорость разложения органического вещества. Современный временной шаг сценариев изменения климата позволяет достаточно уверенно применять их в длительных прогнозах изменения запасов органического вещества почвы.

Основными факторами возможного длительного тренда снижения запасов углерода пахотными почвами, даже на фоне среднесрочного его повышения, являются возможное снижение урожайности при увеличении вероятности засух в 2020–2070 гг., прогнозируемых по аридным сценариям изменений климата (Alcamo, Dronin et al., 2007; Falloon, Smith et al., 2009), а также увеличение потерь углерода почвы за счет интенсификации респирации при потеплении (Dankers, Anisimov et al., 2010).

Предложено в системе мониторинга последствий изменения климата для сельского хозяйства использовать совместно модели продуктивности агроэкосистем и динамики органического вещества почвы, что обеспечивает одновременную оценку изменения биоклиматического потенциала терри-

тории, урожайности сельскохозяйственных культур, запасов органического вещества почвы, экономических показателей земледелия. Использование данного подхода дает возможность выделять территории с разной устойчивостью к изменениям климата и системам земледелия, позволяет устанавливать взаимосвязи между рентабельным ведением сельского хозяйства и устойчивым функционированием агроландшафтов.

Самым обнадеживающим методом оценки климата является быстро развивающиеся методы математического моделирования, но получаемые модельные оценки носят большую степень неопределенности, поэтому вместо «климатический прогноз» уместно ввести более условный «климатический сценарий».

Совместный учет прогнозных климатических, агроэкологических и экономических данных при создании сценариев будущих региональных систем сельскохозяйственного производства проведен для пахотных почв Европейской территории России.

Усков и др. (2014) утверждают, что при потеплении по этому сценарию ожидается сильный рост как зимней, так и летней температуры воздуха (в среднем на 3,7–3,8 °С к 2030 г.), что практически не изменит степень континентальности климата.

Таблица 133

Изменения агроклиматических условий ЕТ России к 2030 г. (отклонения от современного уровня) при реализации сценария HadCM3 – A1FI (Усков и др., 2014)

Экономические районы	Агроклиматические показатели								
	Температура воздуха		Сумма температур выше 10 °С	Вегетационный период, сутки	Сумма осадков (мм)	Испарение		ГТК	Влаго-запасы почвы, июль (мм)
	июль, °С	январь, °С				АЕ, (мм)	РЕ, (мм)		
Северный	3,2	4,3	684	29	46	94	198	-0,42	-29
Северо-Западный	3,0	3,9	724	31	88	136	206	-0,28	-26
Калининградский	2,8	3,2	806	39	85	102	206	-0,34	-45
Центральный	3,4	3,9	748	29	48	43	157	-0,32	-25
Волго-Вятский	3,6	4,1	719	25	32	40	158	-0,22	-17
Черноземный центр	3,9	3,9	841	27	53	6	104	-0,28	-10
Поволжский, север	3,9	3,9	788	24	30	12	104	-0,25	3
Поволжский, юг	3,8	3,8	837	22	36	15	74	-0,13	3
Северо-Кавказский	4,1	3,4	913	26	26	20	73	-0,11	-6
Уральский	3,9	3,8	759	24	21	34	165	-0,28	-15

Примечание: АЕ, РЕ – фактическое и потенциальное испарение

В таблице 133 представлены возможные к 2030 г. изменения агроклиматических условий Европейской части России при реализации сценария A1FI (модель HadCM3 Гадлеевского Центра метеорологической службы Великобритании), предполагающего быстрый рост содержания CO₂ в ат-

мосфере за счет интенсивного использования ископаемых видов энергии. При потеплении по этому сценарию ожидается сильный рост как зимней, так и летней температуры воздуха (в среднем на 3,7–3,8 °С к 2030 г.), что практически не изменит степень континентальности климата. Ожидаются значимые для сельского хозяйства изменения агроклиматических параметров (в среднем для ЕТ России): продолжительность вегетационного периода возрастет на 26 дней, суммы эффективных температур повысятся на 778°, суммы осадков на 26 мм, рост фактического испарения составит 40 мм, а рост испаряемости – 141 мм. Рост содержания CO₂ в атмосфере к 2030 г. по этому сценарию составит 29%. Увеличение расходной части водного баланса – испарения за теплый период года значительно превысит рост осадков. Увеличение испаряемости приведет к значительному росту дефицита испарения (разности между потенциальным и фактическим испарением). В результате засушливость климата ЕТ России к 2030 г. повысится, о чем свидетельствует также повсеместное падение величин гидротермического коэффициента (ГТК). Процесс будет сопровождаться уменьшением влагозапасов почвы в теплый период года. Тем не менее, ожидаемое падение влагозапасов не затронет, по-видимому, территории Поволжья, о чем свидетельствует некоторый рост минимальных июльских влагозапасов почвы в этом регионе. Сценарий глобального изменения климата HadCM3-A1FI для ЕТ России можно охарактеризовать как сценарий аридного потепления. Вместе с тем представляется более вероятным другой – гумидный тип глобального потепления, поскольку наблюдаемые до настоящего времени изменения климата на территории России более соответствуют этому типу потепления. Приведем оценки ожидаемых к 2030 г. изменений термического режима ЕТ России по модели HadCM3-A1FI. Прогнозируемые режимы увлажнения приведены в таблице 134.

Таблица 134

**Ожидаемые к 2040 г. изменения режима увлажнения
земледельческой зоны европейской части России
по аридному и гумидному сценариям потепления**

Регион	Сценарии					
	Аридный			Гумидный		
	HadCM3 (A1FI)			МРК		
	P _{XII-II}	P _{VI-VIII}	ГТК	P _{XII-II}	P _{VI-VIII}	ГТК
Северный, Северо-Западный	81	-5	-0,36	123	-44	-0,17
Центральный	92	-46	-0,39	118	38	0,00
Волго-Вятский	92	-33	-0,32	109	115	0,11
ЦЧО	85	-66	-0,33	66	16	0,06
Поволжский, сев.	83	-43	-0,30	64	93	0,14
Поволжский, юг	79	-28	-0,16	56	74	0,11
Поволжский	81	-34	-0,22	59	82	0,11
Северо-Кавказский	68	-37	-0,10	62	-13	-0,02
Уральский	68	-20	-0,34	65	53	-0,04

Рост температуры воздуха в январе по сопоставимым сценариям отличается на 0,4 °С, тогда как ожидаемый рост июльской температуры по аридном сценарию составит 5,1 °С, а по гумидному – лишь 1,3 °С. Очевидно, что гумидный сценарий, предполагающий значительное снижение степени континентальности климата, будет более благоприятен для сельского хозяйства России по сравнению с аридным сценарием.

Во ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова изменения климата рассчитаны по модели Гадлеевского Центра метеорологической службы Великобритании. Из возможных сценариев изменения климата выбран HadCM3, полученный при помощи глобальной климатической модели в центре Hadley для четырех наиболее вероятных эмиссионных сценариев увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере в XXI веке в зависимости от скорости роста населения, развития промышленности и соблюдения природоохранных мер (Горшкова, 2004). Сценарии A1F1, A2, B1, B2 характеризуются:

Сценарий A1 F1 4.0

Сценарий A2 3.4

Сценарий B1 1.8

Сценарий B2 2.4

Сценарий A1 содержит описание будущего мира, характеризуемого очень быстрым экономическим ростом, глобальным населением, показателем которого достигают пиковых значений в середине века с последующим уменьшением, а также быстрым внедрением новых и более эффективных технологий.

Сценарий A2 описывает очень неоднородный мир. основополагающей темой является самообеспечение и сохранение местной самобытности. Показатели рождаемости в разных регионах очень медленно сближаются, результатом чего является постоянный рост общей численности населения.

Сценарий B1 содержит описание движущегося в одном направлении мира с тем же самым глобальным населением, которое достигает максимальной численности в середине века, а затем уменьшается, как и в сценарии A1, однако при быстрых изменениях в экономических структурах в направлении сервисной и информационной экономики с уменьшением материальной интенсивности и внедрением чистых и ресурсосберегающих технологий. Главное внимание уделяется глобальным решениям в интересах экономической, социальной и экологической устойчивости.

Сценарий B2 содержит описание мира, в котором главное внимание уделяется локальным решениям проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Это мир с постоянно увеличивающимся глобальным населением при темпах ниже, чем в A2, промежуточными уровнями экономического развития и менее быстрыми и более разнообразными технологическими изменениями по сравнению с B1 и A1.

Эти сценарии характеризуют аридный тип потепления. В качестве входных климатических параметров использована база ежемесячных данных с разрешением на основе регулярной полуградусной сетки. Расчеты проведены для 200 контуров, имеющих единую экономическую базу и единые

агрохимические характеристики при однородной сельскохозяйственной эксплуатации.

Учитывались возможные меры по адаптации к изменениям климата: изменения в специализации сельскохозяйственного производства при смене севооборотов и размещения культур, изменение сроков посева и уборки, изменение объемов внесения органических и минеральных удобрений внедрение комплекса мер по созданию достаточной кормовой базы для животноводства. В этом случае есть возможность осуществления «лабильных» решений, позволяющих оперативно расширять либо уменьшать площади земель под зерновыми, пропашными культурами и многолетними травами, вводить более скороспелые сорта, осуществлять замену культур, вводя более засухоустойчивые или теплолюбивые, промежуточные и подсевные культуры, оптимизировать сроки обработки почвы и внесения удобрений, с учетом экономической целесообразности всех перечисленных выше мер.

Сравнительный анализ различных климатических сценариев до 2070 г. показывает, что при неизменном землепользовании большая часть пахотных почв будет терять современные запасы органического углерода. Возможные потери за 70 лет составляют от 9 до 12% от общего запаса углерода в пахотных почвах РФ в слое 0–20 см (Smith, Martino et al, 2007a, 2007b). Адаптационный сценарий позволяет за этот же период снизить потери на 30–45%, эффективность адаптации оказалась практически идентичной для климатических условий сценариев. Снижение потерь происходит как за счет уменьшения скорости потерь либо возрастания скорости накопления углерода, так и увеличения числа контуров, где прогнозируется увеличение запасов углерода. Такие контура располагаются в Северо-Западном и в Центральном ФО. Сценарий адаптации, который рассчитывался отдельно для Нечерноземной зоны Европейской территории России, показывает возможность суммарного накопления в до 2070 г. 13–122 млн т углерода. Наиболее благоприятным оказывается для реализации адаптации климатический сценарий B2, прежде всего за счет абсолютного роста запасов углерода в Северо-Западном, Центральном и Приволжском ФО, наименее благоприятным – A1FI за счет увеличения более чем в 2,5 раза потерь углерода (Smith, Smith et al, 2007c, 2007d; Романенков, Сиротенко и др., 2009).

Климатические сценарии A2 и B1 оказались достаточно близки между собой, при этом наиболее благоприятный период для накопления углерода будет наблюдаться в 2020–2050 гг., впоследствии происходит снижение запасов – наиболее резкое для сценария A1FI. Запасы углерода в 2070 г., таким образом, характеризуют климатически зависимую обратимость процессов накопления углерода почвами. Реализация сценария адаптации в эти же сроки показывает, что до 2050 г. обеспечивается последовательное возрастание запасов углерода почвы, сменяющееся равновесием либо некоторой потерей ранее накопленного углерода.

Расчеты для Северо-Западного и Центрального ФО показывают, что в период до 2070 г. комплекс адаптационных мер обеспечивает рост урожайности при расширенном воспроизводстве плодородия почв, что позволяет получить максимальную прибыль региональной системы ведения

хозяйства. Установлено, что для Нечерноземной зоны влияние климата проявляется в большей степени в растениеводческом секторе по сравнению с сектором животноводства. Данные регионы можно рассматривать как наиболее перспективные для осуществления адаптационных мер, которые могут иметь существенный выигрыш от изменения климата, но должна быть обеспечена адекватность во времени адаптационных программ, поскольку реализация их преимуществ, включая дополнительное депонирование углерода, максимальна около 2015–2040 гг. Увеличение ареала потенциальных потерь ранее накопленного углерода происходит в 2050–2060 гг., прежде всего за счет ожидаемой потери углерода для слабокультуренных почв.

Возможность управления запасами органического вещества почв в сельскохозяйственном секторе производства географически зависима. При неизменной системе хозяйствования к 2070 г. слабое (до 2 т/га за 70 лет) накопление органического углерода подзолистыми почвами прогнозируется только в смоленской, Тверской, Псковской, Новгородской, Калининградской областях для климатического сценария A1F1. Для остальных областей в тот же период прогнозируется потеря исходных запасов углерода, до 8 т/га для Пермской и юга Московской области. Осуществление оптимального экономического сценария адаптации позволяет расширить площадь почв, депонирующих углерод, весьма существенно – за счет включения Московской, Ярославской, Владимирской и Ивановской областей. При этом для северо-запада Нечерноземной зоны накопление углерода может составить 14–16 т/га углерода за 70 лет. Юго-восточная, континентальная часть Нечерноземной зоны при этом остается источником эмиссии углерода. Прогнозируемое накопление углерода почвами происходит не односторонне, достигая состояния насыщения либо обнаруживая точку перегиба. Такой характер динамики углерода характерен для всех 4 сравниваемых климатических сценариев – после 2030 г. происходит замедление или снижение темпов накопления органического вещества. Частично это может быть связано с неравномерностью роста биоклиматического потенциала (достигающего, например, максимальных значений около 2040 г. по сценарию A1F1), что влияет на объем поступления углерода в почву с растительными остатками, так и с изменением условий для минерализации органического вещества.

Влияние адаптационных мер сильнее сказывается на изменении запасов углерода, чем влияние климата, но территория влияния ограничивается главным образом Нечерноземной зоной. Так, при реализации климатического сценария A1F1 адаптация к изменению климата обеспечивает разницу в запасах углерода в пахотных почвах смоленской, Тверской, Московской, Орловской и Псковской областей 12–14 т/га углерода, 10–12 т/га углерода в почвах Ярославской, Владимирской и Ивановской областей по сравнению с реализацией сценария без адаптации. На остальной территории, за исключением Ульяновской области, республики Татарстан и Мордовской республики различий при внедрении адаптационного сценария практически не наблюдается. Климатический сценарий B2 дает возможность обеспечить в ряде почвенных контуров названных выше областей накопление 8–12 т/га

при реализации адаптационных мер, несколько уступает ему в эффективности адаптации климатический сценарий А2.

При внедрении единой системы адаптационных мер в пределах одной области эффективно обеспечивается депонирование углерода только некоторыми контурами, в то время лишь ослабляется процесс потери для соседних, что связано как со степенью окультуренности почвы, так и с ее гранулометрическим составом (Романенков, Сиротенко и др., 2009). Эффективность управления запасами углерода при реализации адаптационных мероприятий гораздо выше для окультуренных почв тяжелого гранулометрического состава. В легких почвах рост запасов углерода происходит главным образом за счет накопления легкотрансформируемой фракции углерода, устойчивость которой во времени определяется погодными условиями и может возрастать при увеличении аридности климата.

Установлено, что многолетние травы играют существенную роль в снижении затрат при реализации эколого-экономического сценария адаптации по сравнению с оптимальным экономическим. В областях Нечерноземной зоны, относящихся к Центральному ФО, доля трав в севооборотах достаточна для обеспечения расширенного воспроизводства почвенного плодородия, позволяет поддерживать положительный баланс органического вещества в условиях 2050 г., за исключением Брянской, Рязанской и Московской областей. В почвах Нечерноземной зоны Приволжского ФО доля трав в структуре севооборотов недостаточна для осуществления эколого-экономического устойчивого сценария, иногда значительно – дефицит доли трав в севооборотах может составлять 25–35%. Снижение затрат на поддержание запасов органического углерода почвы возможно за счет планируемых изменений в секторе животноводства, что требует более детального анализа на районном уровне, а также на основе снижения доли пропашных культур в севооборотах. Одним из факторов, обеспечивающих поддержание бездефицитного баланса органического вещества, являются дозы применяемых органических удобрений, но органические удобрения оказывают значительно меньшее влияние по сравнению со структурой севооборота. Адаптационный сценарий в Центральном ФО может скомпенсировать 45–75% относительных потерь запасов углерода за 70-летний период, обеспечивая одновременно прирост продуктивности основных сельскохозяйственных культур в 2 и более раз. Экономически и экологически устойчивый сценарий адаптации позволяет обеспечить последовательное увеличение запасов углерода в 2000–2070 гг.

Для Приволжского и Южного ФО традиционные агротехнологии оказываются слишком затратными, что не обеспечивает в 2000–2070 гг. простое воспроизводство плодородия на фоне устойчиво некомпенсируемой минерализации гумуса. Система мер, заложенных в сценарии адаптации к изменению климата, рассчитанном на получение максимальной прибыли, оказывается неадекватной для долговременной устойчивости земледелия. Необходима более серьезная модификация агротехнологий, нежели контроль за урожайностью, объемами внесения удобрений в экономически обоснованных дозах и удельного веса посевной площади многолетних трав.

Для Приволжского ФО на фоне возможного роста аридности, что снижает эффективность управления урожайностью при введении адаптационных сценариев за период 2010–2050 гг. примерно на 20–80%, должны быть предприняты дополнительные меры для повышения долговременной устойчивости земледелия.

Несмотря на то, что для Южного ФО адаптационные технологии производства позволят до 2060 г. поддерживать стабильность производства зерна, данное обстоятельство не даст возможности обеспечить эффективное управление запасами органического углерода почвы. Снижение плодородия почвы и истощительное землепользование, которое происходит в настоящее время и прогнозируется на будущий период, требуют оптимизации структуры землепользования, изменения в секторах животноводства и кормопроизводства, внедрения ресурсосберегающих элементов агротехнологий: минимальной обработки почвы, сокращения числа технологических обработок, повышения эффективности использования соломы и растительных остатков.

Прогноз является обязательной составляющей информационной базы при разработке рекомендаций по адаптации земледелия к изменениям климата. Составление прогнозов любого природного явления весьма сложно.

Несмотря на то, что объективно наблюдаются изменения климата на годичных и сезонных изменениях, в основу которых заложены редакции прогнозов, построенных с учетом моделей, не всегда оправдываются.

В XX в. преобладала исследовательская компонента моделирования, то есть стремление к выявлению системы внутренних или внешних связей, управляющих поведением изучаемого объекта. К настоящему времени на первый план вышли прогнозные функции моделирования. Если говорить о прогнозных сценариях, то необходимо учитывать, что климатическая система является нелинейной, а устанавливать линейные закономерности ее развития является весьма условным. Необходимо отметить, что изучение территориальных различий в изменении климатических показателей на территории России не много и они недостаточно освещены. Говоря о прогнозных сценариях изменения климата необходимо учитывать многие показатели и их дифференциации в широких пределах.

Наиболее вероятные факторы изменения климата не являются только внутренними изменениями климатической системы. Есть и внешние факторы, влияющие на климат. Согласно оценкам межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в последнее десятилетие значительный вклад в эти изменения вносит антропогенное воздействие, которое включает в себя выброс парниковых газов. Если это заключение сделано при помощи простого наложения температурных изменений в климатической системе с графиком антропогенной компоненты, и ход графиков антропогенной составляющей близок к ходу температурного графика, то это не может быть полностью убедительным (Дымников, Лыкосоев и др., 2012). При всей масштабности и детальности оценочных докладов, в научном сообществе существуют альтернативные точки зрения на причины изменения климата. Сторонники альтернативной точки зрения считают, что антропогенный фактор следует рассматривать как запускающий механизм (Ростом, 2018). Нет сомнений,

что температурный режим изменился. Однако нет доказательств, что потепление будет продолжаться и антропогенный фактор является доминирующим.

Данный сценарий HadCM3 наиболее часто используется для оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство. Моделирование процессов стока углерода в почве позволит получить обоснованные прогнозы влияния сельскохозяйственного производства на общий объем выбросов парниковых газов, разработать стратегию управления этими процессами и осуществить выбор устойчивого развития агросферы России.

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур в агроландшафтах на основе базы данных Геосети опытов с удобрениями

Во ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова разработана Единая электронная база данных полевых опытов Агрохимслужбы и Географической сети полевых опытов с удобрениями «Агрогеос». В ее основе – результаты инвентаризации длительных, краткосрочных и производственных опытов, проводимых Геосетью и Агрохимслужбой в течение 40 лет в типичных почвенно-климатических условиях по различным простым и факторным схемам и охватывающих всю территорию бывшего СССР с развитым сельскохозяйственным производством (Сычев, Рухович и др., 2008).

База данных «Агрогеос» включает в себя данные по опытам, проводимых с начала 60-х годов прошлого столетия в различных почвенно-климатических зонах – областях России и бывших Советских республиках, с разными культурами, со всевозможными изучаемыми факторами и схемами опытов, применением удобрений. Источники информации – это, в основном, формы отчетности по проведению длительных полевых опытов и отчетные карточки Геосети и агрохимслужбы, а также метеоданные, координатные привязки и т. д. (рис. 33).

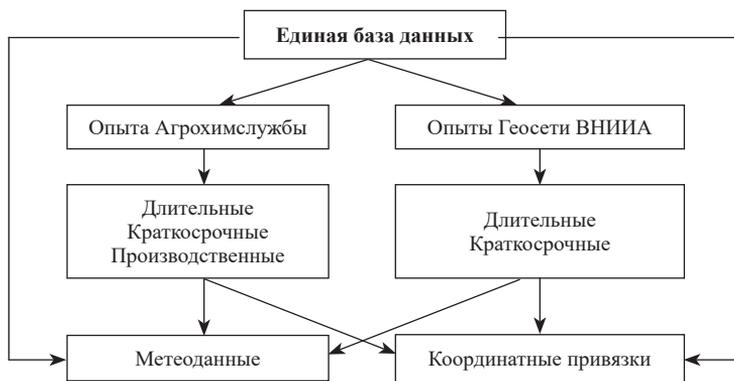


Рис. 33. Структура базы данных «Агрогеос»

Базы данных имеют единую форму представления информации для всех составляющих. Это дает возможность пользователям «Агрогеос» в своих исследованиях использовать единые смешанные массивы данных, что расширяет возможности обработки информации. Таким образом, создается единое информационное пространство агрохимических исследований для России и стран СНГ. Основная единица хранения и обработки информации базы данных «Агрогеос» – данные наблюдений за один год в одном варианте полевого опыта.

Достоинством описываемой единой базы данных является возможность одновременного использования данных как краткосрочных, так и длительных полевых опытов, а также при необходимости совместной обработки результатов наблюдений агрохимслужбы и Геосети и объединение ее с текущими полевыми наблюдениями.

Единая систематизированная база данных опытной работы агрохимслужбы и Геосети «Агрогеос» представляет собой электронные таблицы (рис. 33) с данными по опытам агрохимслужбы и Геосети за 1966–2007 гг., набор электронных папок с фотографиями или отсканированными изображениями исходных данных – отчетных карточек и привязочный файл, позволяющий получить точные координаты проведения опытов.

В 2009–2016 гг. в Государственном реестре баз данных РФ зарегистрированы 14 баз данных, входящих в единую базу данных «Агрогеос».

Это базы данных по озимой пшенице, овсу, картофелю, ячменю, озимой ржи, картофелю и льну, база данных по метеорологии, база данных калийного режима дерново-подзолистых почв, а также базы данных длительных опытов Геосети по урожайности сельскохозяйственных культур и качеству земель в Центральной Федеральной округе для дерново-подзолистых почв, серых лесных и черноземов, а также в Сибирском, Приволжском и Южном Федеральных округах.

Система хранения электронных данных полевых опытов позволяет формировать выборки для проведения целевых исследований, что позволило использовать материалы из базы данных в международных и национальных проектах по наблюдению за длительной динамикой углеродного и калийного режима пахотных почв, устойчивости почвенного плодородия и возможности управления им в современных сельскохозяйственных технологиях (Романенков, Листова и др., 2009).

Другим направлением явилась научно-поисковая работа, где информация базы данных являлась основой для построения пространственно-распределенных элементов прогнозирования в агроландшафтах, а также моделей урожайности, в том числе с учетом нестабильности климата.

Методология расчета урожайности различных сельскохозяйственных культур основана не на субъективном опыте и авторских предпочтениях, а на независимой объективной оценке различных факторов влияния методами линейной и нелинейной множественной регрессии, и на основе нескольких ГИС (результаты представляются в виде карт урожайности) (Шарый, Рухович и др., 2011; Рухович, Шарый и др., 2013; Рухович, Романенков и др., 2014).

На каждой, даже сравнительно небольшой территории, имеются участки, более-менее благоприятные для выращивания той или иной группы культур в связи с неравномерным распределением природных ресурсов в пространстве – например, по почвам, расположению или микроклимату. Факторы,

влияющие на урожайность, делятся на две большие группы – природные (климат, рельеф, почвы и т. д.) и агрохимические (применение удобрений, средств защиты растений, интенсивность технологий возделывания и т. д.).

На основе полученных моделей урожайности разработана информационно-аналитическая система обеспечения агротехнологий, включающая в себя создание карт потенциальной (зависимой от природных факторов) и возможной (зависимой еще и от реального уровня плодородия каждого поля) урожайностей различных сельскохозяйственных культур по данным базы данных «Агрогеос» и доступных современных агрохимических, ландшафтных, климатических показателей.

Информационно-аналитическая система, основанная на данных полевых опытов с удобрениями Геосети и Агрохимслужбы, позволяет использовать показатели почвенного плодородия для оценки качества земель при ведении технологий различной интенсивности и развития отдельных культур, обеспечивая максимальное практическое использование материалов почвенных обследований и внутрихозяйственной оценки земель. Для этой цели создана система электронных справочных материалов для оценки целесообразности ведения технологий различной интенсивности – шкалы бонитировки почв, составленной применительно к оптимальным условиям территории по пяти признакам (почвенная разность, гранулометрический состав, содержание гумуса, кислотность, содержание подвижных форм фосфора и калия).

Структура информационно-аналитической системы обеспечения агротехнологий представлена на рисунке 34.



Рис. 34. Структура информационно-аналитической системы обеспечения агротехнологий

Система содержит информационную составляющую, использующую современную технологию хранения и доступа к данным, а также вывод их на цифровой картографической основе, и аналитический модуль, обеспечивающий на основе комплекса данных почвенных, ландшафтных и климатических показателей расчет потенциального урожая и его реализацию в зависимости от степени окультуренности почвы на землях сельскохозяйственного назначения разного территориального уровня – области, муниципального образования, хозяйств и отдельных полей.

Предлагаемая система расчета позволяет учесть почвенное плодородие с учетом сильно варьирующих в пространстве и времени показателей, с возможностью максимального практического использования существующих и современных материалов почвенных и агрохимических обследований и внутрихозяйственной оценки земель (Шарый, Рухович и др., 2012).

Решаемые задачи на основе информационно-аналитической системы обеспечения агротехнологий:

1. Информация о типах почв на исследуемой территории.
2. Характеристики урожайности сельскохозяйственных культур на исследуемой территории, доступные из базы данных «Агрогеос».
3. Потенциальная урожайность отдельных культур и его качество для исследуемой территории, области, муниципального образования, хозяйств и отдельных полей.
4. Расчет действительно возможного урожая для отдельных полей внутри хозяйства на основе системы поправочных коэффициентов по данным сплошного агрохимического обследования, проводимого Агрохимслужбами. Расчет ведется на основе существующих электронных форм отчетности Агрохимслужбы с привязкой контуров полей. Расчет действительно возможной урожайности сельскохозяйственных культур ведется для трех уровней интенсивности агротехнологий – экстенсивной, средней интенсивности и интенсивной.
5. Система выдает информацию о рекомендуемых дозах минеральных и органических удобрений, извести для получения возможных урожаев при различных уровнях технологий с оценкой рентабельности.
6. После того, как получены оценки урожая и его изменения на изучаемой территории, пользователю представляется возможность.
7. Оценить возможное влияние окультуривания почв – комплексного либо по отдельным показателям (известкование, внесение удобрений и мелиорантов) на управление урожаем и качеством продукции.
8. Оценить влияние интенсификации технологии сельскохозяйственного производства на управление урожаем и качеством продукции.
9. Учитывать реальные изменения эффективного плодородия на перспективу получить заданный урожай.
10. Осуществлять перспективное планирование сельскохозяйственного производства на основе экономической оценки элементов внедряемых агротехнологий, анализируя совокупность экономических затрат и отдачи.
11. При определенной доработке системы возможно расширение решаемых задач:

12. Расчет общей потребности в семенах, удобрениях, необходимых средствах в целом для исследуемой территории области, муниципального образования, хозяйств и отдельных полей.

13. Рациональное размещение культур по полям, в соответствии с разработанными научно обоснованными севооборотами.

14. Производственно-экономическая оценка элементов внедряемых агротехнологий.

15. Обеспечение оптимального агрохимического использования сельскохозяйственных территорий области, муниципального образования, хозяйства, поля.

Выходная информация представляется в табличном виде или в различных графических форматах.

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

Альтернативное земледелие (без применения минеральных удобрений, пестицидов и других средств химизации) возможно лишь на ограниченных площадях с высоко плодородными почвами и при наличии достаточного количества органических удобрений с целью получения сельскохозяйственной продукции. Урожайность сельскохозяйственных культур в альтернативном земледелии на 20–40% и более снижается по сравнению с традиционным (с применением минеральных удобрений и других средств химизации) (Прижуков, 1989). Отсутствие объективных и убедительных данных не позволяют также утверждать, что продукция альтернативного земледелия более чистая и более полезная, чем традиционного (Кант, 1988; Прижуков, 1994; Горчаков, Дурманов, 2002). Не нашло широкого распространения альтернативное земледелие и в зарубежной практике, несмотря на его широкую пропаганду и государственную поддержку. Альтернативное земледелие в развитых странах практикуется лишь на 0,5–1% площади сельскохозяйственных угодий при резком возрастании цен на «биологические» продукты питания.

В сельскохозяйственном производстве, как и во всех сферах человеческой деятельности, идет поиск новых технологий и их элементов, одним из которых считается органическое земледелие.

Последние 10–15 лет наблюдается ускоренное развитие органического сельского хозяйства и его продукции во многих странах мира. Эксперты ФАО прогнозируют к 2020 г. темпы прироста производства органического продовольствия на 30%. Считается, что развитие системы органического сельского хозяйства в России позволит сделать аграрный сектор более эффективным и привлекательным для зарубежных инвесторов (Акимова, Полушкина, 2015). Не правильно считать, что органическое сельское хозяйство – это отдельный феномен, не имеющий прошлого. В трудах А.Т. Болотова еще в 1771 г. идея экологического земледелия была обозначена в работе «О разделении полей». Были сформированы основные принципы агроэкологии и дано руководство по организации сельскохозяйственной территории путем введения севооборотов.

В тридцатые годы прошлого столетия академиком В.Р. Вильямсом (1939) была предложена травопольная система земледелия, которая во многом согласуется с принципами органического сельского хозяйства. Основы ресурсосберегающего земледелия заложены известными учеными: В.В. Докучаевым, В.В. Фокиным, Э. Фолкнером и другими.

За рубежом история органического земледелия началась в 1920-е гг. Наиболее давнюю историю имеет «биодинамическое земледелие». Его осно-

ватель австрийский ученый Рудольф Штайнер. В практическом плане основные его принципы состоят в выполнении всех сельскохозяйственных работ в соответствии с природными и космическими ритмами, а также с использованием специальных биодинамических препаратов. Согласно биодинамической теории поддерживать рост и развитие растений должны именно биодинамические препараты, которые получают из определенных растений, таких как валериана, ромашка, тысячелистник, кора дуба. Важная роль отводилась биодинамическим компостам, для приготовления которых также использовались биодинамические препараты. Так поддерживалось плодородие почвы, «соответствующее природе». Принципы биодинамического земледелия положены в основу лунных календарей для посева сельскохозяйственных культур, которые пользуются популярностью у огородников. Однако недостаточное экспериментальное подтверждение выводов этого направления и трудности в получении таких же урожаев как при традиционном ведении сельского хозяйства, подвергло это направление критическим замечаниям. Спустя несколько лет в Англии возникло похожее сельскохозяйственное движение под названием «органика». В странах Запада существует еще несколько направлений земледелия, отличающихся от биодинамического, но сходных между собой. К ним относится органо-биологическое. Суть этой системы в следующем:

- применять только органические удобрения (компосты);
- создавать «живую и здоровую почву» за счет микробиологических препаратов;
- из минеральных допустимы только медленнорастворимые (калмагнезия, томасшлак, базальтовая мука);
- использование химических пестицидов запрещено;
- борьба с сорняками, вредителями и болезнями осуществляется механическими, профилактическими и биологическими методами. Допускается использование отваров и настоев растений, растительных инсектицидов;
- для регулирования плодородия почв использования севооборотов является обязательным.

Биологическая, органическая и экологическая системы используют в основном те же принципы и идеи, что и органо-биологическое. В США принято использовать название «органическое» земледелие, во Франции – «биологическое».

Существует и «интегрированная» система земледелия, которая отличается от предыдущих тем, что она допускает применение в ограниченных количествах химических пестицидов и минеральных удобрений без снижения качества получаемой продукции.

Универсально принятого определения органического земледелия не имеется. Некоторые определения, например, просто приводят список допустимых методов, что, таким образом исключает различные другие технологии и общие подходы. Эти так называемые отрицательные определения наиболее четко проявляются в тех правилах, которые относятся к слову «органический». Другие определения не только указывают на технологические и управленческие методы, но также включают формулировки по различным

вопросам, включая такие как защита окружающей среды, экономия ресурсов и здравоохранение. Таким образом, трудность определения «органическое сельское хозяйство» происходит из многочисленных концепций его фундаментального характера и масштабов.

Спектр понятий «органическое сельское хозяйство» варьирует от так называемого чистого органического сельского хозяйства до более либеральных интерпретаций данной системы ведения хозяйства. Либеральная интерпретация в какой-то степени может сливаться с традиционным сельским хозяйством. Эти две системы могут иметь большое число общих методов ведения хозяйства.

Так, например, в США закон штата Калифорния описывает то, что может быть названо «чистым» органическим земледелием. Согласно этому закону, синтетически произведенные удобрения, пестициды запрещены полностью. В случае выращивания многолетних культур любые синтетически произведенные удобрения, пестициды и регуляторы роста запрещены к применению в течение всего вегетационного периода. Это же относится к однолетним и двулетним культурам.

Следовать этому закону сложно, поскольку некоторые формы в силу своих финансовых возможностей не могут полностью придерживаться чистой органической технологии на всей территории своего хозяйства, поэтому другая часть земель занята под традиционное ведение сельского хозяйства. Само понятие сущности термина «органическое сельское хозяйство» весьма пространно и неконкретно, но во всех определениях прослеживается экологический подход организации производства. Анализируя многочисленные определения «органическое земледелие» возможно изложить его в следующей интерпретации: органическое земледелие – это такая производственная система, которая избегает или в значительной степени исключает использование искусственных минеральных удобрений, пестицидов, регуляторов роста и химических кормовых добавок в животноводстве.

В максимальной степени данная система полагается на использование севооборотов, растительных остатков, навоза, бобовых культур, сидерата, органических отходов несельскохозяйственного происхождения, минералосодержащих пород и методов биологической борьбы с сельскохозяйственными вредителями.

В настоящее время в мире более 180 стран в той или иной степени занимаются органическим земледелием. Абсолютное лидерство в этой среде у Австралии – 39% общей площади, органически возделываемых площадей в мире (11,8 млн га). За ней следует:

- Европа – 23%;
- Латинская Америка – 19%;
- Азия – 9%;
- Северная Америка – 7%;
- Африка – 3%.
- Среди стран, развивающих органическое земледелие:
 - Аргентина – 3,1 млн га,
 - Китай – 2,3 млн га,
 - США – 1,6 млн га.

В период 2000–2016 гг. органических сельскохозяйственных угодий на земном шаре увеличилось с 14,9 до 52,2 млн га (табл. 135) (Аварский, Астраханцева, 2017).

Основная часть органических сельскохозяйственных угодий располагается в странах Океании это объясняется тем, что в Австралии обширные внутренние районы настолько это позволяют агроклиматические условия (обеспеченность влагой) используются для экстенсивного пастбищного органического сельского хозяйства. В структуре земель, обрабатываемых по органическим технологиям, основные площади в мире приходятся на органические зерновые культуры в Европе 42,8%, в Северной Америке 43,8%. Из других возделываемых культур следует отметить масличные культуры в Европе 6,7% и овощные культуры в Северной Америке 6,8% (Соколова, 2012; Аварский, Астраханцева, 2017).

Таблица 135

Развитие органического сельского хозяйства в мире

Годы	Площадь сельскохозяйственных угодий, занятых под производством органической продукции, млн га	Объем реализованной органической продукции через систему розничной торговли, млрд. долл.
2000	14,9	17,9
2001	17,2	20,9
2002	19,8	23,1
2003	25,7	25,5
2004	29,7	27,8
2005	29,0	33,2
2006	30,1	40,2
2007	32,3	46,0
2008	35,2	52,3
2009	37,1	54,9
2010	37,0	59,1
2011	37,2	62,9
2012	37,5	63,8
2013	43,1	72,0
2014	43,7	80,0
2015	50,9	81,6
2016	52,2	87,6
2016 г.в % к	в 3,5 раза	в 4,9 раза
	в 1,8 раза	в 2,6 раза
	141, 1	148,2
	102,6	107,4

Для устойчивого ведения органического производства требуется высокое плодородие почв.

Интенсивное использование минеральных удобрений в США и Странах Европы дало возможность увеличить содержание фосфора и калия во

многих почвах, включая и те почвы, которые в настоящее время обрабатываются органическими методами. На таких почвах растениеводческое производство может осуществляться в течение ряда лет при обеспечении от умеренных до высоких уровней урожайности без дальнейшего внесения удобрений.

В некоторых случаях на полях фермерских хозяйств, занимающихся органическим земледелием, никогда не вносили минеральных удобрений, и на них поддерживалась урожайность от умеренного уровня до высокого. В этих случаях, вероятно, что почвы имели высокий буферный запас фосфора и калия, который мог обеспечить достаточное количество фосфора и калия для получения урожаев в течение продолжительных периодов. Западные фирмы предлагают различные методы для обеспечения почвы фосфором и калием. Эти методы сильно варьируют, но могут быть выделены два различных подхода. Первый подход состоит в том, что высвобождение фосфора и калия из первичных и вторичных минералов почвы, реакция уравнивания между поверхностями частиц почвы и растворенными питательными веществами, минерализация органического вещества компенсирует дефицит питательных элементов. Этот «дефицитный» подход включает минимальные попытки обеспечить дополнительное количество фосфора и калия для растений. Его результатом в долгосрочной перспективе будет потеря фосфора и калия из почвы, так называемая «выработка». Второй подход предлагается как крупномасштабный «импорт» питательных веществ из вне системы. Этот «импорт» может быть представлен в виде навоза, крупномасштабного использования органических и неорганических питательных веществ. В результате этого питательные вещества и полученная посредством фотосинтеза энергия собирается с большой площади обеспечивающее их поступление, и применяется на меньшей.

Характер пополнения питательных веществ в почвенном растворе, особую роль факторов поглощения, дает возможность выявить различия между двумя подходами по ведению органического земледелия и подходами интенсивного традиционного ведения сельского хозяйства, когда используются высокие дозы фосфорных и калийных удобрений.

По мере того, как питательные вещества удаляются из почвенного раствора, имеется тенденция возмещать этот дефицит из источников твердой фазы. Концентрация в растворе питательного вещества часто называется фактором интенсивности, а источники твердой фазы, которые пополняют раствор, называются факторами поглощения.

Предполагается, что факторы поглощения разделены на три категории:

1 категория – это те формы, которые находятся в быстроустанавливаемом равновесии с почвенным раствором. Пример – обменный калий и поверхностный фосфор.

2 категория – это те формы, равновесие которых с почвенным раствором устанавливается умеренными или медленными темпами. Пример: «фиксированный» калий, который диффундировал под поверхность сорбирующих материалов или во внутреннюю часть агрегатов, но все еще может диффундировать обратно на поверхность за определенный отрезок времени, если градиент активности благоприятен.

3 категория – это те формы, которые не находятся в равновесии с почвенным раствором из-за отсутствия обратной реакции (питательные вещества высвобождаются, но не адсорбируются обратно). Пример: высвобождение фосфора при разложении органического вещества и разложении минералов, образованных в высокотемпературной системе.

Дефицитный подход направлен преимущественно на рециклирование питательных веществ и высвобождение их из форм, относящихся к категории 2 и 3 для замены фосфора и калия, из форм, относящийся к категории 1.

Что касается калия, то проблема заключается в том, поддержит ли более низкая концентрация калия, необходимая для высвобождения значительных количеств калия из форм категории 2 и 3, высокую урожайность сельскохозяйственных культур. При интенсивном традиционном ведении сельского хозяйства применение удобрений и высвобождение питательных веществ из органических остатков достаточно для поддержания форм калия и фосфора категории 1 на уровнях, требуемых для обеспечения высокой урожайности сельскохозяйственных культур, при этом формы 2 и 3 как правило играют второстепенную роль в обеспечении фосфором и калием.

Проводимое в широких масштабах рециклирование питательных веществ путем эффективного применения навоза, заметно уменьшает дефицит фосфора и калия в почве. Во многих случаях стабильность «дефицитного» подхода в долгосрочной перспективе вызывает сомнения. Когда баланс фосфора и калия отрицательны, особенно на почвах с невысоким содержанием данных элементов, для обеспечения сельскохозяйственного производства необходима модификация методов, обеспечивающих увеличение поступления питательных веществ.

Там, где содержится большое поголовье крупного рогатого скота на относительно небольшой площади, что требует большого количества ввозимых кормов, количество фосфора и калия в навозе может быть равно или превышать потребности сельскохозяйственных культур. Там, где в органическом сельском хозяйстве имеет место крупномасштабный «ввоз» питательных веществ, эта система функционирует аналогично интенсивному традиционному ведению сельского хозяйства, но при значительной доле фосфора, возвращаемого в смесь органических форм фосфора. Поскольку этот «импортный подход», предполагает к использованию большого количества источников органических и неорганических веществ, темпы растворения и высвобождения из минеральных источников и минерализация органического вещества должны быть достаточно быстрыми для того, чтобы поддержать формы фосфора и калия категории 1 на достаточно высоком уровне, или эта система будет работать как в «дефицитном» подходе. При крупных добавлениях органического вещества минерализация и высвобождение органического фосфора может иметь большое значение в некоторых системах. Кроме того, наличие большого объема органических веществ может влиять на усвояемость калия в связи с показателями адсорбции.

В России единицы молочных ферм, сертифицированных по Европейским стандартам, но ни одна из этих ферм не продаст свой органический навоз, чтобы кому-то производить органические овощи и зерновые. При использовании инновационных технологий по утилизации и обезвреживанию

навоза, созданию контроля над органическими удобрениями, есть возможность решить проблему обеспечения ферм органическими удобрениями. Тогда все будет упираться в стоимость этих удобрений.

Ведение органического земледелия допускает использование природных фосфоритов. Эффективность действия фосфорита в любой конкретной почве определяется, главным образом, тремя почвенными факторами: рН почвенной среды и концентрациями фосфора и калия в почвенном растворе. Если уровень любого из этих факторов не способствует растворению фосфорита в почве, то фосфорит будет относительно неэффективным. Таким образом, на многих почвах будет маловероятным, чтобы малорастворимые источники фосфора могли создать и сохранить концентрацию в почвенном растворе на достаточно высоком уровне. Маловероятно и то, что занимающиеся органическим земледелием фермеры будут предпринимать попытки ведения земледелия органическими методами на почвах дефицитных по фосфору и обеспечивающих низкий объем поступления фосфора. Не совсем верно считать, что увеличить растворимость и усвояемость фосфора, содержащегося в фосфоритах путем внесения органических остатков и простым регулированием рН почвенной среды. Условия с низким уровнем рН, которые благоприятствуют растворению фосфоритов может отрицательно отразиться на росте и развитии многих бобовых. Аналогичным образом, источники низкорасторимого калия, такие как глауконитовый песок, могут быть не способны обеспечивать достаточный уровень калия в почве, удовлетворяющий потребность сельскохозяйственных растений. Как и в случае с фосфором производители органической продукции будут вносить в почву ряд различных органических отходов и остатков, которые обеспечивают дополнительное поступление калия. Таким образом, определение скорости освобождения фосфора и калия из источников ограниченной растворимости в системах органического земледелия требует дальнейших исследований.

Проблема азота была и остается в обозримом будущем одной из центральных проблем земледелия. Д.Н. Прянишников на основе анализа развития земледелия в Западной Европе отмечал, «... что главным условием, определяющим среднюю высоту урожая в разные эпохи, была степень обеспеченности сельскохозяйственных растений азотом». Так 42% выноса азота растениями покрывался за счет азота почвы, 15% – за счет азота корневых и послеуборочных остатков и 22% за счет азота минеральных удобрений, дефицит азота составляет 21% (Прянишников, 1945).

Известно, что основными источниками азота в питании растений являются: азот почвы, биологический азот и технический азот. В земледелии России роль и значимость этих источников в азотном балансе в разные эпохи были неоднозначны. До 20-х гг. XX столетия и затем с 90-х гг. и по настоящее время азот почвы остается единственным источником в питании растений.

Установлено, что ежегодная минерализация гумуса в дерново-подзолистых почвах составляет 1% от его содержания и 0,4–0,5% в черноземах (Осипов, Соколов, 2001; Лыков, Еськов и др., 2004).

При минерализации 600–700 кг/га гумуса в дерново-подзолистых почвах образуют 30–35 кг/га минерального азота, в черноземах – 50 кг/га. Из этого количества растения используют соответственно 20–24 кг/га и 35 кг/га азота

(за вычетом части азота газообразных потерь). Такое количество почвенного азота может обеспечить формирование урожая зерновых культур на дерново-подзолистых почвах 7–8 ц/га и 12–14 ц/га – на черноземах.

Роль биологического азота достаточно велика, поскольку 30% его поступает в почву. Биологическая фиксация азота является одним из важнейших процессов трансформации атмосферного азота (при участии микроорганизмов) в биосфере. Биологическим путем связывается $169\text{--}269 \times 10^6$ т азота в год (Трепачев, 1999).

Способность растений контролировать азотфиксирующий комплекс с ризосферными бактериями и поддерживать процесс ассоциативной фиксации молекулярного азота означает как признак NIS (Nitrogen Fixation Supportive).

В зависимости от вида растений и климатической зоны размеры азотфиксации в ризосферных ассоциациях существенно различается. Наиболее высокие они у культурных и дикорастущих тропических растений (200–600 кг/га в год). Для зоны умеренного климата продуктивность ассоциативной азотфиксации варьирует в пределах 50–85 кг/га в год.

Размеры симбиотической азотфиксации зависят от многих факторов, однако, основополагающими является вид растения (табл. 136).

Таблица 136

Размеры фиксации атмосферного азота различными сельскохозяйственными культурами

Культура	Фиксация азота, кг/га
Люцерна	200–500
Клевер	150–300
Люпин многолетний	250–400
Люпин однолетний	150–200
Донник белый	200–300
Однолетние бобовые (горох, вика, сераделла, соя)	до 150

Непосредственно в почву с корневыми и пожнивными остатками многолетних трав поступает 75–100 кг/га азота в год, при возделывании однолетних бобовых 25–50 кг/га. Таким образом, фиксация азота свободноживущей и ассоциативной микрофлорой, а также симбиотическими микроорганизмами является основным природным источником поступления азота в почву, который затем используется возделываемой культурой.

Пропагандирующие органическое земледелие фермеры утверждают, что способны обеспечить достаточный уровень азота для получения урожая от умеренного уровня до высокого, путем использования симбиотически фиксируемого азота, возврата растительных остатков, внесением навоза и правильного отбора культур в севообороте. Такие системы требуют наличия животноводческих подразделений для использования кормов, произведенных в хозяйстве и повторном использовании питательных веществ в пределах системы. Однако следует учесть, при хранении навоза теряется от 10 до 30% азота. Это следует учитывать при расчете эффективности органического удобрения не только в действии, но и в последствии удобрения

не отмечалось, что количество азота, произведенными сидеральными культурами часто было недостаточно для обеспечения максимальных урожаев таких культур как кукуруза.

В США при обследовании конкретных фермерских хозяйств с устойчивым ведением органического земледелия установлено, что урожайность сельскохозяйственных культур в расчете на акр была сравнима с урожайностью на фермах, ведущих традиционное сельское хозяйство. По данным «Родейл пресс», были фермерские хозяйства, урожайность в которых была на 10–20% ниже, чем при традиционном ведении хозяйства (сайт Министерства). Такая культура как пшеница имела более низкую урожайность, чем при выращивании с применением минеральных удобрений. Природно-климатические факторы, такие как температурный режим, осадки, периодичность засух, также влияли на урожайность сельскохозяйственных культур. Было отмечено, что урожайность в системе органического земледелия была часто выше, чем урожайность в традиционных системах в засушливые годы и более низкой в годы с высоким увлажнением. В период перехода от традиционной системы земледелия к органической наблюдалось уменьшение урожайности. Однако после третьего или четвертого года, когда севообороты устанавливались, урожайность начинала возрастать и постепенно сравнивалась с размерами урожайности, которую они получали при использовании минеральных удобрений.

Фермерские хозяйства, ведущие органическое земледелие за рубежом, объединяет общая цель. Она состояла в разработке методов, которые в меньшей степени эксплуатируют невозобновимые ресурсы и которые будут поддерживать сельскохозяйственное производство бесконечное время и с высокими экономическими показателями. Одним из методов является использование севооборотов, в частности основанных на бобовых культурах, севооборот с сидератами или покровными культурами. Этот метод являлся составной частью системы производства органической продукции.

Около 50% фермерских хозяйств США выращивали бобовые травы, смешанные травы или держали часть своих земель под пастбищами в своих севооборотах. На неорошаемых землях придерживались севооборотов, которые использовались 50–70 лет тому назад. Типичным образом такого севооборота являлось после интенсивного выращивания сидеральной культуры. Возделывали культуры, требующие значительного количества азота, такие как кукуруза или пшеница.

Например, в районах, специализирующихся на производстве кукурузы и сои, севооборот мог быть следующим: овес – 3 года люцерны – кукуруза (или пшеница) – соя – бобы – кукуруза – соя – бобы. На более продуктивных почвах мог выращиваться дополнительный урожай кукурузы или пшеницы после трех лет выращивания люцерны. Овощные культуры, выращиваемые в севообороте с бобовыми, чередуются таким образом, чтобы одни и те же культуры не следовали непосредственно друг за другом. Занимающиеся органическим земледелием овощеводы чередуют корнеплоды с глубокой и неглубокой корневой системой.

По данным Белтсвилльского центра сельскохозяйственных исследований США на рынке имеется ряд продуктов, которые в целом называются

добавками для почвы и растений, в отношении которых претензии производителей значительно превосходят показатели продуктов. Согласно производителям, добавка для почвы или растения определяется как любой не являющийся удобрением материал, который вносится в почву или на растения с целью увеличения урожайности, энергии роста или качества. Эти продукты предназначены для того, чтобы содержать редкие и полезные штаммы почвенных микроорганизмов; микробные активаторы, которые, как предполагается, содержат специальные химические составы для увеличения количества и активности полезных микроорганизмов в почве; структурообразователи почвы, которые претендуют на то, что создают благоприятные физические и химические условия в почве, которые в конечном счете ведут к улучшению роста и развития растений; стимуляторы растений и регуляторы роста, которые, предположительно, стимулируют рост растений, что ведет к увеличению урожайности; микоризные грибки, которые при внесении в почву могут иметь некоторые возможности для стимулирования поглощения питательных веществ. Согласно утверждению их производителей эти продукты могут: повысить урожайность, ускорить разложение остатков, стимулировать прорастание семян и рост растений, являться заменителями удобрений и известняка, увеличить содержание гумуса в почве, защитить растения от болезней и улучшить физические показатели почвы. Есть ряд особенностей, являющимися общими для этих продуктов: они имеют низкие дозы применения по сравнению с удобрениями; рекомендуются для опрыскивания растений или прямо вносятся в почву; являются «натуральными» или «органическими» и не приносят ущерба полезным микроорганизмам; эти продукты почти всегда имеют низкое содержание азота, фосфора, калия. В поддержку этих продуктов предлагаются различные рекомендации. В большинстве случаев, когда исследователи оценивали эти продукты, используя научные и статистические методы, они не могли продемонстрировать какое-либо значительное увеличение урожайности.

Особенности органического земледелия в России

В России отношение к органическому земледелию неоднозначно. Те оптимистические прогнозы, которые пропагандируются в настоящее время, в основном не находят поддержку и понимание. Предложенный М.В. Ломоносовым всеобщий закон природы включает в себя и закон сохранения энергии: «Но как все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимается, столько присовокупиться к другому. Так, ежели, где будет несколько материи, то умножится в другом месте». То есть, если мы не компенсируем этот вынос, то неизбежно приходим к истощению пашни. При получении тонны зерна и побочной продукции вынос азота составляет 30–35 кг, фосфора 10–12 кг, калия 25–30 кг. При той примитивной технологии, что предлагается в органическом земледелии полное возмещение выноса невозможно, что приводит к снижению урожайности и неуклонному падению почвенного плодородия.

Там, где не применяют минеральных или органических удобрений, почва является непосредственным и основным источником всех питательных веществ. Общее содержание питательных веществ в почве во много раз превышает потребности культур, но не может служить показателями плодородия почвы, поскольку только небольшая часть общего количества питательных веществ переходит в растворимые формы и может быть использована растениями.

Многие говорят об изыскании залежей органических удобрений.

Так о возможности использования глауконита как калийного удобрения еще в конце XIX в. писал А.Н. Энгельгардт. С этой целью его применяли в России, Западной Европе и Северной Америке. Глауконитовые пески содержат P_2O_5 до 6%, бора до 300 г/т при среднем содержании в осадочных породах 100 г/т, ванадия 650 г/т, а также содержат медь, марганец. Опыты с глауконитом проводились в разных почвенно-климатических зонах нашей страны. Однако они носили единичный характер (Васильев, 2005, 2006; Андронов, 2006; Васильев, Кожемякин, 2007).

Полностью механизм воздействия глауконита на плодородие почвы не изучен. Положительное действие его можно упрощенно свести к обогащению почвы калием.

В правилах производства органической продукции разрешено применение фосфоритной руды рыхлого грунта, которая содержит кадмий, а также калийные соли (каолинит и сильвинит KCl – 54,44%), содержание хлора в них не должно быть больше 60%. Идет запрет на минеральные удобрения, которые имеют высокую степень очистки и на выходе приобретают вид высокоэффективных водорастворимых удобрений, в то время как природное сырье с токсическим действием рекомендуют вносить на поля.

Системы органического земледелия, которые в значительной степени полагаются на использование бобовых луговых культур для обеспечения азота посредством симбиотической фиксации, являются часто менее удовлетворительными, чем те системы, в которых азот обеспечивается из неорганических источников в условиях пониженного содержания осадков. В таких случаях урожайность культуры, следующей за луговой бобовой культурой, часто падает в связи с сильным уменьшением размера подпочвенной влаги под воздействием имеющих глубокие корни бобовых культур.

Ценность многолетних трав в системе севооборотов на пашне и лугах неоспорима, и определяется прежде всего тем, что многолетние бобовые травы обогащают почву биологическим азотом, накапливая в год до 200 кг чистого азота на 1 га пашни (Лошаков, 2015, 2017).

Однако в длительных опытах экспериментальной станции штата Миссури показано, что без внесения удобрений ни севооборот, насыщенный клевером (33%), ни ежегодное запахивание массы ржи, не обеспечивает положительного баланса азота в почве (Горчаков, Дурманов, 2002).

Через многолетние травы, их корневые и поукосные остатки, элементы питания, вносимых минеральных удобрений, трансформируются в органическую форму. Это предупреждает их вымывание в грунтовые воды и повышает коэффициент использования.

Уровень плодородия почв в значительной степени определяется содержанием фосфора и особенно подвижных, легкорастворимых его форм. Поэтому важными задачами современного земледелия являются создание в почвах оптимального фосфатного уровня, обеспечивающего формирование высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур, и рациональное использование фосфорных удобрений в связи с ограниченностью их запасов.

Для фосфора не существует естественных путей возобновления почвенных запасов, в отличие от азота, количество которого в почве может пополняться за счет биологической фиксации из атмосферы. Действительно, верхние слои почвы несколько обогащаются фосфором за счет более глубоких слоев, из которых корневая система некоторых растений извлекает фосфор, перенося его вверх и обогащая верхние слои почвы. Но процесс биологической аккумуляции медленный, и темпы его не совместимы с темпами отчуждения фосфора из почвы с урожаем культурных растений.

Из-за дисбаланса выноса питательных веществ и недостаточных объемов внесения минеральных удобрений запасы минеральных веществ в почве ежегодно снижаются.

Сторонники органического земледелия активно используют навоз. По статистическим данным поголовье коров в 2015 г. в России составило 8,4 млн голов, в 2016 г. – 8,3 млн голов (Гражданкин, Кара-Мурза, 2013). В 1980-е гг. насчитывало 60 млн голов КРС.

Нужно подчеркнуть важное обстоятельство, которое обычно упускается из виду. Поголовье скота упало за годы реформы почти в 3 раза, мы имеем сейчас крупного рогатого скота существенно меньше, чем в 1916 г. и даже чем в 1923 г. Резкое падение замедлилось лишь в 2005 г.

Ссылки на то, что в 1980-е гг. в США тоже произошло сокращение поголовья крупного рогатого скота, не состоятельны, так как природа этого процесса в РФ и США различна. В США в ходе модернизации животноводства был сделан упор на интенсивность производства и резко повышена продуктивность скота. В РФ в ходе реформы сокращение поголовья происходило параллельно с технологическим регрессом и снижением продуктивности.

Органическое земледелие не способствует поддержанию и развитию плодородия наших почв. Многие из них имеют региональные дефициты элементов минерального питания и особенно важных микроэлементов.

Одним из условий сохранения плодородия почвы является регулярное применение минеральных и органических удобрений, которые компенсируют вынос питательных веществ с урожаем и поддерживают благоприятную структуру почвы. В 1909–1913 гг. в России естественное плодородие обеспечивало урожайность в среднем за год 6,9 ц/га. Начиная с 1970-х гг., когда была создана промышленность удобрений сельское хозяйство РСФСР стало быстро улучшать экстенсивные и интенсивные показатели. В последние советские годы вынос с урожаем достигал 124 кг/га, а вносили с удобрениями (в 1987 г.) только 106 кг. Растениеводство начинало подходить к равновесию. Падение применения минеральных удобрений началось уже с 1988 г.

Можно предположить, что подготовка к переориентации производства удобрений в СССР на экспорт началась именно в эти годы. Стоит вспомнить

«нитратный психоз» в 1980-е гг., когда планомерно настраивалось общественное мнение против применения минеральных удобрений в сельском хозяйстве.

В ходе реформы 1990-х гг. применение минеральных удобрений снизилось с 9,9 млн т в 1990 г. до 1,1 млн т в 1999 г. С 2000 г. намечалось восстановление и к 2012 г. вносили уже 1,87 млн т – примерный уровень 1964 г. (1,9 млн т). С 1990 по 1995 г. количество вносимых в почву минеральных удобрений снизилось в 5 раз, а затем до 2002 г. не превышало 20 кг на гектар, что составляло уровень 1970 г.

В 1985 г. минеральные удобрения получили 71% всей площади посева, в 1987 г. – 74%, в 1990 г. – 66%. В 1992 г. уже лишь 60%, в 1993 г. – 45%, в 1995 г. – 25%. В 2002 г. она составила 27% всех посевных площадей, в 2005 г. – 32%, в 2010 г. – 42%, 2013 г. – 46%.

Внесение органических удобрений в ходе реформы также уменьшилось. Во второй половине 80-х годов в РСФСР в колхозах и совхозах ежегодно вносилось 457–465 млн т органических удобрений, около 3,6 т на гектар пашни. В то же время в Белоруссии вносилось 15–16 т навоза на гектар (Серая, 2017). К 1997 г., в связи с уменьшением поголовья сельскохозяйственных животных, внесение органических удобрений упало до 1 т на гектар (Мерзлая, Лукин и др., 2018).

Станции старейших мировых длительных опытов находятся в Ротамстеде (Великобритания), Гриньон (Франция), Галле (Германия). Такие станции есть также и в США, Канаде, во многих африканских странах. Длительное наблюдение опытных станций в разных странах однозначно отмечают положительное влияние минеральных удобрений на плодородие почвы. Причем это показано для разных типов почв, в разных климатических условиях и для всех возделываемых культур.

На прошедшей в 2012 г. Международной научно-практической конференции «Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур», посвященной 100-летию длительного полевого опыта РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, были отражены результаты исследований в длительных полевых опытах. На обширном материале было подтверждено, что на разных типах почв отличается снижение содержания гумуса, ухудшение физико-химических свойств почв.

Академик В.Д. Паников (2003) писал: «Те, кто рекомендует в нашей стране ограничиваться так называемым органическим земледелием допускает грубейшую ошибку и обрекает наше земледелие на низкий уровень развития. Призывы об отмене самих основ научно обоснованной агротехники, а по сути – к ведению у нас отсталого неэффективного сельскохозяйственного производства, несостоятельными».

При этом мы весьма успешно экспортируем главную составляющую плодородия наших полей – минеральные удобрения.

По данным национального союза производителей овощей, в 2013 г. в России было произведено 18,4 млн т удобрений, из которых экспортировано 16,7 млн т или 91%. На внутреннем рынке России используется только 1,8 млн т или 9% от всего произведенного объема. При таком подходе к удобрению средняя урожайность картофеля в России составляет 197,5 ц/га,

а в Дании, Германии, Франции этот показатель превышает 400 ц/га. Чтобы перейти на биологическое земледелие надо иметь хорошо развитое животноводство, но для этого надо иметь высокоразвитое производство кормов. Но как это сделать, если не применять минеральные удобрения? Нужна материальная основа, чтобы ускорить повышение плодородия почв, а это, возможно сделать лишь при увеличении производства и применения минеральных удобрений, тогда будут высокие урожаи, больше кормов и хорошо развитое животноводство. Так шло земледелие Западной Европы, так следует развивать земледелие и в нашей стране.

Урожай и качество продукции являются основными показателями в сельскохозяйственном производстве. Каждый шаг возрастающих доз удобрений от низкой до повышенной, обеспечивающий прибавку урожая, изучается и строго контролируется.

Ученые Шведского сельскохозяйственного университета утверждают, что переход на органическое земледелие приведет к сокращению производства на возделываемых площадях почти в 2 раза. Перенаправление ежегодных ассигнований в размере 69,5 млн долл. с натурального производства продуктов в пользу традиционного сельского хозяйства принесет намного больше пользы. Компенсация 40%-го уменьшения урожайности при органическом земледелии потребует увеличение возделываемых площадей на 1,7 млн га в дополнение к сегодняшним 2,6 млн га.

Некоторые сторонники органического земледелия утверждают, что органические продукты содержат больше питательных и биологически активных веществ по сравнению с продуктами, произведенными традиционными способами. Так овощи и злаки содержат на 17% больше витамина С, на 21% больше железа, на 29% больше магния и на 13% – фосфора, чем неорганические продукты (Brian Halweil, 2006; Ewa Rembiakowska, 2007). В целом органические продукты содержат меньше нитратов, нитритов, пестицидов и, как правило, обладают лучшими вкусовыми качествами, которые сохраняются при длительном хранении.

Однако сотрудники Корнельского университета доказали, что, хотя субъ-ективно органические продукты воспринимаются многими потребителями как более здоровые и качественные, поскольку стоят дороже и выращены с минимальным содержанием «химии», зачастую это всего лишь самовнушение. Британский фонд здорового питания (the British Nutrition Foundation) не выявил высокого содержания витаминов, минералов и других полезных микроэлементов в органике (Martine Dorais, 2007).

Более того сильнейший вред приносят микотоксины – сильнейшие канцерогены. При органическом земледелии без применения средств защиты и более высокой засоренности посевов создаются все условия для развития фузариозов. При хранении зараженного урожая и образуются микотоксины. Сторонники органической системы ведения сельского хозяйства абсолютно игнорируют тот факт, что при соблюдении научно обоснованных рекомендаций ни пестициды, ни нитраты не могут нанести ощутимый вред здоровью.

Стратегия будущего сельского хозяйства России связана с переходом на инновационный путь развития.

Анализ экспериментального материала длительных стационарных опытов в различных зонах страны позволил сделать вывод о том, что регулярное применение удобрений обеспечивает повышение потенциального и эффективного плодородия почв и создает условия для последовательного роста урожайности сельскохозяйственных культур.

Переход к органическому производству означает внесение существенных изменений в технологию, структуру агропроизводства. Очевидно, что высокая эффективность традиционного земледелия обеспечивается надежными технологиями и многолетней практикой. Экспериментальные данные по ведению органического земледелия отсутствуют, это свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения данного вопроса, при этом необходимо определить место органической системы ведения хозяйства в общем объеме сельскохозяйственного производства России.

По данным Всемирной сельскохозяйственной организации ООН (ФАО ООН), продовольственное обеспечение населения мира в XXI в. будет осуществляться преимущественно на базе инновационных ресурсов, интеллектуального совершенствования агротехнологий. При этом в качестве приоритетных выделено пять направлений развития:

- повышение эффективности использования земельных, энергетических и других ресурсов, а также удобрений;
- улучшение использования орошаемых земель;
- дальнейшее расширение селекции и семеноводства, племенного дела;
- применение интегрированной системы защиты растений и животных;
- существенное повышение инвестиций в сельскохозяйственную науку и инновационное развитие сельского хозяйства.

В настоящее время органическое земледелие в России находится в зоне неопределенности и риска.

Органическое земледелие как сектор сельского хозяйства должен существовать, невзирая на ту примитивную основу как оно в настоящее время представлено. Необходим научный подход к ведению этой системы, обучающие программы на разных уровнях. По прогнозу Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и продовольственной организации ООН (ФАО), урожайность пшеницы за период с 2016 по 2025 г. вырастет на 9% – с 3,24 т до 3,53 т на 1 га, прирост 8% ожидается и для кормовых культур.

Эти показатели будут достигнуты, с одной стороны, за счет выведения новых урожайных сортов. Однако не менее важная составляющая – прогнозируемое более активное использование минеральных удобрений сельхозпроизводителями. Из этого следует, что глобальная замена традиционного земледелия органическим является мифом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши великие предшественники заложили прочный фундамент агрохимической науки. Дальнейшее развитие агрохимии будет происходить при взаимодействии с самостоятельными научными дисциплинами такими, как почвоведение, биохимия, земледелие, микробиология и другими науками на новой ландшафтной основе. Во второй половине прошлого столетия, при бурном развитии промышленности минеральных удобрений и увеличении потребности в них, наблюдалось широкое развитие исследований по проблемам азота, фосфора, калия и микроэлементов. В агропроизводстве были разработаны региональные системы, применительно к различным почвенно-климатическим зонам. Сельское хозяйство велось по интенсивной системе. В перестроечный период интерес к новым разработкам постепенно угасал. Сельскохозяйственное производство находилось в критическом состоянии, но многие научные исследования проводились. Теоретические и практические разработки тех лет являются актуальными и востребованными на современном этапе.

В настоящее время для эффективного использования удобрений необходимо искать новые пути повышения урожайности сельскохозяйственных культур, рентабельности применения удобрений и экологической сохранности окружающей среды. Необходимо разрабатывать агротехнологии разного уровня интенсификации. С точки зрения современных вызовов агрохимической науке проекты, разрабатываемые без учета всего комплекса агротехнологических решений, не имеют практического интереса.

Мировой и отечественный опыт свидетельствуют, что высокая и устойчивая продуктивность земледелия возможна лишь при комплексном учете всех агрохимических и экологических факторов, необходимых для нормального роста и развития растений, формирования урожая и его качества, недопущения деградации земель. При удовлетворении потребности сельскохозяйственных культур с учетом их биологических особенностей в питательных элементах, воде, воздухе, тепле и создании оптимальных для растений реакции почвенной среды, фитосанитарных, эколого-токсикологических и других условий, и при возделывании высокопродуктивных, адаптированных к местным условиям сортов при высоком уровне агротехники возможно повышение урожайности в 2 раза и более против современных уровней.

Особой сферой рынка агрохимической продукции в ближайшей перспективе станут высокотехнологичные сервисные услуги. Это перспективное

направление деятельности позволяет сельхозпроизводителям с помощью специализированных компьютерных программ делать расчеты по внесению минеральных удобрений и обработкам пестицидами исходя из данных по посевам и посадкам, характеристикам почв, тестированию качества получаемой продукции и других видов мониторинга.

По мере развития цифровых технологий фермеры и агрохолдинги будут активнее использовать GPS-технику и чувствительные датчики для точечного внесения удобрений, основываясь на составе и особенностях почв.

Повышая точность внесения удобрений и пестицидов эти технологии значительно сократят экологические риски. Новые технологии возделывания культур потребуют инвентаризации Географической сети опытов и закладки новых, которые позволят в дальнейшем использовать в агротехнологиях нового поколения. Большое внимание должно быть уделено дальнейшей разработке новых видов удобрений, географическим закономерностям их использования. Разработка и совершенствование нормативов и научно-методических основ определения потребности в минеральных удобрениях на всех уровнях хозяйствования.

Автор монографии считает, что не все стороны такого сложного процесса как воспроизводство плодородия почв и применение минеральных удобрений освещены полно. Однако изложенный материал восстанавливает приоритеты агрохимической науки и дает возможность перейти к новым исследованиям и открытиям.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Центрально-Якутской среднетаежной (3-4), Прибалтийской южнотаежно-лесной (4-1) и Среднерусской южнотаежно-лесной (4-3) провинциях

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N				Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	ПК	30	60	90	120		
3-4 (1)	Якутский НИИСХ в Орджоникидзевском р-оне, мерзлотно-таежная палевая	Разные	12,1	11,1	4,0	3,7	-	-	6/5	Е.И. Нечаев
4-1 б (9)	Северо-Западный НИИСХ, Ленинградская обл., Гатчинский р-он, дерново-подзолистая	-	-	15,5	-	6,0	-	7,4	3/3	Л.А. Феногенов
4-3 а (1)	ЦОС ВИУА, Московская обл., Домодедовский р-он, дерново-подзолистая	Зерновые	15,6	15,9	-	10,4	11,7	10,3	6/3	Г.И. Ваулина
4-3а (2)	Костромской СХИ, «Каравасво», Костромской р-он, дерново-подзолистая	Лен	16,4	18,8	-	4,7	5,8	-	4/4	А.В. Краснов
4-3а (2)	Ивановская опытная станция, Котлицкое ОПХ, дерново-подзолистая	Картофель	10,2	12,4	5,3	7,5	-	-	3/3	Н.Н. Крашенинников
4-3а (5)	ВНИИ льна, Тверская обл., Торжокский р-он, дерново-подзолистая	Лен	-	20,9	5,2	-	-	-	3/3	В.Я. Тлхомирова
4-3б (13)	Пермский СХИ, Пермский р-он, учхоз «Замараево», дерново-подзолистая	Овес	-	20,9	8,5	13,0	13,4	14,0	9/3	В.Н. Прокопьев, Н.И. Мельникова
4-3б (13)	Пермская опытная станция, Пермский р-он, дерново-подзолистая	Зерновые	-	20,1	6,5	10,0	10,7	10,7	4/4	В.А. Бугреев

Приложение 2
Действие азотных удобрений на урожай ярового ячменя в Европейской среднетгаежной (3–1), Прибайкальской (4–1)
и Дальневосточной-Амуро-Уссурийской (4–7) южногаежно-лесных провинциях

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	30	40	60	90			
3-1 (8)	Архангельская опытная станция, Котгасский р-он, дерново-подзолистая	Зерновые, картофель	18,1	20,3	3,6	5,2	6,4	–	–	3/3	Л.И. Акишнин, А.В. Зобнина
4-1 а* (1)	Калининградская опытная станция, дерново-подзолистая	Зерновые, одно-летние травы	23,5	26,8	4,7	–	4,3	6,4	–	3/3	М.И. Мальшев
4-1 б* (9)	СЗ НИИСХ, Ленинградская обл., Гатчинский р-он, дерново-подзолистая	Зерновые	24,0	25,0	4,2	–	5,5	6,6	–	5/5	А.Н. Небольсин
4-1 б* (9)	Там же	–	–	21,0	4,9	–	6,4	7,8	–	8/8	А.Н. Небольсин, В.А. Поляков
4-1 б* (10)	Псковская опытная станция, Псковский р-он, дерново-подзолистая	Зерновые, пропашные	24,2	25,6	–	6,1	9,5	–	–	3/3	В.Э. Болод, Л.Г. Игнатьев
4-7 (2)	Благовещенский СХИ, Амурская обл., Благовещенский р-он, лугово-черноземовидная	Соя	19,4	23,6	–	–	1,4	1,4	–	4/4	М.И. Косицина, Н.А. Пенчукова
4-7 (2)	Там же	Соя	18,4	21,7	–	–	1,0	–	–	7/7	–

Приложение 3
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы Западносибирской (4–4), Среднесибирской (4–5)
и Дальневосточной-Амуро-Уссурийской (4–7) южногаежно-лесных провинциях

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	40	60	90	120			
4-4 (1)	Омская обл., Тарский р-он, дерново-подзолистая	Травы, зерновые	10,0	12,7	4,0	5,4	5,8	–	–	6/6	А.М. Коптилов, Е. Кондратьев
4-4 (1)	Омская обл., Тарский р-он, серая лесная	Пшеница	17,0	19,6	–	5,1	–	–	–	5/5	В.А. Сияевский
4-4 (1)	Омская обл., Знаменский р-он, серая лесная	Пшеница	14,8	17,2	–	5,9	–	–	–	7/4	Г.А. Рушик
4-5 (1)	Казанская опытная станция, Красноярский край, Казанский р-он, дерновая выщелоченная	Пшеница	15,4	15,6	6,6	7,9	–	–	–	4/4	В.В. Шутов
4-5 (1)	Там же	Пшеница (кукуруза)	17,0	17,2	6,2	–	–	–	–	8/4	–

Окончание табл.

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N				Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	40	60	90	120		
4-5 (2)	Иркутская обл., Тайшетский р-он, серая лесная	Зерновые	10,9	12,1	3,9	7,4	9,9	-	3/3	В.А. Останин
4-7 (2)	Благовещенский СХИ, Амурская обл., Благовещенский р-он, лугово-черноземовидная	Зерновые, соя	18,3	21,0	-	3,9	5,4	4,9	22/8	М.И. Косицина
4-7 (2)	ВНИИ сои, Амурская обл., Тамбовский р-он, лугово-черноземовидная	Соя	14,3	14,7	-	5,0	6,3	-	4/4	В.Т. Куркаев

Приложение 4
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Западной (5-2а), и Центральной (5-2б) подпровинциях Среднерусской лесостепной провинции

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N				Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	40	60	90	120		
5-2а (1)	Курская опытная станция, Курский р-он, слабовыщелоченный чернозем	Кукуруза	29,5	31,2	2,1	2,2	-	-	6/6	Г.А. Поршнев
5-2а (1)	Курский СХИ, темно-серая лесостепная	Кукуруза, однолетние травы	12,7	15,3	-	4,3	6,3	6,6	4/4	К.Г. Бондарева, И.Т. Холявина
5-2а (2-4)	Липецкая обл., Липецкий р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые, пропашные	18,6	20,9	-	6,2	-	-	10/4	В.А. Гончаров
5-2б (4)	Тамбовская опытная станция, Ржаквинский р-он, типичный чернозем	Кукуруза	27,9	28,4	-	5,0	5,4	-	8/5	К.Р. Кулешов, В.П. Кабанова
5-2б (5)	Пензенская обл., Пензенский р-он, слабовыщелоченный чернозем	Кукуруза	19,8	20,2	2,6*	4,6	5,0	-	3/3	В.А. Прошкин
5-2б (5)	Пензенская обл., Кузнецкий р-он, выщелоченный чернозем	-	14,0	15,0	4,0	-	-	-	6/3	Т.Б. Лебедева
5-2б (5)	Пензенская опытная станция, Лунинский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые, пропашные	-	25,2	1,6	2,8	-	-	3/3	М.П. Чуб
5-2б (5)	Пензенский СХИ, выщелоченный чернозем	-	-	25,3	-	3,7	-	-	3/3	-
5-2б (5)	Мордовский университет, г. Саранск, выщелоченный чернозем	Зерновые	16,7	18,8	4,3	5,7	5,9	-	5/5	О.П. Кувшинова, В.А. Емельянов
5-2б (5)	Мордовская опытная станция, г. Саранск, выщелоченный чернозем	Зерновые	19,8	21,0	2,2	2,7	-	-	3/3	О.П. Калдо

Приложение 5
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Восточной подпровинции (5–2в)
Среднерусской лесостепной провинции

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N				Опыто- лет	Авторы
			без удобрений	РК	40	60	90	120		
5–2в (7)	Ульяновская опытная станция, Ульяновский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые, кукуруза	22,8	23,9	2,2*	3,2	3,6	–	6/3	Истомина, 1975
5–2в (7)	Там же	–	26,5	27,1	–	2,4	–	–	9/6	Р.Ф. Истомина, В.Я. Шагаев
5–2в (7)	Ульяновский СХИ, выщелоченный чернозем	Кукуруза	31,0	32,1	0,9	1,6	–	–	3/3	Спиридонова, 1976
5–2в (7)	Ульяновский пединститут, агробиологическая станция, чернозем	–	19,3	18,9	–	1,6	–	–	3/3	Карпеев, 1971
5–2в (8)	Татарстан, Тетюшский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые	–	16,2	–	3,7	3,6	3,2	6/3	Сигдилов, 1978
5–2в (8)	Нижегородская опытная станция, Кстовский р-он, серая лесостепная	Зерновые, пропашные	24,6	24,1	–	3,7	4,5	4,5	5/5	Коданев, 1978, В.А. Ушаков
5–2в (8)	Нижегородский СХИ, учхоз в Богородицком р-оне, серая лесостепная	Зерновые	17,7	18,6	–	4,8	–	–	7/7	Масловский, 1972
5–2в (8)	Нижегородская область, Пильнинский р-он, темно-серая лесостепная	Зерновые	16,1	17,5	2,0*	3,5	4,6	–	6/6	Полухин, 1978
5–2в (8)	Чувашский СХИ, Чебоксарский р-он, серая лесостепная	Зерновые	15,1	17,8	2,3	5,0	6,8**	–	7/7	А.П. Павлов, А.П. Шведов
5–2в (8)	Там же	Зерновые, пропашные	16,9	20,1	–	4,3	–	–	12/12	–

Приложение 6
Действие азотных удобрений на урожай ярового ячменя в западной (5–2а), центральной (5–2б) и восточной подпровинции (5–2в) Среднерусской лесостепной провинции

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыто-лет	Авторы	
			без удобрений	РК	30	60	80	90	120			
5–2а (1)	Кураекая оп. ст., Курский р-он, типичный чернозем	Кукуруза	34,3	36,9	4,2	–	–	–	–	–	3/3	Сергеева, 1971
5–2а (1)	Там же, слабовыщелоченный чернозем	–	28,5	33,0	–	5,1	–	–	–	–	4/4	Г.А. Поршнев, И.П. Чаплыгин
5–2а (1)	Воропежский СХИ, учхоз в Рамонском р-оне, выщелоченный чернозем	–	19,3	22,8	0,9	2,3	–	2,4	–	–	4/4	А.К. Леонтьев, Н.Н. Пресняков
5–2а (2–4)	Мичуринский плодовоовощной институт, база в Липецкой обл., Чаплыгинский р-он, выщелоченный чернозем	–	17,8	20,2	–	4,2	4,8	4,3**	–	–	9/9	Н.А. Арзыбов
5–2б (4)	Тамбовская опытная станция, Ржаквинский р-он, типичный чернозем	–	30,1	31,2	–	5,8	–	6,2	–	–	8/5	Кулешов, Кабанов, 1981
5–2б (6)	Рязанский СХИ, учхоз в Рязанском р-оне, серая лесостепная	–	30,0	33,3	2,0	6,4	–	9,6	4,5	–	7/7	Ариаутова, 1982
5–2в (8)	Нижегородский СХИ, серая лесостепная	–	–	23,3	3,6*	–	–	–	–	–	4/4	Камаева, 1973
5–2в (8)	Нижегородский СХИ, учхоз в Богородицком р-оне, серая лесостепная	Кукуруза, зерновые	28,8	31,0	–	5,2	–	5,5	2,2	–	8/3	Кодань, Ильина, 1984
5–2в (8)	Чувашская оп. станция, Цивильский р-он, темно-серая лесостепная	Зерновые	12,4	13,6	3,6	4,0	–	5,2	–	–	3/3	Адрианов, 1968
5–2в (8)	Чувашский СХИ, учхоз в Чебоксарском р-оне, серая лесостепная	Зерновые, пропашные	20,0	24,1	3,2*	7,3	8,6	–	–	–	5/5	Павлов, Никифоров, 1978
5–2в (8)	Там же	Зерновые	14,9	18,9	–	6,8	–	–	–	–	3/3	А.П. Павлов, А.П. Шведов

Приложение 7
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Предуральской (5-3) и Западносибирской (5-4) лесостепной провинциях

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N				Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	30	60	90	120		
5-3 (2)	Башкирский НИИСХ, Уфимский ОПХ, выщелоченный чернозем	Зерновые, пропашные	–	21,8	2,4	3,8	–	–	14/8	Б.П. Шилепков, Х.С. Ахметшин
5-3	Татарстан, выщелоченный чернозем	Зерновые	16,7	19,2	–	3,8	4,3	–	5/5	Прошкин, Смирнов, 1984
5-3 (5)	Пермская обл., Кунгурский р-он, темно-серая лесостепная	–	10,2	11,7	3,3	6,9	8,5	–	3/3	Мошкин, 1969
5-3 (5)	Пермская обл., Суксунский р-он, оподзоленный чернозем	Зерновые, вико-овес	13,2	13,9	–	7,3	–	–	3/3	Прокопьев, Мельников, 1970
5-4 (3)	НИИСХ Северного Зауралья, Тюменская обл., Ишимское АПХ, выщелоченный чернозем	Кукуруза	20,7	21,7	–	7,6	–	–	3/3	Ильин, 1976
5-4 (3)	Тюменская обл., Сорокинский р-он, темно-серая лесостепная	–	15,5	15,4	7,8	–	–	–	3/3	–
–	–	–	15,5	15,7	–	–	13,0	–	3/3	–
5-4 (3)	Тюменская обл., Омутинский р-он, выщелоченный чернозем	–	12,3	14,2	–	7,7	5,0	4,0	3/3	–
5-4 (4)	НИИСХ Северного Зауралья, Тюменская обл., Заволоуховский ОПХ, выщелоченный чернозем	Зерновые	16,5	17,0	5,0	7,2	8,0	–	3/3	–
5-4 (4)	Свердловская обл., темно-серая лесостепная	–	19,2	20,4	–	9,1	–	12,5	4/4	Г.В. Максеев

Приложение 8
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Западносибирской (5–4) лесостепенной провинции

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыго-лет	Авторы
			без удобрений	РК	30	60	80	90	120		
5–4 (4)	ЮжУралНИИЗ, Челябинская обл., Чебаркульский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые, пропашные	–	23,1	5,8* (N ₄₀)	7,8	8,8	–	8,1	14/9	Кушнерин, Милотин, 1976, 1981
5–4 (4)	Курганская обл., Шадринский р-он, выщелоченный чернозем	Кукуруза	14,3	15,3	4,3	6,0	–	7,5	–	6/6	Б.Н. Собянин
5–4 (4)	Там же	Зерновые	19,5	19,2	–	8,5	10,3	–	11,9	3/3	–
5–4 (4)	Там же	Кукуруза, зерновые	16,0	16,6	–	6,8	–	–	–	9/9	–
5–4 (4)	Шадринское опытное поле Курганского НИИЗХ, выщелоченный чернозем	Кукуруза, зерновые	32,4	24,1	4,3	5,2	–	6,0	–	18/8	А.И. Себянин, Г.А. Калетин
5–4 (4)	Там же	–	26,6	27,0	4,4	5,4	–	6,2	6,4	8/5	–
5–4 (6)	Курганский НИИЗХ, Котовский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые	21,0	21,7	3,3	5,4	–	6,5	–	7/7	Данилова, 1975
5–4 (6)	Курганский СХИ, Котовский р-он, выщелоченный чернозем	Кукуруза, зерновые	26,3	28,4	–	8,3	–	–	–	11/8	Немченко, Кириллов, 1974
5–4 (6)	Курганская обл., Далматовский р-он, выщелоченный чернозем	Зерновые	18,4	20,5	2,2	4,0	–	5,1	–	3/3	Васев, 1981
5–4 (6)	Там же	–	17,6	18,8	–	6,0	–	–	–	11/7	–
5–4 (6)	Челябинская обл., Троицкое оп. поле (граница с 6–5), выщелоченные и обыкновенные черноземы	Кукуруза, зерновые	21,0	21,0	2,6*	4,3	4,3	–	4,9	8/4	Ю.Д. Кушнеренко, В.Ф. Вейтель

Приложение 9
Действие азотных удобрений на урожай ярового ячменя в Западносибирской (5–4), Северопредкавказской (5–5) и Среднесибирской (5–6) лесостепенной провинциях

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	30	60	90	120			
5–4 (4)	Томский СХИ, выщелоченный чернозем	Зерновые	15,7	16,7	–	12,3 (N ₂)	–	–	–	3/3	Мальцев, Важенни, 1979
5–4 (4)	ЮжУралНИИЗ, Челябинская обл., Чебаркульский р-он, выщелоченный чернозем	–	–	39,6	–	6,1	–	7,4	–	4/4	Юмашев, 1981
5–4 (4)	Курганская обл., Шадринский р-он, выщелоченный чернозем	–	11,7	12,8	5,4	8,0	8,5	–	–	4/4	Б.Н. Собянин
5–4 (4)	Курганская обл., Шадринское опытное поле Курганского НИИЗХ, выщелоченный чернозем	–	20,6	22,9	7,6	11,6	12,4	–	–	3/3	Калетин, 1971
5–4 (6)	Курганский НИИЗХ, Котовский р-он, выщелоченный чернозем	–	24,4	23,8	7,1	10,5	11,6	–	–	7/7	Данилова, 1975
5–4 (7)	Сибирский НИИСХ, г. Омск, выщелоченный чернозем	–	25,6	28,7	6,3*	–	–	–	–	8/8	Новиков, 1978
5–5 (1–2)	Кемеровский НИИСХ, Кемеровский р-он, выщелоченный чернозем	–	16,7	20,5	1,8*	–	–	–	–	6/6	Кузнецова, 1971
5–6 (1)	Красноярский НИИСХ, оп. ст. на станции Солянка Рыбинского р-она, выщелоченный чернозем	Кукуруза, зерновые	20,8	22,2	4,1	9,7	9,7	–	–	3/3	Андропова, Замяткина, 1980

Приложение 10
Действие азотных удобрений на урожай яровой пшеницы в Западносибирской (5–4), лесостепенной провинции

Провинция (округ)	Место проведения опытов, почва	Предшественник	Урожай, ц/га		Прибавки от доз N					Опыто-лет	Авторы
			без удобрений	РК	30	60	80				
5–4 (2)	Новосибирская обл., Кочковский р-он, слабовыщелоченный чернозем	Пропашные, зерновые	17,1	18,8	–	2,8	–	–	–	10/5	З.А. Шувалова, Э.В. Покрышкина
5–4 (7)	СибНИИСХ, Омская обл., Омский р-он, слабовыщелоченный чернозем	–	15,9	17,8	–	1,8	–	–	–	15/14	Кочергин, 1968, Гамзиков, 1973
5–4 (7)	Омский СХИ, Омский р-он, слабовыщелоченный чернозем	Зерновые	13,3	16,0	–	0,9	1,4	1,2	–	4/4	Н.И. Шерстов, А.Г. Туркин
5–4 (7)	Омская обл., Калачинский р-он, слабовыщелоченный чернозем	Зябь	16,2	18,8	0,9	–	–	–	–	3/3	Коломейко, 1974

Приложение 11
Схема определения погрешности полевых культур в азотных удобрениях на основе агрохимического метода с учетом предшественника в севообороте

Предшественник	Обеспеченность азотом	Потребность в азотном удобрении	Доза внесения азота под культуры, кг/га*		
			зерновые	пропашные	многолетние травы***)
1	2	3	4	5	6
Дерново-подзолистые, светло-серые лесные, светло-каштановые и каштановые почвы					
Чистый пар, удобрённый навозом	Средняя	Средняя	20–30	30–40	– / 30–40
Все остальные предшественники	Низкая и очень низкая	Сильная и очень сильная	40–60	40–60	30–40 / 40–60
Серые лесные, черноземы южные и темно-каштановые почвы					
Пар чистый и сидеральный**)	Средняя	Средняя	20–30	30–40	– / 20–30
Все остальные предшественники	Низкая и очень низкая	Сильная и очень сильная	30–50	40–60	20–30 / 40–60
Черноземы оподзоленные, выщелоченные, обыкновенные, темно-серые и лугово-черноземные почвы					
Пар чистый и сидеральный**), 1-я культура по пару, пропашные ранней уборки, летний пласт трав	Высокая	Отсутствует	–	–	–
Занятой пар, 2-я культура по пару, пропашные, зернобобовые, однолетние травы, оборот пласта трав	Средняя	Средняя	20–30	30–40	– / 20–30
Все остальные предшественники	Низкая и очень низкая	Сильная и очень сильная	30–40	40–60	20–30 / 30–40

Примечание: *) в таблице даны дозы удобрений, рассчитанные на нормальную технологию возделывания сельскохозяйственных культур, при экстенсивной технологии дозы снижают наполовину, при интенсивной – увеличивают в 2–3 раза;
 **) сидеральный пар – биомасса донника при июньской запашке;
 ***) над чертой – доза азота при посеве трав, под чертой – при подкормке в годы пользования.

Приложение 12

Доля участия изучаемых факторов и формирования урожая (Стребков, 1989)

Погодные условия КПУ	Обеспеченность почв подвижным фосфором, мг/100 г почвы	Урожай без удобрений, ц/га	Урожай с удобрениями, ц/га	Прибавка от						
				погодных условий		удобрений		обеспеченности подвижным фосфором		
				ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	
Ячмень										
Экстремальные 0,5 Особо благоприятные 1,3	Низкая < 5	5,4	15,3	18-24	46-62	6-12	15-31	5-12	13-31	
	Оптимальная 10-15	13,6	20,0	-	-	-	-	-	-	
	Низкая < 5	23,7	35,4	-	ср. 54	-	ср. 23	-	ср. 22	
	Оптимальная 10-15	35,6	44,0	-	-	-	-	-	-	
Озимая пшеница										
Экстремальные 0,5 Особо благоприятные 1,5	Низкая < 5	4,1	25,0	-	-	-	-	-	-	
	Оптимальная 10-15	17,1	31,0	27-34	44-55	12-13	21-36	6-21	10-34	
	Низкая < 5	31,2	53,0	-	-	-	-	-	-	
	Оптимальная 10-15	51,8	65,0	-	ср. 50	-	ср. 28	-	ср. 32	
Картофель										
Экстремальные 0,5 Особо благоприятные 1,6	Низкая < 5	47	125	-	-	-	-	-	-	
	Оптимальная 10-15	118	150	50-260	14-75	32-183	6-50	25-180	7-50	
	Низкая < 5	97	280	-	-	-	-	-	-	
	Оптимальная 10-15	276	410	-	ср. 44	-	ср. 28	-	ср. 28	

Примечание: * – урожай, полученные при оптимальных в заданных условиях дозах минеральных удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян Н.О. О питании растений калием и применение калийных удобрений // *Агрохимия*. – 1981. – № 7. – С. 37–43.
- Аварский Н.Д., Астраханцева Е.Ю. Методические аспекты развития органического сельского хозяйства в России // *АПК: Экономика, управление*. – 2017. – № 8. – С. 50–56.
- Авдонин Н.С. Научные основы применения удобрений. – М.: Колос, 1972. – 320 с.
- Адрианов С.Н. Запасы гумуса и элементов питания растений в дерново-подзолистых, серых лесных и черноземных почвах // *Агрохимия*. – 1990. – № 4. – С. 126–138.
- Адрианов С.Н. Формирование фосфатного режима дерново-подзолистых почв в разных системах удобрений. – М.: ВНИИА, 2004. – 296 с.
- Азаров В.Б. Баланс элементов питания в почве в зависимости от технологии возделывания сельскохозяйственных культур в ЦЧЗ // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – Краснодар, 2012. – Вып. № 77. – С. 1–10.
- Аканова Н.И. Агроэкологическая и энергетическая эффективность сочетания известкования с минеральными удобрениями : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2001. – 36 с.
- Акимова Ю.А., Полушкина Т.М. Перспективы развития органического сельского хозяйства в России [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования* – 2015. – № 2. – Ч. 1. – С. 14–15. – Режим доступа: <http://science-education.ru>.
- Акулов П.Г., Доманов Н.М., Афанасьев Р.А. Оптимизация азотного питания пшеницы в интенсивной технологии ее возделывания на типичных черноземах ЦЧО // *Бюллетень ВИУА*. – М.: ВИУА, 1990. – № 98. – С. 54–55.
- Алейнов Д. Тайны голландских полей // *Химия и бизнес*. – 2007. – № 2. – С. 40–44.
- Алексеева Е.Н. О последствии удобрений в свекловичном севообороте на средневыщелоченном черноземе // *Агрохимия*. – 1971. – № 4. – С. 40–43.
- Алиев А.М., Сычев В.Г., Ваулина Г.И., Самойлов Л.Н. Научные основы комплексного применения средств химизации и экологические аспекты интенсивного земледелия. – М.: ВНИИА, 2013. – 195 с.
- Андронов С.А. Глауконит – минерал будущего // *Значение промышленных минералов в мировой экономике: месторождения, технология, экономическая оценка: материалы I Междунар. конференции*. – М.: Геос, 2006. – С. 79–83.

Аникст Д.М. Влияние доз азотных удобрений на вынос питательных веществ яровой пшеницей // *Агрохимия*. – 1983. – № 5. – С. 123–129.

Аникст Д.М. О накоплении азота фитомассой яровых зерновых культур // *Агрохимия*. – 1992. – № 1. – С. 3–11.

Аникст Д.М. Об окупаемости возрастающих доз азотных удобрений прибавками урожая зерна яровой пшеницы в различных зонах РСФСР // *Агрохимия*. – 1988. – № 9. – С. 3–8.

Аникст Д.М., Тюрюканов А.Н. О географии действия доз азотного удобрения на содержание белка в зерне яровой пшеницы // *Агрохимия*. – 1994. – № 6. – С. 44–49.

Аникст Д.М., Тюрюканов А.Н. О накоплении азота фитомассой яровой пшеницы в зависимости от доз азотных удобрений // *Агрохимия*. – 1992. – № 7. – С. 3–7.

Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. – М., 2000. – 524 с.

Артюшин А.М., Державин Л.М., Михайлов Н.Н. Эффективность минеральных удобрений под зерновые культуры по данным полевых опытов агрохимической службы // *Агрохимия*. – 1971. – № 3. – С. 12–19.

Артюшин А.М., Державин Л.М., Михайлов Н.Н. Эффективность минеральных удобрений по результатам полевых опытов агрохимической службы за 1965–1969 гг. // *Химия в сельском хозяйстве*. – 1971. – № 4. – С. 40–49.

Бабарина Э.А., Павлова В.С. Влияние систематического применения навоза и минеральных удобрений на распределение минеральных фосфатов по профилю почв разного типа. – М.: Труды ВИУА, 1974. – Вып. 2. – С. 65–85.

Басибеков Б.С., Кулгарин Н.Н. Параметры плодородия основных типов почв. – М.: Агропромиздат, 1968. – 185 с.

Батьков Б.О. Эффективность фосфорных удобрений на карбонатных черноземах Северного Кавказа в условиях орошения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – М., 1976. – 26 с.

Бахтенко Е.Ю. Гормональный баланс пшеницы и овса в связи с устойчивостью к засухе // *Агрохимия*. – 2001. – С. 38–43.

Безносиков В.А. Эколого-агрохимические основы оптимизации азотного питания растений на подзолистых почвах Европейского Северо-Востока России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Пермь: ПСХА, 2000. – 37 с.

Беличенко М.В., Рухович О.В., Романенков В.А. Использование результатов длительных полевых опытов с удобрениями для разработки стратегии обеспечения стабильных урожаев // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями: материалы Всерос. совещания науч. учреждений-участников Геосети. – М.: ВНИИА, 2016. – С. 23–27.

Берзин А.М. Зеленые удобрения в Средней Сибири. – Красноярск: КГАУ, 2002. – 395 с.

Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д. Диагностика условий фосфорного питания сельскохозяйственных культур в Западной Сибири // *Агрохимия*. – 1989. – № 6. – С. 112–116.

Билтуев А., Будажапов Л.В., Лопухин Т.П. Динамика изменения гумуса в каштановых почвах Западного Забайкалья при длительном применении удобрений // *Плодородие*. – 2017. – № 3. – С. 8–10.

Богдевич И.М. Система удобрения сельскохозяйственных культур при интенсивных технологиях их возделывания / И.М. Богдевич, Л.П. Детковская, В.В. Лапа [и др.] // Применение удобрений и расширенное воспроизводство плодородия почв. – 1989. – С. 25–31.

Богдевич И.М., Шатилова Ф.В., Шибeko Е.А. Оценка взаимодействия факторов плодородия почв и норм удобрений на урожай // Параметры и модели плодородия почв и продуктивность агроценозов : сборник науч. тр. Ин-та почвоведения и фотосинтеза. – Пушкино, 1985. – С. 70–78.

Бондарев А.Г., Бахтан П.У., Воронин А.Д. Физические и физико-технологические основы плодородия почв // 100 лет генетического почвоведения. – М.: Наука, 1986. – С. 178–184.

Бровкин В.И., Синягин Н.И. Влияние систематического внесения минеральных удобрений на свойства выщелоченного чернозема северной лесостепи и продуктивность культур // Агрoхимия – 1982. – № 2. – С. 27–34.

Бунякин И.Я. Изучение действия удобрений под озимую пшеницу и кукурузу в зависимости от плодородия почвы : науч. труды. – Краснодар: КНИИСХ, 1975. – Вып. 1. – С. 93–105.

Бунякин И.Я. Формирование фосфорных уровней в почве // Химизация сельского хозяйства. – 1988. – № 1. – С. 72–75.

Бюллетень распределения пахотных почв по агрохимическим показателям в республиках, краях и областях Российской Федерации (по состоянию на 1.01.1996 г.). – М.: ВНИПТИХИМ, 1996. – 41 с.

Важенин И.Г. Сравнительная эффективность форм калийных удобрений на дерново-подзолистых почвах легкого механического состава : труды Соликамской с.-х. опыт. станции. – Молотов: Звезда, 1953. – Т. I. – С. 27–189.

Варалян Д. Итоги моделирования производительности почв в Венгрии // Проблемы почвенного плодородия в интенсивном земледелии стран-членов СЭВ : бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 1989. – Вып. 53. – С. 19–23.

Васильев А.А. Влияние глауконитовых песков на минеральное питание картофеля // Пути повышения продуктивности пашни, энергоресурса сбережения и производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции: материалы Всерос. науч.-практ. конференции. – Казань: Фолиант, 2005. – С. 357–362.

Васильев А.А. Минеральное питание картофеля при использовании глауконитовых песков Каринского месторождения // Сборник научных трудов ЮУНИИПОК. – 2006. – С. 208–221.

Васильев А.А., Кожемякин В.С. Глауконит – эффективное природное удобрение при возделывании картофеля // Сборник научных трудов ЮУНИИПОК: материалы Междунар. конгресса «Картофель России». – 2007. – С. 158–162.

Вехов П.А., Хлыстовский А.Д., Корниенко Е.Ф. Длительность действия различных доз фосфоритной муки в севообороте // Химия в сельском хозяйстве. – 1975. – № 5. – С. 24–29.

Вильямс В.Р. Основы земледелия // Травопольная система земледелия. – М.: Сельхозгиз, 1939. – 472 с.

- Гаевая Э.А. Баланс питательных веществ в севооборотах, расположенных на эрозионно опасных склонах Ростовской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2 (52). – С. 21–23.
- Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. – Новосибирск, 2013. – 790 с.
- Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. – М.: Наука, 1981. – 226 с.
- Гамзиков Г.П. О состоянии и перспективах развития агрохимических исследований в Сибири // Агрохимия. – 2004. – № 10 – С. 5–13.
- Гамзиков Г.П. Принципы почвенной диагностики азотного питания полевых культур и применения азотных удобрений / Совершенствование методов почвенно-растительной диагностики азотного питания растений и технологий применения удобрений на их основе. – М.: ВНИПТХИМ, 2000. – С. 33–35.
- Ганенко В.П., Грати В.П. Изменение содержания и качественного состава гумуса в лесных почвах при их сельскохозяйственном использовании // Генезис, география и классификация почв Молдавии. – Кишинев: Штиинца, 1973. – С. 163–171.
- Гатта Т.Н. О гумусе серых лесных почв, длительно используемых в сельскохозяйственном производстве : науч. труды. – Киев: УСХА, 1980. – Вып. 245. – С. 141–142.
- Гедройц К.К. Доступность растениям Са, Mg и К, находящихся в состоянии к обмену неспособном. – М.: Сельхозгиз, 1955. – Соч. Т. 3. – С. 445–457.
- Гончар-Зайкин П.П. Моделирование плодородия почв // Интегрированные приемы повышения плодородия почв Нечерноземной зоны. – Л., 1988. – С. 24–77.
- Горчаков Я. Опыт ЕС и США в развитии органического земледелия [Электронный ресурс] / International Centre for Trade and Sustainable Development. – Режим доступа: <https://www.ictsd.org/bridgesnews>.
- Горчаков Я.В., Дурманов Д.Н. Мировое органическое земледелие XXI века. – М.: Российский университет дружбы народов, 2002. – 386 с.
- Горшкова М.А. Моделирование динамики углерода на сельскохозяйственных землях Европейской территории России // Глобальные проявления изменений климата в агропромышленной сфере. – М., 2004. – С. 243–249.
- ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
- ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 7 с.
- Гражданкин А.И., Кара-Мурза С.Г. Белая книга России. – М.: Либроком, 2013. – 560 с.
- Гришин П.Н., Панасов М.Н. Сравнительная оценка внесения минерального удобрения, навоза, соломы и сидератов в севообороте на темно-каштановых почвах Поволжья / Развитие научного наследия акад. Н.И. Вавилова. – Саратов, 1997. – С. 16–18.
- Дегтярева Г.В. Погода, урожай и качество зерна яровой пшеницы. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 216 с.

Державин Л.М. Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. – М.: Колос, 1992. – 271 с.

Державин Л.М. Эффективность минеральных удобрений при интенсификации земледелия и почвенно-агрохимические условия их рационального использования в СССР: автореф. дис. ... д-рас.-х. наук. – М., 1986. – 50 с.

Державин Л.М., Попова Р.Н. Методика определения выноса и коэффициентов использования питательных веществ урожаем из минеральных удобрений и почвы. – М.: ЦИНАО, 1981. – 57 с.

Дерюгин И.П., Прокошев В.В. О совершенствовании методологии оценки фосфатного и калийного состояния почв // Совершенствование методологии агрохимических исследований. – М.: Из-во Моск. ун-та, 1997. – С. 31–40.

Диброва М.А. Влияние погоды и удобрений на продуктивность сахарной свеклы в зоне неустойчивого увлажнения Кубани // Эффективность удобрений при различных почвенно-климатических и погодных условиях Европейской части РСФСР : бюллетень ВИУА. – М.: ВИУА, 1985. – № 72. – С. 60–63.

Димо В.Н., Тихонравова П.И. Оптимизация параметров климата почв ЕТС с учетом требований сельскохозяйственных культур // Вестник с.-х. науки. – 1991. – № 7. – С. 84–89.

Дмитриенко В.П., Кекух А.М. Метрологические факторы и урожай зерновых культур // Труды УкрНИГМП. – 1965. – Вып. 49. – С. 82–92.

Додохова Е.Н., Едемская Н.Л. Эффективность удобрений от метеоусловий при возделывании сортов озимой пшеницы // Агрохимия. – 2015. – № 10. – С. 18–24.

Дурманов Д.Н. Моделирование плодородия почв (теория и методология) : методические рекомендации. – М., 1990. – 124 с.

Духанин Ю.А. Методические рекомендации по анализу почвенных факторов, определяющих урожай сельскохозяйственных культур: инструктивно-метод. издание / Ю.А. Духанин, В.И. Савич, Т.М. Духанина, В.А. Седых, А.А. Ермаков. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. – 312 с.

Духанин Ю.А., Савич В.И., Замираев А.Г. Экологическая оценка взаимодействия удобрений и мелиорантов с почвой. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 476 с.

Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 227–236.

Дятловская Е. Агроинвестор [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.agroinvestor.ru/analytics/news/28565-v-rossii-ispolzuetnya-69-pashni>.

Ельников И.И. О методике разработки оптимальных параметров свойств почв. Плодородие почв: проблемы, исследования, модели // Научные труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. – М., 1985. – С. 18–25.

Ельников И.И., Аракелян Х.Л. О методике комплексной оперативной диагностики плодородия почв // Бюллетень почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 1985. – № 36. – С. 36–42.

Емельянов С.В., Калашников В.В., Лутков В.И., Немчинов Б.В. Методологические вопросы построения имитационных систем. – М.: ВНИИСИ, 1978. – 87 с.

Еськов А.И., Мерзлая Г.Е., Лукин С.М. Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России // Плодородие. – 2018. – № 1 (100). – С. 20–23.

Ефремов В.В. Моделирование почвенного плодородия чернозема типичного // Модели плодородия почв и методы их разработки : науч. труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. – М., 1982. – С. 78–84.

Жуков Ю.П. Баланс питательных веществ как прогнозно-экономический показатель плодородия почв и продуктивности культур // Агрохимия. – 1996. – № 7. – С. 35–45.

Жукова Л.М., Никитина Л.В. Калийный режим почв степной, сухостепной и пустынной зон // Агрохимия. – 1986. – № 12 – С. 24–29.

Жуковский Е.Е. Метеорологическая информация и экономические решения. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 303 с.

Завалин А.А. Биопрепараты, удобрения и урожай. – М.: ВНИИА, 2005. – 302 с.

Замолодчиков Д.Г. Прогноз роста глобальной температуры в XXI веке на основе простой статистической модели // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 379–390.

Зверева Е.А. Действие и последствие фосфорных удобрений на темно-каштановой карбонатной почве при орошении // Агрохимия. – 1982. – № 1. – С. 25–36.

Зверева Е.А. Использование растениями подвижных форм фосфора и калия из темно-каштановой почвы и предкавказского карбонатного чернозема при орошении // Агрохимия. – 1994. – № 6. – С. 14–21.

Зверева Е.А., Батьков Б.О., Елюбаев С.З. Эффективность ежегодного, периодического и разового внесения фосфорных удобрений на предкавказском карбонатном черноземе в орошаемом севообороте и баланс фосфора в почве // Агрохимия. – 1980. – № 9. – С. 28–37.

Зверева Е.А., Бортникова Л.А. Влияние длительного применения удобрений на плодородие предкавказского карбонатного чернозема при орошении. – М., 1998. – С. 458–508.

Зоидзе Е.К. Погода, климат и эффективность труда в земледелии. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 223 с.

Иванов Н.А. Оптимальные пределы показателей плодородия почв лесостепи Зауралья // Тезисы докл. VII съезда Всесоюз. общ-ва почвоведов. – Ташкент, 1985. – 179 с.

Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М. Агробиохимический цикл фосфора. – М.: Россельхозакадемия, 2012. – 510 с.

Иванова Т.И. Оптимизация системы удобрения в севообороте с использованием математических моделей : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М., 1990. – 37 с.

Итоги работы отрасли растениеводства 2017 г. и задачи на 2018 г. [Электронный ресурс]. – М.: 2018. – Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ru/vi>

ew/0/?*=OWb6rfopcRcN%2Fop8W8taasBHbR7lnVybCl6lmh0dHA6Ly9iYXJsZXktbWFsdC5ydS93cC1jb250ZW .

Кант Гюнтер Биологическое растениеводство: возможности биологических агросистем: перев. с нем. – М.: Агропромиздат, 1988. – 208 с.

Карманов И.И. Плодородие почв СССР. – М.: Колос, 1980. – 223 с.

Карманов И.И., Клопотовский А.П. Плодородие и бонитировка почв Нечерноземной зоны РСФСР // Земельные ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР. – М., 1976. – Вып. 12. – С. 57–67.

Карпинский Н.П., Глазунова Н.М. Изменение степени подвижности почвенных фосфатов в длительных микрополевых опытах при внесении фосфорных удобрений // Агрохимия. – 1993. – № 9. – С. 3–13.

Касицкий Ю.И. Общие вопросы установления оптимального содержания подвижного фосфора в почвах // Агрохимия. – 1988. – № 10. – С. 120–140.

Касицкий Ю.И., Карцева Л.М., Кубарева Л.С. Определение потребности земледелия в фосфорных удобрениях и распределение их фондов с учетом обеспеченности почв фосфором // Агрохимия. – 1986. – № 11. – С. 12–15.

Каштанов А.Н. Система управления плодородием почв в Центрально-Черноземной зоне / А.Н. Каштанов [и др.]. – Курск: Изд-во КГСХА, 1996. – 136 с.

Каштанов А.Н. Описание земельного фонда СССР / А.Н. Каштанов, Е.И. Гайдамака, Н.Н. Розов, Д.И. Шашко [и др.]. – М.: Знание, 1983. – 281 с.

Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. – М.: Колос, 1997. – 238 с.

Кершенс М. Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // Почвоведение. – 1992. – № 10. – С. 122–131.

Кершенс М., Шульц Е., Титова Н.А. Динамика гумуса в мощном черноземе // Почвоведение. – 2002. – № 5. – С. 601–606.

Кирпичников Н.А., Адрианов С.Н. Действие и последствие фосфорных удобрений на дерново-подзолистой почве при различной степени известкования // Агрохимия. – 2007. – № 10. – С. 14–23.

Кирпичников Н.А., Адрианов С.Н., Волосатова Е.А. Последствие фосфорных удобрений // Плодородие. – 2004. – № 1. – С. 11–13.

Козичева Е.С. Влияние агрохимических свойств почв Центрального Нечерноземья на эффективность азотных удобрений: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М.: ВНИИА, 2011. – 23 с.

Кононова М.М. Органическое вещество и плодородие почвы // Почвоведение. – 1984. – № 8. – С. 6–20.

Конончук В.В. Оптимизация системы удобрения в зернокармном севообороте на светло-каштановой почве Поволжья при орошении: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М.: ВИУА, 2004. – 35 с.

Конончук В.В., Никитина Л.В. Влияние систематического применения удобрений на баланс калия и некоторые показатели калийного режима светло-каштановой почвы при орошении // Агрохимия. – 2002. – № 6. – С. 53–58.

Константинов А.Р. О путях развития агрометеорологии и агроклиматологии // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 5. – С. 109–113.

- Константинов А.Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – С. 120–163.
- Кораблева Л.И., Слуцкая Л.Д. Мобилизация необменного калия в почвах с высокой фиксирующей способностью // Почвоведение. – 1978. – № 8. – С. 83–89.
- Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. – М.: Агроконсалт, 1999. – 295 с.
- Кореньков Д.А., Руделев Е.В. Минерализация – иммобилизация азота почвы и удобрения // Агрохимия. – 1984. – № 14. – С. 130–138.
- Косолапова А.В. Влияние удобрений на агрохимические и биологические показатели плодородия черноземных почв: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Минск, 1990. – 18 с.
- Кочергин А.Е., Гамзиков Г.П. Эффективность азотных удобрений в черноземной зоне Западной Сибири // Агрохимия. – 1972. – № 6. – С. 3–10.
- Кривич Н.Я. О влиянии удобрений на групповой состав и содержание гумуса в светло-серых лесных почвах // Почв, условия и эффект, удобрений : науч. труды. – Киев: УСХИ, 1975. – Вып. 135. – С. 24–28.
- Крупкин П.И., Кржжановская Н.Н. Основные принципы оценки влияния погоды на эффективность удобрений // Агрохимия. – 1976. – № 2. – С. 74–78.
- Куделя П.Г. Влияние длительного применения калийных удобрений на урожай картофеля, содержание и состав калийного фонда легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов : науч. труды. – М.: Колос, 1978. – С. 300–331.
- Кудеяров В.Н., Семенов В.М. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // Агрохимия. – 2014. – № 1 – С. 3–17.
- Кудеяров В.Н. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский [и др.]. – М.: Наука, 2007. – 315 с.
- Кудинова О.Н. Рынок минеральных удобрений. Современные тенденции // The Chemical Journal. – 2012. – № 10. – С. 34–38.
- Кук Д.У. Системы удобрения для получения максимальных урожаев // Пер. с англ. – М.: Колос, 1975. – 416 с.
- Кулаковская Т.Н. Агрохимические свойства почв и их значение в использовании удобрений. – Минск: Ураджай, 1965. – 198 с.
- Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. – М.: Агропромиздат, 1990. – 219 с.
- Кулаковская Т.Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев. – Минск: Ураджай, 1978. – 272 с.
- Кулаковская Т.Н., Богдевич И.М. О модели плодородия дерново-подзолистых почв Белорусской ССР. Плодородие почв: проблемы, исследования, модели // Научные труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. – М., 1985. – С. 25–35.
- Кулаковская Т.Н., Кораблева Л.И. Роль химизации земледелия в расширенном воспроизводстве плодородия почв /VII делегатский съезд Всесоюз. об-ва почвоведов : тезисы докладов. – Ташкент, 1985. – Т. 3. – С. 69–72.

Кулаковская Т.Н., Поздняк Т.В., Лашукевич О.М. Влияние запасов N, P, K в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве на урожай картофеля и ячменя и эффективность применяемых удобрений // Почвенные исследования и применение удобрений. – 1972. – Вып. 3. – С. 132–137.

Кунцевич И.А. Влияние удобрений, реакции среды и содержания в почве подвижных форм фосфора и калия на урожай культур на супесчаной почве Полесья БССР // Агрохимия. – 1987. – № 7. – С. 27–33.

Курганова Е.В. Плодородие почв и эффективность минеральных удобрений. – М.: МГУ, 1999. – 150 с.

Лазарев В.И. Влияние природных и антропогенных факторов на продуктивность различных видов полевых севооборотов и плодородие типичного чернозема // Проблемы ландшафт, земледелия: доклады науч.-практ. конф., посвященной 25-летию ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии. – Курск, 1997. – С. 229–241.

Лазарев В.И. Динамика эффективного плодородия типичного чернозема в различных агроэкосистемах в условиях Курской области // Агрохимия. – 1997. – № 6. – С. 5–9.

Ларина Г.Е. Моделирование поведения пестицидов в агроэкосистемах // Агрохимия. – 1999. – № 2. – С. 83–92.

Лебедева Л.А. Система применения удобрений в Нечерноземной зоне РСФСР. – М.: изд-во МГУ, 1989. – 94 с.

Лигум С.Т. О продолжительности последствий основного удобрения в севообороте на плодородие почвы, химический состав и урожайность сахарной свеклы // Почвоведение. – 1962. – № 7. – С. 1–9.

Лигум С.Т. Природа действия и последствия основного удобрения на щелоченных черноземах // Эффективность удобрений в свекловичных севооборотах по зонам СССР: сборник трудов. – Киев, 1969. – 145 с.

Лимонов А.П. Изменение содержания гумуса в дерново-подзолистой песчано-легкосуглинистой почве за две ротации восьмипольного льяного севооборота // Агрохимия. – 1974. – № 3. – С. 59–62.

Лисовой Н.В. Математические модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // Современные проблемы опытного дела : материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб., 2000. – С. 46–49.

Литвак Ш.И. Системный подход к агрохимическим исследованиям. – М.: Агропромиздат, 1990. – 220 с.

Литвак Ш.И., Бабарина Э.А., Никитина А.В., Човжик В.П. Влияние различных систем удобрения на продуктивность полевого севооборота и фосфатно-калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // Агрохимия. – 1990. – № 8. – С. 43–49.

Ломако Е.И. Влияние фосфорных удобрений на урожай озимой пшеницы на почвах Волго-Вятского экономического района // Агрохимия. – 1981. – № 9. – С. 35–40.

Лошаков В.Г. Зеленое удобрение в земледелии России. – М.: ВНИИА, 2015. – 300 с.

Лошаков В.Г. Пожнивная сидерация и плодородие дерново-подзолистых почв // Земледелие. – 2007. – № 1. – С. 11–13.

Лошаков В.Г. Теория и практика Российского земледелия. – М.: Ламберт, 2017. – Т. III. – 684 с.

Лукин С.В. Круговорот основных питательных элементов в земледелии Белгородской области // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 4. – С. 15–17.

Лукин С.М. Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 5–14.

Лыков А.М. Воспроизводство плодородия почв в Нечерноземной зоне. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 144 с.

Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья (актуальность и состояние проблемы, рабочие гипотезы исследований, сопряженность агрономических и экологических функций, динамика в агроценозах, принципы моделирования и технологии воспроизводства). – М.: Россельхозакадемия, ГНУ ВНИПТИОУ, 2004. – 630 с.

Малкина-Пых И.Г. Моделирование динамики пестицидов в элементарных экосистемах различных географических зон на основе метода функций отклика // Агрохимия. – 1995. – № 8. – С. 87–113.

Манжина С.А. Анализ обеспечения АПК России удобрениями // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 3 (27). – С. 199–221.

Марковский А.Г. О коэффициенте использования растениями форм азота, фосфора и калия на черноземных почвах Куйбышевской области // Вопросы изучения почв, повышения их плодородия и эффективного использования удобрений. – Куйбышев, 1972. – С. 301–303.

Медведева О.П. Необменно-фиксированный калий удобрений как показатель обеспеченности растений доступным калием // Агрохимия. – 1983. – № 11. – С. 25–31.

Мерзлая Г.Е., Жигарева Ю.В. Агроэкологическая оценка эффективности осадков сточных вод на дерново-подзолистых почвах Тверской области // Плодородие. – 2018. – № 2 (101). – С. 49–51.

Мерзлая Г.Е., Лукин С.М., Еськов А.И. Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России // Плодородие. – 2018. – № 1 (100). – С. 20–23.

Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. – М.: изд-во Моск. ун-та, 1999. – 332 с.

Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.

Минеев В.Г., Дебреници Б., Мазур Т. Биологическое земледелие и минеральные удобрения. – М.: Колос, 1993. – 415 с.

Минеев В.Г., Ивлев М.М. Географические закономерности действия удобрений на урожай озимых хлебов // Географические закономерности действия удобрений. – М.: Колос, 1975. – С. 3–56.

Минеев В.Г., Ремпе Е.Х. Экологические последствия длительного применения повышенных и высоких доз минеральных удобрений // Агрохимия. – 1991. – № 3. – С. 35–38.

Михайлов Н.Н., Книпер В.П. Определение потребности растений в удобрениях. – М.: Колос, 1971. – 254 с.

Моисеев Н.Н. О методологии математического моделирования процессов сельскохозяйственного производства // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1984. – № 1. – С. 14–20.

Мохов И.И. Оценки влияния изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Доклады АН. – 2012. – Т. 443. – № 2. – С. 225–231.

Мохов И.И. Результаты российских исследований климата в 2007–2010 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49. – № 1. – С. 3–18.

Наконечная М.А. Влияние региональных особенностей дерново-подзолистых почв на их фосфатный режим и доступность фосфора растениями // Химия в сельском хозяйстве. – 1985. – Т. 23. – № 5. – С. 5–10.

Налиухин А.Н. Оптимизация применения минеральных удобрений под лен-долгунец в зависимости от комплекса агрохимических свойств дерново-подзолистых почв Нечерноземной зоны России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М., 2015. – 42 с.

Небольсин А.Н. Оптимизация калийного питания растений // Химизация сельского хозяйства. – 1991. – № 12. – С. 26–27.

Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Определение оптимальных доз извести по комплексу показателей // Агрохимия. – 1997. – № 9. – С. 29–33.

Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Оптимальные для растений параметры кислотности дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. – 1997. – № 6. – С. 19–26.

Небольсин А.Н., Небольсина З.П., Поляков В.А. Научно-методические основы оптимизации доз удобрений под основные сельскохозяйственные культуры по агрономическим, экономическим и экологическим параметрам. – СПб.: ЛНИИСХ, 2003. – 75 с.

Небольсин А.Н. Эколого-экономические основы и рекомендации по известкованию, адаптированные к конкретным почвенным условиям / А.Н. Небольсин, В.Г. Сычев, З.П. Небольсина, Ю.В. Алексеев, А.И. Осипов. – СПб., 2000. – 64 с.

Нечаев В.Н., Полев Н.А. Разработка концептуальных имитационных моделей плодородия и адаптации моделей по гумусообразованию в районах Нечерноземья РСФСР: отчет Аграрного института ВАСХНИЛ. – М., 1991. – 103 с.

Никитин В.В. Методические основы диагностики азотного режима чернозема типичного в зерно-свекловичном севообороте // Агрохимия. – 2013. – № 2. – С. 15–21.

Никитина Л.В. Влияние длительного применения удобрений в зернопашном севообороте на калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 15–23.

Никитина Л.В., Володарская И.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. – 2007. – № 2. – С. 14–18.

Никитишен В.И. Агрохимические основы эффективного применения удобрений в интенсивном земледелии. – М.: Наука, 1984. – 214 с.

Никифоренко Л.И. Агрохимические методы исследования обеспеченности почв азотом и их применимость в различных почвенно-климатических условиях // Агрохимия. – 1974. – № 2. – С. 136–151.

Никончик П.И. Баланс азота в севооборотах в зависимости от структуры посевных площадей и систем удобрения на почвах разной степени окультуренности // Земледелие и растениеводство в БССР. – 1988. – Вып. 32. – С. 13–20.

Ниловская Т.Н., Арбузова И.Н., Осипова Л.В. Продуктивность яровой пшеницы в зависимости от соотношения элементов минерального питания // Обзорная информация ВНИИТЭИСХ. – М., 1984. – 50 с.

Ниловская Н.Т., Карманенко Н.М. Приемы управления продукционным процессом озимой пшеницы агрохимическими средствами при низких температурных воздействиях и различных погодных условиях выращивания. – М.: ВНИИА, 2009. – 120 с.

Носко Б.С. Теоретические и практические основы оптимизации фосфатного режима почв Украины: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Минск, 1982. – 48 с.

Носов В.В., Соколова Т.А., Прокошев В.В. Влияние калийных и магниевых удобрений и известкования на подвижность калия, кальция и магния в супесчаных дерново-подзолистых почвах (по результатам полевого опыта) // Агрохимия. – 1995. – № 10. – С. 3–9.

Обушченко В.Я. Совершенствование методов почвенно-растительной диагностики азотного питания растений и технологий применения удобрений на их основе. – М.: ВНИИПТИХИМ, 2004. – С. 160–164.

Олифер В.А., Старостенко В.П. Влияние погодных условий на урожай полевых культур и действие удобрений // Эффективность удобрений при различных климатических и погодных условиях : бюллетень ВИУА. – М.: ВИУА, 1985. – № 74. – С. 19–24.

Орехова Н.П., Володин В.М., Юринская В.Ф. Модели плодородия чернозема типичного // Тезисы докл. VII Всесоюз. общ-ва почвоведов. – Ташкент, 1985. – 16 с.

Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Система показателей гумусового состояния почв // Методы исследований органического вещества почв. – Владимир: РАСХН, 2005. – С. 6–16.

Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 272 с.

Орлова А.Н., Прижукова В.Г., Соколова Р.А. Корреляционная связь и количественное соотношение между содержанием калия при определении различными методами // Химия в сельском хозяйстве. – 1974. – Т. 12. – № 12. – С. 50–54.

Осипов А.И., Соколов О.А. Роль азота в плодородии почв и питании растений. – СПб., 2001. – 353 с.

Осипова Л.В. Потенциальная продуктивность яровой пшеницы к почвенной засухе в зависимости от условий минерального питания : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2000. – 40 с.

Панников В.Д. О высокой культуре земледелия и росте урожаяев. – М.: Россельхозакадемия, 2003. – 372 с.

Панников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1987. – 512 с.

Пачепский Я.А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. – М.: Наука, 1990. – 188 с.

Петрова Л.Н. Анализ климатических условий для использования в имитационных моделях продуктивности озимой пшеницы // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1986. – С. 38–47.

Пивоварова Е.Г. Управление агрохимическими свойствами почв с помощью прогнозных моделей // Агрохимия. – 2005. – № 12. – С. 5–10.

Подколзин А.И. Плодородие почвы и эффективность удобрений в земледелии юга России. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. – 184 с.

Подколзин А.И. Эколого-агрохимическая оценка состояния плодородия почв и применения удобрений в Ставропольском крае: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М.: МГУ, 1998. – 24 с.

Полуянова О.Б., Терехова М.Б., Терехова А.В. Водопотребление посевов ярового ячменя по экологически безопасной технологии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 7 (81). – С. 30–32.

Поляков В.А. Исследование оптимального уровня содержания в почве подвижных форм фосфора и калия // Повышение плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур. – Л., 1989. – С. 113–119.

Попов П.Д. Влияние азотных удобрений на урожай озимой пшеницы в основных почвенно-климатических зонах России // Совершенствование методов почвенно-растительной диагностики азотного питания растений и технологий применения удобрений на их основе. – М.: ВНИПТИХИМ, 2000. – С. 5–13.

Похлебкина Л.В., Игнатов В.Г. Влияние известкования на подвижность фосфатов и калия в дерново-подзолистой почве // Агрохимия. – 1984. – № 10. – С. 80–85.

Прижуков Ф.Б. Агрономические аспекты альтернативного земледелия. Обзорная информация. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1989. – 50 с.

Прижуков Ф.Б. Качество продукции альтернативного земледелия и опыт ее сертификации за рубежом. Обзорная информация. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1994. – 44 с.

Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. – М.: Лесдум, 2000. – 185 с.

Пронько В.В. Повышение эффективности удобрений в засушливом Поволжье: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Саратов, 2002. – 29 с.

Пронько В.В. Факторы, усиливающие действие удобрений в засушливых условиях // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2004. – № 6. – С. 33–36.

Проценко Е.П., Шустрова Н.В. Изменение подвижности фосфора и калия в эрозионных агроландшафтах // Тезисы докладов II съезда общества почвоведов, Санкт-Петербург, 27–30 июня, 1996. – М., 1996. – Кн. 1. – С. 394–395.

Прошкин В.А. Моделирование эффективности минеральных удобрений по показателям агрохимических свойств почвы // *Агрохимия*. – 2012. – № 7. – С. 16–27.

Прошкин В.А. Оценка тесноты и достоверности связи прибавки урожайности озимой пшеницы и агрохимических свойств почвы [Электронный ресурс] // *АгроЭкоИнфо*. – 2010. – № 2. – Режим доступа: <http://www.agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2010/2/st.12.doc>.

Прошкин В.А. Теоретические аспекты моделирования эффективности минеральных удобрений по агрохимическим свойствам почв // *Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений*. – М.: ВНИИА, 2013. – С. 96–139.

Прудников В.А. Кислотный, фосфатный и калийный режимы дерново-подзолистой почвы. – Минск, 2015. – 151 с.

Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и земледелии СССР // В кн.: *Избранные произведения*. – 1945 (1965). – Т. 3. – С. 283–460.

Пчелкин В.У. Почвенный калий и калийные удобрения. – М.: Колос, 1966. – 335 с.

Рассыпнов В.А. Информационно-логическая модель плодородия орошаемых черноземов Алтая // *Тезисы докладов VIII Всесоюзного съезда почвоведов*. – Новосибирск, 1989. – 280 с.

Романенков В.А. Принципы оптимизации азотного питания зерновых культур на уровне хозяйства. Питание растений // *Вести международного института питания растений*. – 2011. – № 2 – С. 2–5.

Романенков В.А., Листова М.П., Беличенко М.В., Рухович О.В. Система «почва–удобрения–погода–урожай» при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах ЕТР // *Плодородие*. – 2009. – № 15 (46). – С. 14–17.

Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Беличенко М.В., Павлова В.Н. Расчет урожайности зерновых культур и эффективности минеральных удобрений с учетом одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2009. – Т. 11. – № 1–7. – С. 1569–1573.

Романенков В.А. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России / В.А. Романенков, О.Д. Сиротенко, Д.И. Рухович, И.А. Романенко, Л.К. Шевцова, П.В. Королева. – М.: ВНИИА, 2009. – 96 с.

Романов Е.Н., Мосолова Г.И., Береснева И.А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 345 с.

Ростом Г.Р. Оценка возможных сценариев изменения климата // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 4. – С. 184–188.

Рубилин Е.В., Долотов В.А. Влияние сельскохозяйственного освоения на запасы и состав гумуса серых лесных почв // *Почвоведение*. – 1967. – № 6. – С. 3–8.

Рудай И.Д. Агроэкологические проблемы повышения плодородия почв. – М.: Россельхозиздат, 1985. – 255 с.

Рухович О.В., Романенков В.А., Ермаков А.А. Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости от условий агроландшафта // *Плодородие*. – 2014. – № 2. – С. 39–41.

Рухович О.В., Шарый П.А., Шарая Л.С. Оценка урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от условий агроландшафта // Плодородие. – 2013. – № 2. – С. 45–46.

Савинская М.Э. Перспективы развития внутреннего рынка минеральных удобрений // Проблемы прогнозирования. – 2003. – № 1. – С. 69–77.

Савич В.И. Энергетическая оценка плодородия почв / В.И. Савич, В.Г. Сычев, А.Г. Замаараев, Н.К. Сюняев, Ю.Н. Никольский. – М.: ВНИИА, 2007. – 499 с.

Сайт Министерства сельского хозяйства США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.usda.gov; Soil Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.soilassociation.org.

Сайт Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru>; Базы данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cbstd.gks.ru>.

Сдобникова О.В., Илларионова Э.С. Условия эффективного использования фосфорных удобрений // Обзорная информация ВНИИТЭИСХ. – М., 1979. – 80 с.

Сдобникова О.В., Касицкий Ю.И. Проблема фосфора в земледелии СССР и повышение эффективности фосфорных удобрений // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1977. – № 10. – С. 10–19.

Сдобникова О.В., Трофимов С.Н., Хачатрян С.М. Оценка параметров эффективного плодородия почвы // Параметры плодородия основных типов почв. – М.: Агропромиздат, 1988. – С. 78–94.

Селезнева Е.С. Поступление в почву связанного азота с атмосферными осадками в разных районах СССР // Эффективность удобрений по зонам страны. – М., 1973. – Вып. 22. – С. 80–85.

Семенов В.А. Совершенствование методики проведения длительных опытов и математические методы обработки экспериментальных данных. – М.: Агроконсалтинг, 2003. – 276 с.

Серая Т.И. Доклад зав. лабораторией органического вещества почвы института почвоведения и агрохимии АН Беларуси [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://regmum.ru/news/2277477.html>.

Силин А.Д. Теоретические подходы к определению приоритетных направлений в сельском хозяйстве : дис. д-ра ... с.-х. наук. – М., 1990. – 465 с.

Синицына Н.Е., Иванова Н.Н. Роль многолетних трав в процессах воспроизводства плодородия обыкновенных черноземов Поволжья // Развитие научного наследия акад. Н.И. Вавилова. – Саратов, 1997. – Ч. 1. – С. 277–279.

Сиротенко О.Д., Романенков В.А., Павлова В.Н., Листова М.П. Оценка и прогноз эффективности минеральных удобрений в условиях изменяющегося климата // Агрохимия. – 2009. – № 7. – С. 26–33.

Соболевский В.Н. Урожайность культур в зависимости от рН почвы и содержания в ней фосфора и калия // Агрохимия. – 1988. – № 4. – С. 35–40.

Соколов А.В. Очередные изучения плодородия почв и путей его повышения / А.В. Соколов, П.А. Власюк, Н.И. Горбунов, А.М. Гринченко, П.А. Дмитриенко, М.М. Кононова, Е.Н. Мишустин // Почвоведение. – 1963. – № 1. – С. 8–20.

Соколов А.В., Гладкова К.Ф., Бабенко Н.В., Карцева Л.Н. Фосфорные удобрения // Справочная книга по химизации сельского хозяйства. – М.: Колос, 1980. – С. 82–95.

Соколова Ж.Е. Производство и реализация продукции органического сельского хозяйства в зарубежных странах / Центр информации и технико-экономических исследований агропромышленного комплекса. – М., 2012. – 54 с.

Стребков И.М. Основные закономерности взаимодействия векторов почвенного плодородия, удобрений и погоды в условиях дерново-подзолистых почв Центрального района НЧЗ РСФСР // Агрохимия. – 1989. – № 2. – С. 36–41.

Стребков И.М. Роль погодных условий в моделях агроэкологических систем // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1983. – № 4 (319). – С. 37–46.

Стребков И.М., Кирикой Я.Т. Оптимизация параметров плодородия почв и доз удобрений с помощью метода математического моделирования // Параметры и модели плодородия почв и продуктивности агроценозов. – Пушкино, 1985. – С. 135–145.

Стребков И.М., Кирикой Я.Т., Халанская Т.П. Методическое руководство по использованию принципов системного анализа в агрохимических исследованиях закономерностей действия удобрений. – М.: ВИУА, 1988. – 72 с.

Стулин А.Ф. Влияние погодных условий на продуктивность кукурузы и эффективность удобрений в условиях Воронежской области // Агрохимия. – 1994. – № 12. – С. 48–52.

Сушеница Б.А. Фосфатный уровень почв и его регулирование. – М.: Колос, 2007. – 376 с.

Сычев В.Г. Динамика баланса питательных веществ // Агрохимический вестник. – 2000. – № 3. – С. 33–36.

Сычев В.Г. Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь. – М.: Изд-во ЦИНАО, 2003. – 228 с.

Сычев В.Г. Применение удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии Нечерноземной зоны России. – М.: ВНИИА, 2005. – 160 с.

Сычев В.Г. Сохраним национальное достояние России // Сельскохозяйственные вести [Электронный ресурс]. – 2006. – № 3. – Режим доступа: <https://refdb.ru/look/1244454-pal.html>.

Сычев В.Г. Тенденции изменения агрохимических показателей плодородия почв Европейской части России. – М.: ВНИИА, 2000. – 188 с.

Сычев В.Г. Прогноз потребности и платежеспособного спроса сельского хозяйства Российской Федерации на минеральные удобрения до 2020 г. / В.Г. Сычев, Е.Н. Ефремов, А.А. Завалин, В.А. Романенков, С.А. Шафран, А.Н. Аристархов, И.А. Шильников. – М.: ВНИИА, 2011. – 52 с.

Сычев В.Г. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации (по сост. на 1.01.2010 г.) / В.Г. Сычев, Е.Н. Ефремов, М.И. Лунев, А.В. Кузнецов, А.В. Павлихина, П.А. Чекмарев, Н.М. Васильева // Реестр плодородия почв. – М.: ВНИИА, 2013. – 208 с.

Сычев В.Г. Методика разработки нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая сельскохозяйственных культур / В.Г. Сычев,

А.А. Завалин, С.А. Шафран, В.А. Прошкин, Т.М. Духанина, Л.С. Чернова, М.П. Листова, В.А. Романенков. – М.: ВНИИА, 2009. – 48 с.

Сычев В.Г. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур / В.Г. Сычев, А.А. Завалин, С.А. Шафран [и др.]. – М.: ВНИИА, 2011. – 115 с.

Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. – М.: ВНИИА, 2009. – 176 с.

Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Эффективность известкования в связи с агрохимическими свойствами дерново-подзолистых суглинистых почв Центрального Нечерноземья. – М.: ВНИИА, 2016. – 103 с.

Сычев В.Г., Музыкантов П.Д., Панкова Н.К. Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. – М.: РАСХН, 2000. – 40 с.

Сычев В.Г. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агротехслужбы и Геосети «Агрогеос» / В.Г. Сычев, О.В. Рухович, В.А. Романенков, М.В. Беличенко, М.П. Листова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 3. – С. 35–38.

Сычев В.Г. Требования к системе мониторинга эмиссии и стока парниковых газов в полевых опытах Геосети / В.Г. Сычев, М.В. Чистотин, М.В. Беличенко, В.А. Романенков, Л.К. Шевцова. – М.: ВНИИА, 2016. – 48 с.

Сычев В.Г. Эффективность фосфорных удобрений на почвах России и основные направления исследований по агрохимии фосфора / В.Г. Сычев, С.А. Шафран, С.Н. Адрианов, В.А. Прошкин, Е.В. Шаброва // Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. – М.: ВНИИА, 2010. – Вып. 10. – 48 с.

Сычев В.Г. Основные направления исследований по агрохимии азота в современном земледелии / В.Г. Сычев, С.А. Шафран, Д.М. Аникст, М.П. Листова, В.А. Прошкин, В.А. Романенков // Бюллетень географической сети опытов с удобрениями. – М.: ВНИИА, 2009. – Вып. 6. – 76 с.

Сычев В.Г., Шафран С.А., Духанина Т.М. Диагностика минерального питания полевых культур и определение потребности в удобрениях. – М.: ВНИИА, 2017. – 220 с.

Сычев В.Г., Шафран С.А., Налиухин А.Н. Система оценки влияния агрохимических факторов на формирование урожайности льна-долгунца. – М.: ВНИИА, 2016. – 124 с.

Тимергалиев И.Ф., Хакимов Р.А., Глотова В.А. Технология и качество зерна пшеницы // Научные труды Ульяновского НИИСХ. – Ульяновск, 2010. – Т. 19. – 526 с.

Тихонов В.Е. Подход к прогнозированию условий вегетации зерновых культур // Вестник сельскохозяйственной науки. – 2003. – С. 14–19.

Тишук Л.А., Хох Н.Я., Жилко В.В. Влаги-и теплообеспеченность смытых дерново-палево-подзолистых почв на склонах. – Пушкино, 1985. – С. 40–42.

Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 264 с.

Трепачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. – М.: Агроконсалт, 1999. – 532 с.

Трутнев А.Г. Минералогический состав дерново-подзолистых почв // Плодородие почв и питание растений. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1973. – С. 3–14.

Трухан Л.Г. Эффективность фосфорных удобрений на почвах Марийской АССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – 1974. – 23 с.

Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. – Л.: Сельхозгиз, 1937. – 268 с.

Усков И.Б., Усков А.О. Основы адаптации земледелия к изменениям климата: справочное издание. – СПб., 2014. – 384 с.

ФАО, 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mse-online.ru/pochvovedenie/zemelnye-resursy-mira.html>.

Федосеев А.П. Влажность почв в связи с рельефом местности / ТР. КазНИИГМИ. – 1959. – Вып. 13. – С. 66–88.

Федосеев А.П. Погода и эффективность удобрений. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 144 с.

Фирсов С.А. Тенденции изменения калийного режима дерново-подзолистых почв Тверской области // Плодородие. – 2011. – № 2. – С. 10–11.

Фрид А.С. Математическая модель как метод изучения корневого поглощения веществ растениями // Агрохимия. – 1974. – № 3. – С. 122–131.

Фрид А.С., Прохорова З.А. Изучение многолетней динамики подвижных фосфатов в дерново-подзолистой почве // Агрохимия. – 1986. – № 6. – С. 22–28.

Хлыстовский А.Д. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и известии. – М.: Наука, 1992. – 190 с.

Хлыстовский А.Д., Вехов А.П., Богданов Н.М. Влияние длительного применения минеральных и органических удобрений на органическое вещество почвы // Химия в сельском хозяйстве. – 1979. – Т. 17. – № 8. – С. 27–30.

Хомоленко М.И. Влияние длительного систематического внесения органических и минеральных удобрений на продуктивность зернопропашного севооборота и баланс питательных веществ на черноземе типичном Центрально-Черноземной зоны / М.И. Хомоленко, А.Я. Айдиев, А.С. Мяснянкин [и др.] // Проблемы ландшафт. земледелия: доклад науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии. – Курск, 1997. – С. 242–249.

Христенко А.А. Уровень равновесного состояния фосфатных систем почв Украины // Агрохимия. – 1993. – № 3. – С. 18–24.

Чендев Ю.Г., Лицуков С.Д. Картографический анализ динамики подвижных соединений фосфора и калия в пахотных почвах Белгородской области // Агрохимия. – 1997. – № 6. – С. 10–18.

Чичкин А.П. Агроэкологические основы воспроизводства почвенного плодородия и формирования урожаев на обыкновенных черноземах Среднего Заволжья : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М., 1999. – 57 с.

Чуб М.П. Оптимизация минерального питания культур и система удобрений в севооборотах на черноземах и темно-каштановых почвах засушливого Поволжья : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М.: ВИУА, 1989. – 49 с.

Чуб М.П., Штейн Э.С., Моторыгин И.П. Действие фосфорных удобрений под зерновые культуры в связи с содержанием подвижного фосфора в черноземах степного Поволжья // *Агрохимия*. – 1973. – № 4. – С. 43–54.

Чумаченко И.Н. Аспекты исследований фосфатного режима почв и оптимизации эффективности фосфорных удобрений // *Совершенствование методологии исследований фосфатного режима почв, оптимизация фосфатного питания растений и баланс фосфора в агроэкосистемах*. – М.: ВНИПТИ-ХИМ, 1999. – С. 23–49.

Шаймухаметов М.Ш., Травникова Л.С. Использование физико-химических методов для определения обеспеченности почв фосфором и калием и расчета потребности в удобрениях // В кн.: *Совершенствование методологии агрохимических исследований: материалы научной конференции*. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – С. 315–324.

Шамрай Л.А. Влияние температуры и влажности почвы на трансформацию суперфосфата при локальном его внесении // *Агрохимия*. – 1984. – № 8. – С. 17–22.

Шапошникова И.М. Влияние фосфорных удобрений на урожай озимой пшеницы при различном содержании подвижного фосфора в почвах // *Агрохимия*. – 1975. – № 2. – С. 23–26.

Шапошникова И.М. Система параметров плодородия обыкновенного чернозема // *Вестник сельскохозяйственной науки*. – 1987. – № 9. – С. 12–17.

Шапошникова И.М., Листопадов И.Н., Новиков А.А. Плодородие почвы целины и пашни // *Агрохимия*. – 1983. – № 5. – С. 51–56.

Шарков И.Н. Изучение минерализации и баланса органического вещества в почвах агроценозов // *Методы исследования органических веществ почв*. – М.: Россельхозакадемия, ГНУ ВНИИОУ, 2005. – С. 359–376.

Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // *Агрохимия*. – 2011. – № 2. – С. 57–81.

Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Предсказательное моделирование характеристик урожая озимой пшеницы // *Цифровая почвенная картография: 1. Теоретические и экспериментальные исследования / Почвенный институт им. В.В. Докучаева*. – М., 2012. – С. 310–326.

Шатилов И.С., Чудновский А.Ф. Агрофизические, агрометеорологические и агротехнические основы программирования урожаяев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 320 с.

Шафран С.А. Диагностика азотного питания зерновых культур и определение потребности в азотных удобрениях. – М.: РАСХН, 2000. – 66 с.

Шафран С.А. Диагностика азотного питания озимых зерновых культур в Нечерноземной зоне // *Агрохимия*. – 1996. – № 7. – С. 10–21.

Шафран С.А. Динамика применения удобрений и плодородие почв // *Агрохимия*. – 2004. – № 1. – С. 9–17.

Шафран С.А. Прогноз содержания фосфора и калия в почвах Центрального района Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. – 2006. – № 9. – С. 5–12.

Шафран С.А. Прогнозирование обеспеченности подвижными формами фосфора и калия почв нечерноземной зоны // *Агрохимия*. – 1998. – № 5. – С. 5–12.

Шафран С.А., Сычев В.Г. Регулирование азотного питания культурных растений. – М.: ВНИИА, 2015. – 156 с.

Швыркина С.В. Влияние агрохимических свойств дерново-подзолистых и серых лесных почв на эффективность применения минеральных удобрений под картофель: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – М.: ВНИИА, 2014. – 24 с.

Шевцова Л.К. Структура баланса углерода и биоэнергетическая оценка его компонентов в агроценозах длительных полевых опытов / Л.К. Шевцова, В.А. Романенков, Г.В. Благовещенский, К.П. Хайдуков, С.О. Канзываа // Агрохимия. – 2015. – № 12. – С. 67–75.

Шевцова Л.К., Сизова Д.М. Влияние длительного применения удобрений на органическое вещество и соединения азота в почвах разного типа. – М.: ВИУА, 1974. – Вып. 2. – С. 20–58.

Шеларь И.М., Пономарева Л.М. Влияние окультуривания на содержание и состав гумуса в темно-серой оподзоленной почве // Плодородие почв и эффективность удобрений. – Харьков: ХСХИ, 1978. – Т. 255. – С. 32–37.

Шильников И.А., Аканова Н.И., Никифорова М.В. Итоги исследований по известкованию почв и задачи на 2001–2005 гг. // Бюллетень ВИУА. – М.: ВИУА, 2001. – № 115. – С. 87–91.

Шильников И.А., Лебедева Л.А. Известкование почв. – М.: Агропромиздат, 1987. – 170 с.

Шильников И.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия / И.А. Шильников, В.Г. Сычев, Н.А. Зеленев, Н.И. Аканова, Л.С. Федотова. – М.: ВНИИА, 2008. – 338 с.

Шишов Л.Л. Модели плодородия агроэкосистем как важный компонент почвенно-экологических исследований в решении вопросов расширенного воспроизводства почвенного плодородия // Модели плодородия почв и методы их разработки / Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – М., 1982. – С. 5–9.

Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н. Современные концепции управления плодородием почв // Плодородие почв: проблемы, исследования, модели / Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – М., 1985. – С. 3–12.

Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. – М.: Агропромиздат, 1991. – 304 с.

Шишов Л.Л., Карманов И.И., Дурманов Д.Н. Критерии и модели плодородия почв. – М.: Агропромиздат, 1987. – 183 с.

Шубина И.Г. Изменение серых лесных почв горно-марийских дубрав при сельскохозяйственном использовании // Вопросы эффективного использования фосфоритной муки, генезиса и повышения плодородия почв. – Горький: ГСХИ, 1973. – Т. 55. – С. 128–133.

Янишевский Ф.В. Баланс питательных веществ при многолетнем применении минеральных удобрений / Ф.В. Янишевский, В.В. Прокошев, В.А. Панькин [и др.] // Повышение плодородия почв и продуктивности сельского хозяйства при интенсивной химизации. – М.: Наука, 1983. – С. 59–69.

Alcamo J. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia / J. Alcamo, N. Dronin, M. Endejan, G. Golubev, A. Kirilenko // Global Environ. Change. – 2007. – Vol. 17. – P. 429–444.

Anon. Central soil fertility research at the university of Illinois. North Central extension – industry soil fertility workshop. – Missouri, 1988. – Vol. 4. – P. 9–12.

Brian Halweil. Can organic farming feed us all? // Worldwatch Institute (Vision for a sustainable world). – 2006. – Vol. 19. – No. 3. – P. 18–24.

Characterization of fertility and particle size of varzea soils of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul States of Brazil / N.K. Fageria, A.B. Santos, I.D.G. Lins [et al.] // Commun. Soil. Sci. and Plant Anal. – 1997. – Vol. 28. – No. 1–2. – P. 37–47.

Cooke G.W. Phosphorus and potassium problems in plant production and How to solve them // 9th World Fertilizer Congress of C.I.E.C. – Budapest, 11–16 June, 1984. – P. 49.

Csatho P. Connection between soil and plant K contents in a network of Hungarian long – term field trials // Promise Precip. – Past, Present and Future: Abstr. Int. Soil and Plant Anal. Symp., Minneapolis, Minn., 2–7 Aug., 1997 // Commun. Soil Sci. and Plant Anal. – 1998. – Vol. 29. – No. 11–14. – P. 1388.

Csatho P., Arendas T. New environmentally friendly fertilizer advisory system, based on the date set of the Hungarian Long-term field trials set up between 1960 and 1995 // Promise Precip. – Past, Present and Future: Pap. Int. Soil and Anal. Symp., Minneapolis, Minn., 2–7 Aug., 1997 // Commun. Soil Sci. and Plant Anal. – 1998. – Vol. 29. – No. 11–14. – P. 2161–2174.

Dankers R. Climate impacts in Russia: changes in carbon storage and exchange /, R. Dankers, O. Anisimov, P. Falloon, J. Gomall, S. Reneva, A. Wiltshire. – UK: Met Office Hadley Centre, 2010. – October. – 112 p.

Dorais Martine Organic production of vegetables: State of the art and challenges. Agriculture and Agri-Food Canada / Horticultural Research Centre, Laval University. – Canada, Quebec, 2007.

Falloon P. Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats / P. Falloon, P. Smith, R. Betts, C.D. Jones, J. Smith, D. Hemming, A. Challinor // In: Singh S.N. (Ed.): Climate Change and Crops. – Berlin: Springer, 2009. – Chapter 5. – P. 81–111.

Gachon L. The usefulness of a good level of soil phosphate reserves // Phosph. Agr. – 1977. – Vol. 31. – No. 70. – P. 25–30.

Gysi C. Modelling and measurement; Adrianov S.N. Запасы гумуса и элементов питания растений в дерново-подзолистых, серых лесных и черноземных почвах // Агрохимия. – 1990. – № 4. – С. 126–138.

Koershens M., Weigel A., Shulz E. Turnover of soil organic matter and longterm balances – tools for evaluating sustainable productivity of soils // Z. Pflanzenemehr, Bodenk. – 1988. – Vol. 161. – P. 409–424.

Kurtinecz P. Efectual de lung durat al amendarii si fertilizarii solurilor acide din nord-vestul Pomnili // Prod. Veget. Cereale plante tehn. – 1988. – Vol. 40. – No. 11. – P. 23–29.

Laskowski D.A., Swann R.L., McCall P.J, Bidlack H.D. Soil degradation studies // Residue Reviews. – 1983. – Vol. 85. – P. 139–147.

Nikolova M. Калияд – хранителен елемент за добив и качество / M. Nikolova, E. Andres, K. Glas [et al.]; Международен Калиев институт. – Базель, 1995. – 60 с.

Procedures for soil analysis / ed. by L.P. van Reeuwijk; International Soil Reference and Information Centre; Food and Agriculture Organization of the United Nations / International Soil Reference and Information Centre, no. 9. – 6th ed. – Wageningen, 2002..

Rembiakowska Ewa Quality of plant products from organic agriculture // Journal of the science of food and agriculture. – 2007. – Vol. 87. – Iss. 15. – P. 2757–2762.

Ryan J. Phosphorus and its utilization in soils of dry regions // Geoderma. – 1983. – Vol. 29. – No. 4. – P. 341–354.

Smith J.U. Projected changes in cropland soil organic carbon stocks in European Russia and the Ukraine, 1990–2070 /, J.U. Smith, P. Smith, M. Wattenbach, P. Gottschalk, V.A. Romanenkov, L.K. Shevtsova, O.D. Sirotenko, D.I. Rukhovich, P.V. Koroleva, I.A. Romanenko, N.V. Lisovoi // Global Change Biology. – 2007. – Vol. 13. – P. 342–356.

Smith P. Agriculture / P. Smith, D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H.H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, R.J. Scholes, O. Sirotenko / In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – Chapter 8.

Smith P. Greenhouse gas mitigation in agriculture / P. Smith, D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H.H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, R.J. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach, J.U. Smith // Philosophical Transactions of the Royal Society. – 2007. – Vol. 363. – P. 789–813.

Smith P. Changes in soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; comparison of three models and implications for climate mitigation / P. Smith, J.U. Smith, U. Franko, K. Kuka, V.A. Romanenkov, L.K. Shevtsova, M. Wattenbach, P. Gottschalk, O.D. Sirotenko, D.I. Rukhovich, P.V. Koroleva, I.A. Romanenko, N.V. Lisovoi // Regional Environmental Change. – 2007c. – Vol. 7. – P. 105–119.

Vetter H. The importance for soil fertility of adequate phosphate contents in the soil // Phosphorus in Agriculture. – 1977. – Vol. 31. – No. 70. – P. 11–24.

Vlin hnojenf a vâpneni na pH pd a vonosy plodin / V. Vank, J. Najmanová, J. Petr [et al.] // Rostl. Vyroba. – 1997. – Vol. 43. – No. 6. – P. 269–274.

Vostal J., Balik J. Agrochemocke vlastnosti pud a pudni urodnost // Agrochemia. – Bratislava, 1988. – Vol. 28. – No. 5. – P. 132–134.

Walker A., Barnes A. Simulation of herbicide persistence in soil: a revised computer model. // Pest. Ski. – 1981. – Vol. 12. – P. 123–132.

В.Г. СЫЧЕВ

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ
И ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ
ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Публикуется в авторской редакции

Подписано к печати 23.08.2019.

Формат 70x100 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 26,65. Тираж 300. Заказ № 2888-19/17099.

Издатель – Российская академия наук.

Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) и распространяется бесплатно.

Оригинал-макет подготовлен ООО «Амирит»

Отпечатано в типографии ООО «Амирит»,
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.

Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33

E-mail: zakaz@amirit.ru

Сайт: amirit.ru