СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2020

Плодородие почв России и пути его регулирования
В. Г. Сычев, С. А. Шафран, С. Б. Виноградова 3

Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях
С. А. Шафран 14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Потоки ^{15}N, почвенного и симбиотического азота в дерново-подзолистой эродированной почве
А. А. Завалин, Н. Я. Шмырева, О. А. Соколов 22

Нитратный режим каштановых почв Бурятии при применении удобрений
А. С. Билтуев, Л. В. Будажапов, А. К. Уланов 33

Азотный режим торфяных почв Беларуси
Л. Н. Лученок 41

Питание растений

Биологический метод оптимизации азотного питания и повышения продуктивности клевера красного
В. Н. Баринов, М. Н. Новиков 48

Удобрения

Влияние удобрений на плодородие орошаемых темно-каштановых почв Поволжья и продуктивность сельскохозяйственных культур
В. В. Пронько, Н. А. Пронько, О. В. Рухович, М. В. Беличенко, В. А. Романенков, Т. М. Ярошенко, Н. Ф. Климова, Д. Ю. Журавлев 53

Влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность зерновых культур
В. А. Касатиков 64

Агроэкология

Влияние плодородия агросерой почвы на активность микрофлоры в условиях засухи в Нечерноземной зоне России
Р. Н. Ушаков, А. В. Ручкина 69

ОБЗОРЫ

Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве
В. М. Семенов 78

Contents

No. 6, 2020

Soil Fertility in Russia and Ways of Its Regulation
V. G. Sychev, S. A. Shafran, S. B. Vinogradova 3
Nitrogen Balance in Agriculture of Russia and Its Regulation in Modern Conditions
S. A. Shafran 14

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Flows of ^{15}N, Soil and Symbiotic Nitrogen in Sod-Podzolic Eroded Soil
A. A. Zavalin, N. Ya. Shmyreva, O. A. Sokolov 22
Nitrate Regime of Chestnut Soil of Buryatia when Applying Fertilizers
A. S. Biltuev, L. V. Budazhapov, A. K. Ulanov 33
Nitrogen Regime of Peat Soils of Belarus
L. N. Luchanok 41

Plant Nutrition

Biological Method for Optimizing Nitrogen Nutrition and Increasing Productivity of Red Clover
V. N. Barinov, M. N. Novikov 48

Fertilizers

Influence of Fertilizers on Fertility of Irrigated Dark Chestnut Soils of the Volga Region and Productivity of Agricultural Crops
V. V. Pronko, N. A. Pronko, O. V. Rukhovich, M. V. Belichenko, V. A. Romanenkov, T. M. Yaroshenko, N. F. Klimova, D. Yu. Zhuravlev 53
Effect of Reclamation Doses of Sludge of Municipal Wastewater on Nitrogen Regime of Sod-Podzolic Soil and Crop Productivity
V. A. Kasatikov 64

Agroecology

Influence of Agro-Gray Soil Fertility on Microflora Activity in the Conditions of Drought in the Non-Chernozem Zone of Russia
R. N. Ushakov, A. V. Ruchkina 69

REVIEWS

Functions of Carbon in the Mineralization–Immobilization Turnover of Nitrogen in Soil
V. M. Semenov 78

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 3–13

УДК 63:54

ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ РОССИИ И ПУТИ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

© 2020 г. В. Г. Сычев[1], С. А. Шафран[1,*], С. Б. Виноградова[1,]**

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

**E-mail: shafran38@mail.ru*

***E-mail: vniia-vin@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.01.2020 г.
После доработки 24.01.2020 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Дана оценка современного состояния применения удобрений в России в сравнении с развитыми зарубежными странами. Приведенные данные свидетельствуют о влиянии уровня использования удобрений на плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур и что без применения удобрений никакие другие факторы (сорт, средства защиты растений и т.п.) не могут обеспечить повышение плодородия почв и соответственно увеличение урожайности. Согласно 3-м сценариям развития АПК определена потребность страны в минеральных удобрениях до 2030 г. и составлен прогноз баланса питательных веществ в земледелии России на этот период.

Ключевые слова: минеральные удобрения, плодородие почв, урожайность, баланс элементов питания, прогноз.

DOI: 10.31857/S0002188120060125

ВВЕДЕНИЕ

Растущее население земного шара требует соответствующего количества продовольствия. Прирост населения за 2005–2016 гг. составил 1 млрд человек. К 2030 г. прогнозируется численность населения 8.5 млрд, к концу текущего столетия, по оценкам ООН, – 11.2 млрд человек [1]. Наряду с этим сокращается посевная площадь в расчете на одного человека (рис. 1). Если в настоящее время она составляет 0.18 га, то к 2050 г. снизится до 0.15, к 2100 г. – до 0.12 га [2]. Кроме использования растениеводческой продукции в продовольственных целях все в большей степени она будет применяться для производства биоэнергии и в других промышленных целях [3]. Все это диктует необходимость постоянного наращивания производства продукции сельского хозяйства.

Данные мировой статистики говорят о том, что за последние 40 лет на долю минеральных удобрений приходится 40% прироста производства продовольствия. По данным ФАО [4], потребление минеральных удобрений в 2016 г. достигло 197.5 млн т (рис. 2).

Это не случайно, поскольку среди основных факторов повышения урожайности (сорт, средства защиты растений и другие) главным остается применение удобрений и химических мелиорантов. В основных сельскохозяйственных регионах Российской Федерации объемы внесения минеральных удобрений несопоставимы с мировой практикой, средний уровень их внесения в целом по стране остается на низком уровне (мировая практика: в Европейском союзе – 130, в Латинской Америке – 90, в Китае – 440–526, Бельгии – 276–322, Германии – 199–206, США – 134 кг/га). Среднемировым показателем (≈100 кг/га) Россия уступает почти в 5 раз. Как правило, в тех странах, где получают наиболее высокие урожаи, минеральные удобрения применяются в высоких дозах [5, 6]. Сюда относятся Китай, Бельгия, Нидерланды, Великобритания, Германия. Из постсоветских республик наибольшее количество на 1 га посевной площади вносят в Белоруссии. Из представленных данных хорошо видно, что урожайность зерновых культур 8–9 т/га достигается только при внесении высоких доз удобрений.

Несмотря на то, что в 2017 г. в России производство минеральных удобрений достигло 22.6 млн т д.в., что на 41.4% было больше показателей 1990 г., их внесение под посевы сельскохозяйственных культур в объеме 2.5 млн т д.в. снизилось почти в 4 раза (табл. 1).

Если в 1990 г. на 1 га посева сельскохозяйственных культур вносили 88 кг д.в. и удобряли

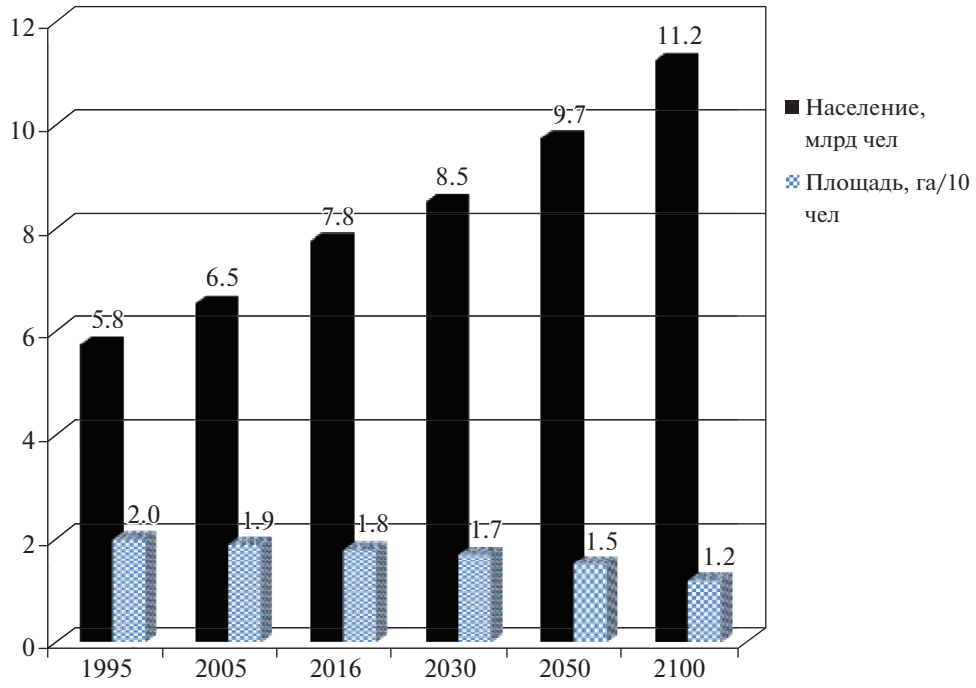

Рис. 1. Численность населения и посевная площадь сельскохозяйственных культур на 10 человек в мире.

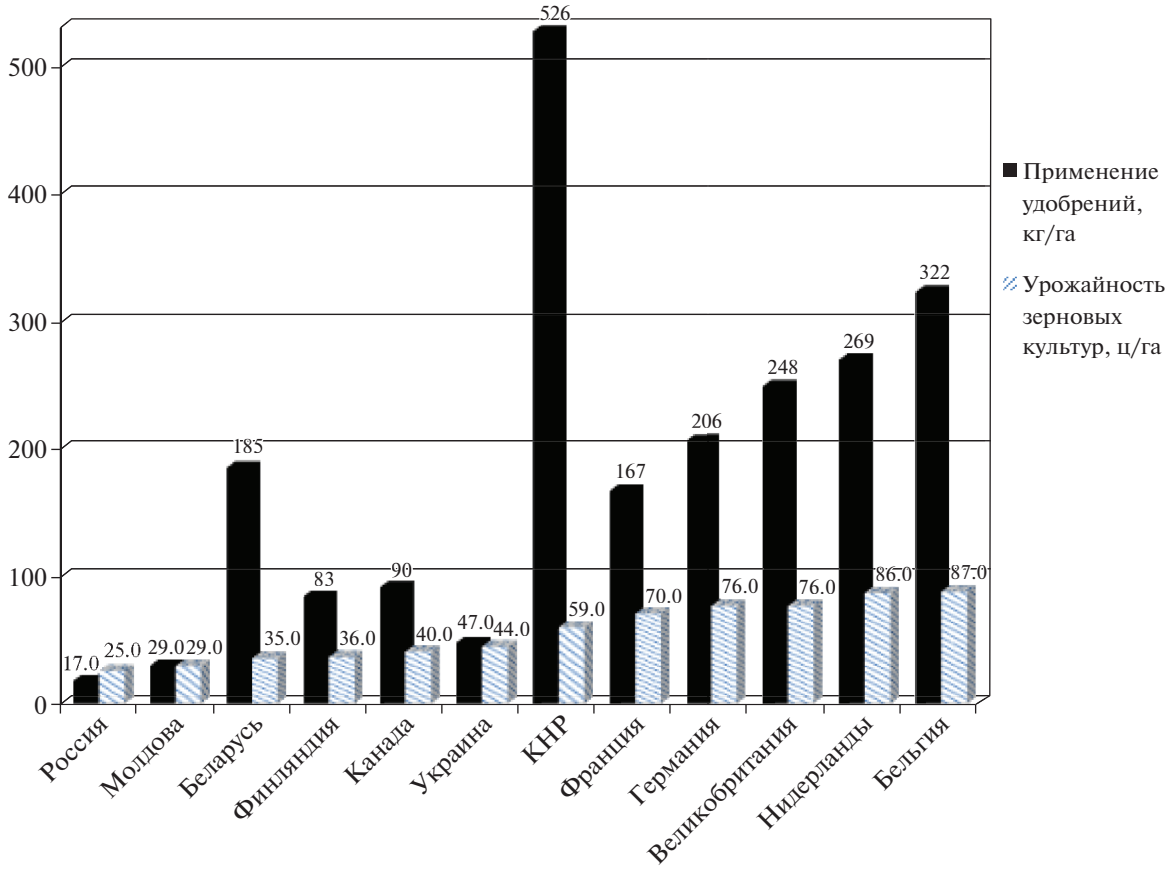

Рис. 2. Применение минеральных удобрений и урожайность зерновых культур в странах мира (среднее за 2014–2016 гг.).

Таблица 1. Внесение минеральных удобрений под посевы сельскохозяйственных культур в сельскохозяйственных организациях РФ [5]

Показатель	Годы					
	2000	2010	2015	2016	2017	2018
Внесено минеральных удобрений (в пересчете на 100% питательных веществ)						
всего, млн т	1.4	1.9	2.0	2.3	2.5	2.5
кг/га						
всей посевной площади	19	38	42	49	55	56
из нее:						
зерновых и зернобобовых культур (без кукурузы)	20	41	45	51	58	60
сахарной свеклы	119	276	274	294	301	305
льна-долгунца	73	50	33	42	32	63
подсолнечника	6	24	25	32	37	34
овоще-бахчевых культур	84	179	166	195	198	187
картофеля	155	263	328	326	354	392
кормовых культур	13	12	14	16	19	20

66% их посевной площади, то в 2017 г. эти показатели составили соответственно 55 кг д.в. и 58%, что почти в 2 раза меньше, чем требуется для нормального питания растений, и в 4 раза меньше, чем в европейских странах, и сравнимо лишь с некоторыми государствами, относящимися к группе развивающихся.

Опыт получения высоких урожаев имеется и в нашей стране. Результаты многочисленных полевых опытов, проведенных научно-исследовательскими институтами и агрохимической службой, а также результаты работы сельскохозяйственных предприятий свидетельствуют, что подъема урожайности можно добиться только за счет планомерной и целенаправленной работы по повышению плодородия почв путем применения удобрений, химической мелиорации и средств защиты растений. Степень почвенной кислотности, повышение фосфатного и калийного уровней почв способствует резкому подъему урожайности. Это хорошо видно на примере одного из длительных полевых опытов ВНИИА, который был заложен в 1956 г. на малоплодородной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, занимающей 2.3 млн га в Нечерноземной зоне и составляющей 28% от площади пашни (рис. 3).

Данные поля характеризовались очень сильной степенью кислотности (pH 4.3), очень низким содержанием подвижного фосфора (21 мг/кг), средним содержанием подвижного калия и гумуса (1.6%). Продуктивность составляла 12 ц к.е./га. В результате комплексного применения известковых, органо-минеральных удобрений и средств защиты растений за 60 лет снизилась кислотность почв, повысилось содержание гумуса, содержание подвижного фосфора возросло в 10 раз и составило 300 мг/кг. Содержание калия увеличилось в 2 раза. Баланс питательных веществ при этом складывался с превышением их поступления в почву над выносом урожаем. Все это в совокупности обеспечило резкий подъем урожайности возделываемых культур. Продуктивность севооборотов постепенно увеличивалась и достигла 50 и более ц к.е./га. Наряду с этим, повысилась окупаемость минеральных удобрений прибавкой урожая с 4.2 до 18.0 кг/кг.

Согласно оценке Всероссийского НИИ агрохимии, при внесении удобрений <20 кг д.в./га урожайность зерна составляет 77 млн т на посевной площади 45 млн га (по Росстату, в 2017 г. в России зерновые заняли 45.4 млн га). При увеличении объема вносимых удобрений до 100 кг/га урожай повысится до 113 млн т, при 150 кг/га – до 144, при 200 кг/га – до 185 млн т. При этом необходимо учитывать возвращение элементов питания в биологический круговорот. Если экспортируется 30 млн т зерна, то безвозвратно вывозится из страны более 750 тыс. т азота. А если еще приплюсовать фосфор и калий, то эта величина возрастет еще больше [7–9].

Даже в условиях двукратного роста к 2025 г. (на 7% в год) объемов внесения в почву минеральных удобрений российскими сельскохозяйственными производителями это составит только 40% общей потребности.

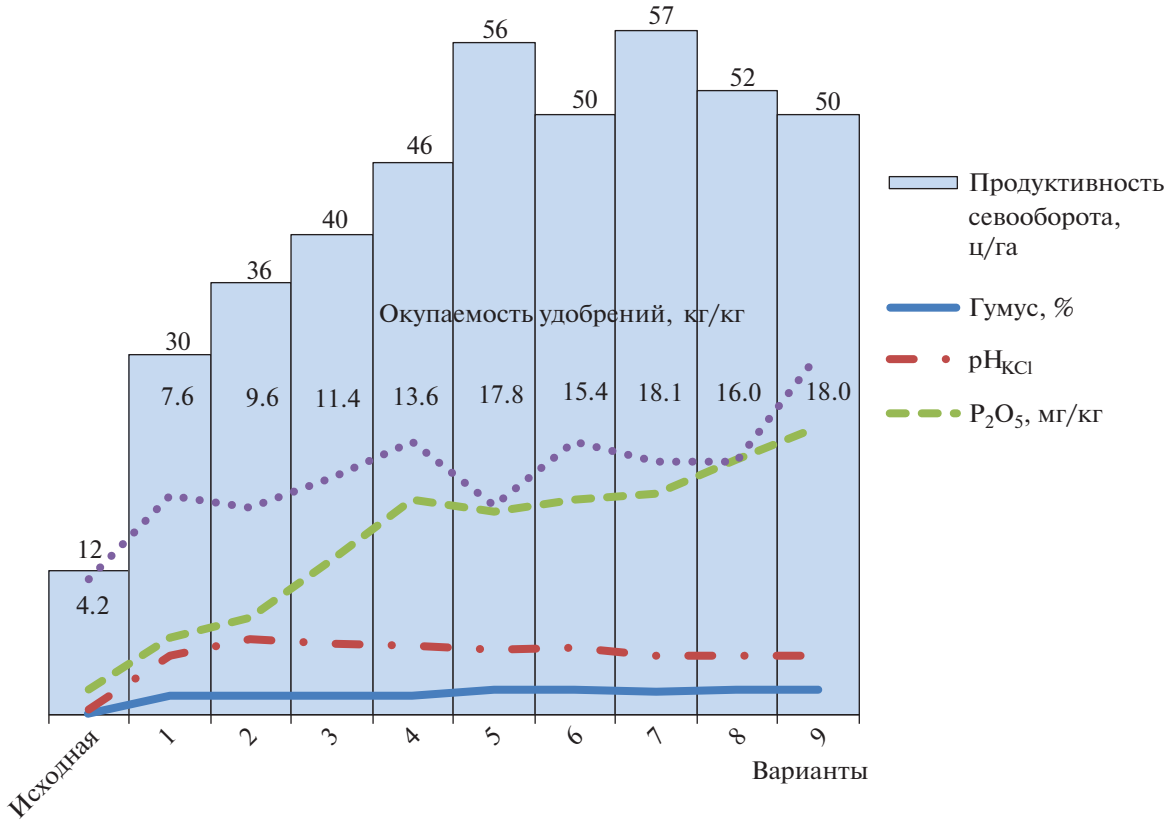

Рис. 3. Продуктивность севооборота в длительном опыте ОС ВНИИА за 60 лет, Московская обл.

Анализ использования удобрений и средств химической мелиорации почв в период интенсивной химизации (1971–1995 гг.) также показывает, что благодаря их внесению в дозах, превышающих вынос питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур, баланс питательных веществ в земледелии страны был положительным, что способствовало резкому повышению плодородия почв в целом в России и особенно в Нечерноземной зоне (табл. 2).

По данным первого цикла агрохимического обследования, больше половины пахотных почв характеризовались низким содержанием подвижного фосфора и 16% – низкой обеспеченностью подвижным калием. Почвы Нечерноземной зоны характеризовались более худшими показателями, в которой кислые почвы составляли 83, низко обеспеченные подвижным фосфором – 64 и калием – 39% (табл. 3).

В период интенсивной химизации благодаря систематической и целенаправленной работе по повышению плодородия в стране наметилась устойчивая тенденция к улучшению агрохимических свойств пахотных почв. Интенсивное известкование позволило за короткий срок снизить долю кислых почв в целом по России с 57 до 34%, в Нечерноземной зоне – с 83 до 52%. За этот период удельный вес пашни с низким содержанием P_2O_5 сократился до 22, K_2O – до 9%, в Нечерноземной зоне – соответственно до 16 и 22%.

Использование результатов многочисленных полевых опытов позволило определить возможную продуктивность пахотных почв без внесения удобрений и с их применением. Согласно нашим расчетам, исходя из агрохимических свойств почв первого цикла обследования, урожайность зерновых культур без внесения удобрений могла составить 16.5 ц/га, в Нечерноземной зоне – 14.1 ц/га. В 1996 г., как уже было сказано, благодаря положительному балансу питательных веществ в земледелии значительно улучшились агрохимические свойства пахотных почв, продукционная способность которых повысилась до 18.4 ц/га в целом по России и до 22.7 ц/га в Нечерноземной зоне, т.е. потенциал почв этого региона оказался выше среднероссийского на 3.2 ц/га.

Начиная с 90-х годов прошлого столетия, применение удобрений сократилось, практически прекратилось известкование кислых почв. Баланс питательных веществ в земледелии страны

стал складываться со значительным превышением выноса над их поступлением в почву, что повлекло за собой снижение содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах, увеличению доли площади кислых почв. В наибольшей степени эти негативные изменения коснулись Нечерноземной зоны. Доля кислых почв возросла с 52 до 60%, с низкой обеспеченностью подвижным калием – с 22 до 27%. Эти показатели были характерны для зоны в целом. В отдельных областях, таких как Костромская, Орловская и Рязанская, средневзвешенное содержание подвижного фосфора перешло из группы повышенно обеспеченных в среднюю, в Брянской, Владимирской, Ивановской, Костромской, Орловской и Тверской обл. аналогичное положение отмечено для содержания подвижного калия. Согласно нашему прогнозу, в названных регионах вследствие деградации почв по агрохимическим показателям потенциальная урожайность зерновых культур без внесения удобрений снизилась на 4.4–6.8 ц/га, или на 13–23% (табл. 4).

Согласно долгосрочному прогнозу социально-экономического развития РФ на период 2030 г., намечено значительно увеличить объем производства зерна и довести его к 2030 г. до 145–150 млн т. Для этого необходимо довести среднюю урожайность зерновых культур в целом по стране до 36–38 ц/га. Совершенно очевидно, что решение этой задачи возможно только при систематическом повышении плодородия почв путем комплексного агрохимического окультуривания полей. Об этом свидетельствуют результаты многочисленных полевых опытов научно-исследовательских институтов и агрохимической службы во всех природно-климатических зонах страны. Это хорошо видно на примере озимой пшеницы. Группировка экспериментальных данных, согласно принятым градациям по степени кислотности почв и содержанию в них минерального азота, подвижных форм фосфора и калия, позволила оценить комплексное влияние этих факторов на урожайность и эффективность азотных удобрений (табл. 5).

Перевод почв из категории низко окультуренных в повышенно окультуренные по агрохимическим показателям позволяет повысить урожайность данной культуры без применения удобрений на дерново-подзолистых и серых лесных почвах в 4–5 раз, на черноземах выщелоченных – в 3.8, на черноземах карбонатных – в 3 раза, на каштановых почвах – в 4.2 раза (рис. 4).

Кроме того, для каждого из рассмотренных типов почв отмечена значительная разница в эффективности применения азотных удобрений в

Таблица 2. Баланс питательных веществ в земледелии России, кг/га пашни

Год	Поступление с удобрениями			Вынос урожаями	Баланс, ±
	минеральные	органические	всего		
Россия в целом					
Азот					
1971–1995	24	16	40	33	7
1996–2010	9	5	14	31	–17
2011–2018	10	4	14	42	–28
Фосфор					
1971–1995	18	7	25	14	11
1996–2010	3	2	5	9	–4
2011–2018	4	2	6	13	–7
Калий					
1971–1995	14	16	30	37	–7
1996–2010	2	2	4	22	–18
2011–2018	3	3	6	43	–37
Нечерноземная зона					
Азот					
1971–1995	39	26	65	43	22
1996–2010	9	5	14	31	–17
2011–2018	10	4	14	32	–18
Фосфор					
1971–1995	30	11	41	14	27
1996–2010	6	3	9	10	–1
2011–2018	3	2	5	11	–6
Калий					
1971–1995	36	24	60	35	25
1996–2010	3	5	8	31	–23
2011–2018	3	5	8	34	–26

Таблица 3. Доля пахотных почв с неудовлетворительными агрохимическими свойствами, % от обследованной площади

Год	Кислые	С низким содержанием	
		P_2O_5	K_2O
Россия в целом			
1971	57	52	16
1996	34	22	9
2016	33	23	9
Нечерноземная зона			
1971	83	64	39
1996	52	16	22
2016	60	17	27

Таблица 4. Прогноз снижения нормативной урожайности озимой пшеницы без внесения удобрений в результате деградации почв по агрохимическим показателям [11]

Область	Содержание в почве, мг/кг				Урожайность, ц/га	
	на 01.01.1996		на 01.01.2016			
	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O	01.01.1996	01.01.2016
Брянская	189	142	185	105	36.7	31.3
Владимирская	150	131	145	103	36.7	31.3
Ивановская	132	127	113	96	33.0	28.2
Костромская	127	137	100	95	33.0	28.2
Орловская	110	137	94	108	37.0	30.2
Рязанская	108	124	98	112	38.6	34.2
Тверская	134	132	159	96	33.0	28.2

Таблица 5. Группировка почв по степени агрохимической окультуренности [12]

Степень окультуренности	pH_{KCl}	Содержание в почве, мг/кг					
		$N_{мин}$		P_2O_5		K_2O	
		1	2	1	2	1	2
Низкая	<4.5	<5.1	<10	<50	<15	<80	<200
Средняя	4.6–5.5	5.1–10.0	11–20	51–100	16–30	81–120	201–300
Повышенная	>5.5	>10.0	>20	>100	>30	>120	>300

Примечание. В графе 1 – некарбонатные почвы, 2 – карбонатные почвы.

зависимости от степени кислотности и обеспеченности подвижными формами фосфора и калия. При повышении степени окультуренности по агрохимическим показателям возрастала прибавка от азотных удобрений на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, а также на черноземах выщелоченных. На остальных почвенных разностях эффективность азотных удобрений была примерно одинаковой (рис. 5).

Таблица 6. Величины выноса, снижающие содержание подвижных форм фосфора и калия на 10 мг/кг или на 1 мг/100 г почвы [13]

Тип почв и их гранулометрический состав	Вынос, кг/га
P_2O_5	
Дерново-подзолистые на легком суглинке	100–250
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	42–125
Среднее для дерново-подзолистых почв	71
Серая лесная суглинистая	77–125
K_2O	
Дерново-подзолистая песчаная	31–62
Дерново-подзолистая супесчаная	43
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	91
Среднее	48

В последнее время усилилась работа по выведению новых сортов зерновых культур, которые характеризуются более высокой продуктивностью. Однако потенциал этих сортов, по данным МосНИИСХ, реализуется в производственных условиях только на 30–40% [12]. Основной причиной такого положения является несоответствие почвенно-агрохимических условий полей, на которых были выведены высокоурожайные сорта, и полей сельскохозяйственных предприятий (табл. 6, 7).

Возьмем, например, сорта озимой пшеницы МосНИИСХ, которые характеризуются урожайностью 100 т/га и выше (табл. 8). Они получены и испытаны на высокоокультуренных почвах, в которых среднее содержание подвижного фосфора составляло 270–355 мг/кг, т.е. было очень высоким. Таких площадей в Нечерноземной зоне насчитывается только 11%. Кроме того, под эти сорта были внесены минеральные удобрения в высоких дозах – от 180 до 360 кг NPK/га, тогда как в настоящее время в среднем в России под зерновые культуры применяют всего лишь 35–40 кг NPK/га посевной площади.

На почвах, которые характеризуются средней степенью обеспеченности P_2O_5, для получения

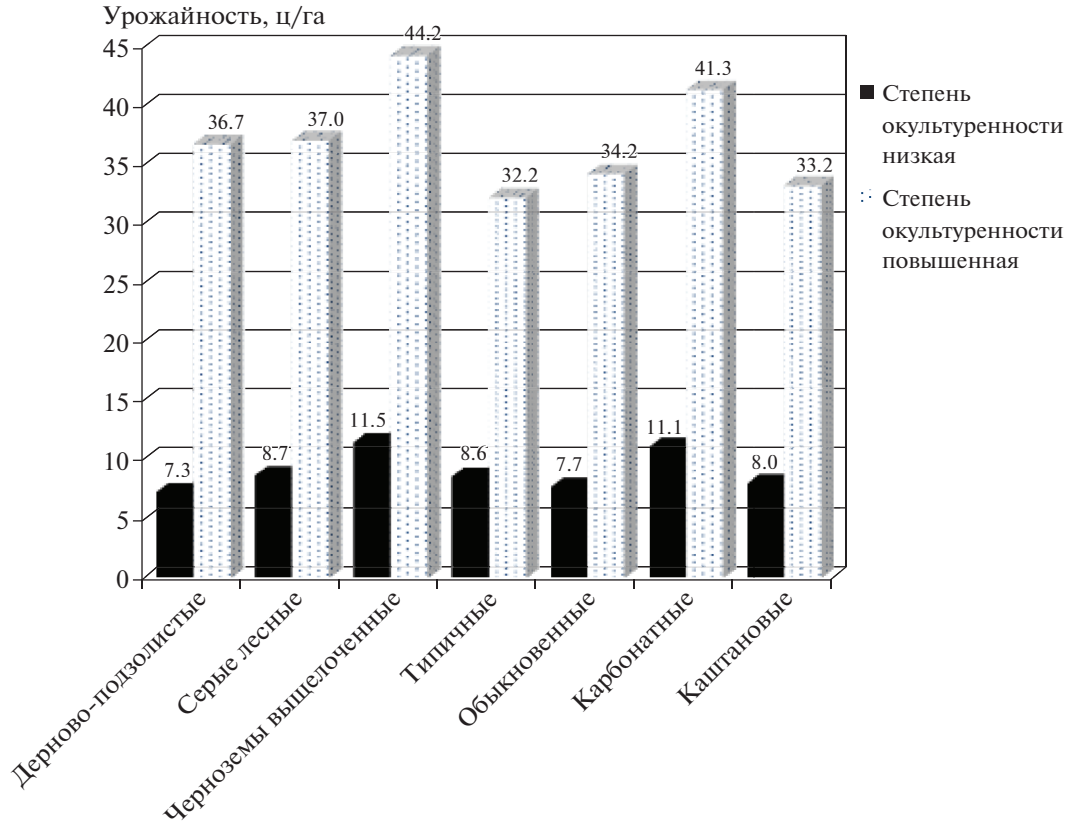

Рис. 4. Влияние степени окультуренности почв России на урожайность озимой пшеницы, ц/га.

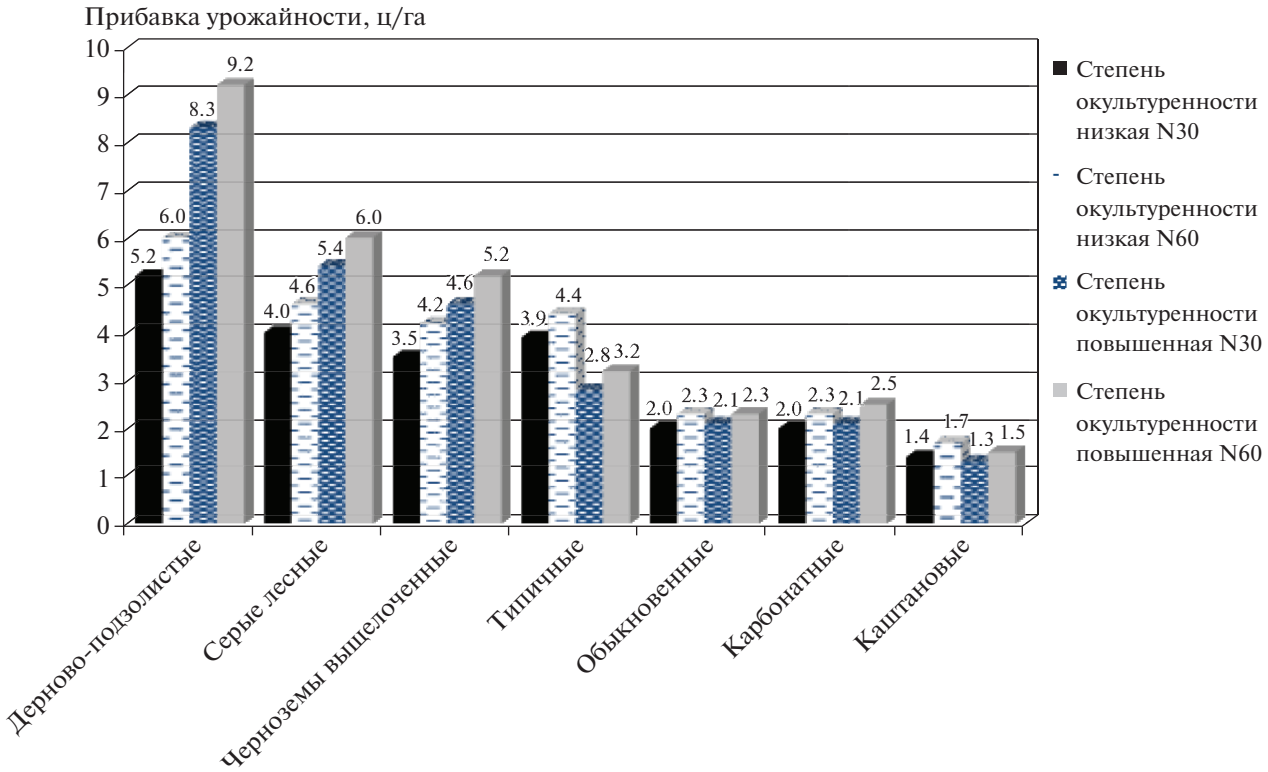

Рис. 5. Прибавка урожайности озимой пшеницы от азотных удобрений на почвах различной окультуренности, ц/га.

Таблица 7. Дозы удобрений, обеспечивающие увеличение содержания подвижных форм фосфора и калия на 10 мг/кг или 1 мг/100 г почвы [13]

Тип почвы	Гранулометрический состав	Дозы, кг/га	
		P_2O_5	K_2O
Дерново-подзолистые	Песчаные и супесчаные	50–60	40–60
	Суглинистые	70–90	60–80
	Глинистые и тяжелосуглинистые	100–120	80–100
Серые лесные	Песчаные и супесчаные	70–80	–
	Суглинистые	90–100	35–45
	Глинистые и тяжелосуглинистые	120–140	
Черноземы выщелоченные	Суглинистые	90–100	80–90
	Глинистые и тяжелосуглинистые	100–120	80–90
Черноземы типичные и обыкновенные	Суглинистые	100–110	–
	Глинистые и тяжелосуглинистые	120–130	–
Черноземы карбонатные	Среднее	110–130	–
Каштановые	Среднее	90–110	

высоких урожаев требуется кроме внесения высоких доз азота применять также фосфорные и калийные удобрения в дозах ≈100 кг/га, об этом свидетельствуют результаты производственного опыта ВНИИА в 2019 г. (табл. 8).

Следовательно, неправомерно говорить о том, что внедрение только новых высокоурожайных сортов позволит резко увеличить урожайность зерновых культур в нашей стране. Совершенно очевидно, что без повышения плодородия почв и внесения удобрений нельзя добиться получения намеченных урожаев. Причем это касается не только Нечерноземной зоны, но и остальных регионов.

Например, опыты, проведенные на черноземе выщелоченном в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края, показали, что в среднем за 3 года исследований урожайность озимой пшеницы >5 т/га можно получить только при внесении необходимого количества питательных элементов, поскольку все новые сорта предъявляют высокие требования к условиям минерального питания и хорошо отзываются на внесение удобрений.

Применение высоких доз NPK (441 кг/га) повысило урожайность по сравнению с дозой N63P52 в зависимости от сорта на 5.2–5.6 т/га (табл. 9). Из приведенных данных видно, что добиться резкого повышения урожайности зерновых культур можно только путем целенаправленного регулирования плодородия почв и доведения его параметров до оптимальных показателей. Для организации этой работы на научной основе нужна надежная нормативно-справочная база, которая позволяла бы разрабатывать систему применения удобрений с учетом складывающихся условий по состоянию плодородия почв и экономических критериев. В настоящее время ситуация такова, что при отрицательно складывающемся балансе питательных веществ в земледелии происходит снижение их содержания в почвах и для того, чтобы контролировать и прогнозировать этот процесс, нужны нормативные данные, характеризующие размер выноса элементов питания, который снижает их содержание в почве (табл. 6). Подобные исследования уже проводили, но они коснулись только почв Нечерноземной зоны. Анализ результатов длительных полевых опытов, проведенных в последнее время, не в полной мере расширил представление об этих величинах.

Наряду с этим, не снят вопрос о совершенствовании нормативно-справочной базы доз удобрений, которые надо внести сверх выноса, чтобы повысить содержание P_2O_5 и K_2O до намеченного уровня (табл. 7).

Научной основой для прогнозирования содержания подвижного фосфора послужили опыты, проведенные много лет назад, и, хотя использование этих данных при организации работ по повышению плодородия почв в свое время дало положительный результат, тем не менее они нуждаются в совершенствовании. В первую очередь следует обратить внимание на разработку критериев регулирования содержания калия в зонах распространения черноземных почв, в которых при отрицательном балансе в земледелии степень обеспеченности почв K_2O не уменьшается и даже в ряде случаев увеличивается. Подобные исследования можно выполнить только в длительных полевых опытах.

Согласно долгосрочному прогнозу социально-экономического развития РФ на период до 2030 г. намечено значительно увеличить производство зерна. Этот прогноз разработан с учетом 3-х сценариев: инерционного, базисного и оптимистического. Инерционный сценарий базируется на сохранении достигнутого уровня почвенного плодородия, базовый ориентирован не только на сохранение, но и на повышение плодородия, оптимистический предполагает дальнейшее воспроизводство плодородия почв, что позволит получать среднегодовой валовый сбор зерна 145–150 млн т. В связи с тем, что в настоящее время значительная часть пахотных почв нуждается в

Таблица 8. Урожайность сортов озимой пшеницы селекции МосНИИСХ (среднее за годы исследований), т/га [13, 14]

Вариант	Сорта			
	Московская 39	Московская 56	Немчиновская 24	Галина
Дерново-подзолистая почва (1998–2007 гг.) pH 5.3, P_2O_5 – 355 мг/кг, K_2O – 143 мг/кг				
N25P65K65 (фон)	5.1	5.7	5.6	5.5
Фон + N30	5.5	–	6.2	5.8
Фон + N60	5.9	6.5	7.1	6.6
Фон + N90	6.4	–	7.1	6.9
Фон + N120	6.7	7.0	8.2	7.5
Дерново-подзолистая почва (2012–2014 гг.) pH 5.5, P_2O_5 – 270 мг/кг, K_2O – 144 мг/кг				
N60P40K60	7.5	10.6	8.0	7.8
N90P60K120	7.8	11.6	8.7	8.6
N120P90K150	8.8	11.7	10.5	10.4
Серая лесная почва (2012–2014 гг.) pH 5.7, P_2O_5 – 196 мг/кг, K_2O – 82 мг/кг				
N60P40K60	4.4	4.9	5.0	4.8^{x}
N90P60K120	5.5	6.5	6.0	6.0^{x}
N120P90K150	6.5	7.1	7.8	6.9^{x}
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (2019 г.) pH 5.2, P_2O_5 – 96 мг/кг, K_2O – 150 мг/кг				
Контроль	4.0	3.9	3.7^{x}	4.3^{xx}
N90P46K31	5.6	5.5	5.3^{x}	6.4^{xx}
N150P76K51	6.6	5.7	7.1^{x}	7.6^{xx}
N210P110K74	5.8	6.2	7.1^{x}	8.5^{xx}
N210P110K100 + мэ	7.1	6.9	7.8^{x}	9.3^{xx}

Примечание. x – сорт Московская 40, xx – сорт Лютесценс 982/08 (отбор), мэ – микроэлементы.

агрохимическом окультуривании потребность удобрений определяется как в расчете на планируемый урожай, так и на повышение содержания питательных веществ в почве. Потребность зерновых культур в минеральных удобрениях составит 7/4 млн т, в том числе азотных – 3/2, фосфорных – 2/1 и калийных – 2/1 млн т, общая потребность равна 13.9 млн т (табл. 10).

Исходя из этого, был составлен прогноз баланса питательных веществ в земледелии России к 2030 г., согласно которому при внесении фосфор-

Таблица 9. Урожайность сортов озимой пшеницы на черноземе выщелоченном Ставропольского края (среднее за 2016–2018 гг.), т/га [15]

Вариант	Сорта		
	Васса	Гром	Доля
N63P32	3.4	3.6	4.0
N124P72K30	5.1	5.2	5.6
N186P95K45	7.5	7.4	7.7
N248P133K60	8.7	9.1	9.2

Примечание. pH 6.1–6.5, P_2O_5 – 20–25 мг/кг, K_2O – 220–270 мг/кг.

Таблица 10. Потребность культур в минеральных удобрениях на 2030 г. в РФ, млн т

Сценарий развития АПК	Под все культуры			
	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
Под зерновые культуры				
Инерционный	1.4	1.4	1.4	4.2
Базовый	2.8	2.1	2.1	7.1
Оптимистический	3.2	2.1	2.1	7.4

Таблица 11. Прогноз баланса питательных веществ в земледелии РФ на 2030 г., кг/га пашни

Сценарий развития АПК	Приход с удобрениями		Вынос урожаями	Баланс, ±
	минеральными	органическими		
		Азот		
Инерционный	20	4	41	–17
Базовый	41	6	47	0
Оптимистический	46	7	53	0
		Фосфор		
Инерционный	20	2	15	7
Базовый	30	3	17	16
Оптимистический	37	3	18	22
		Калий		
Инерционный	20	4	43	–15
Базовый	30	5	47	–12
Оптимистический	37	8	53	–8

ных удобрений при значительном превышении поступления в почву над выносом позволит постепенно перевести почвы с низким и средним содержанием P_2O_5 в более высокую категорию, небольшой дефицит калия будет способствовать улучшению калийного режима почв Нечерноземной зоны, так как предполагается основную часть калия направить в этот регион (табл. 11).

Для улучшения фосфатного режима почв Нечерноземной зоны целесообразно использовать фосфоритную муку, как это делалось в годы интенсивной химизации при комплексном агрохимическом окультуривании полей (табл. 12).

При этом дозы фосфора должны быть дифференцированы в зависимости от содержания подвижных фосфатов в почве. Для того, чтобы перевести почвы зоны из очень низкой, низкой и средней степени обеспеченности подвижным фосфором к 2030 г. потребуется внести в сумме 3443 тыс. т фосфоритной муки или в среднем за год по 345 тыс. т.

Таблица 12. Потребность в фосфоритной муке для доведения содержания подвижного фосфора в пахотных почвах Нечерноземной зоны до оптимального уровня к 2030 г.

Содержание P_2O_5	Площадь, млн га	Доза P_2O_5, кг/га	Потребность, тыс. т	
			общая	ежегодная
Очень низкое	0.9	600	540	54
Низкое	2.9	450	1305	131
Среднее	7.1	225	1598	160
Всего	10.9	–	3443	345

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия располагает всеми возможностями для повышения плодородия почв и подъема урожайности сельскохозяйственных культур до европейского уровня. Об этом красноречиво свидетельствуют результаты многочисленных и многолетних полевых экспериментов научных учреждений и опыт работы отдельных регионов. В среднем за 2016–2018 гг. в Центральном и Северо-Кавказском федеральном округах внесение минеральных удобрений достигло почти 100 кг/га, что позволило получать урожайность зерновых культур ≈40 ц/га. Такой урожай получают в Канаде при аналогичном уровне применения минеральных удобрений.

Вместе с тем, особое внимание следует уделить повышению плодородия почв Нечерноземной зоны. Представленные исследования убеждают в том, что потребность в минеральных удобрениях даже согласно оптимистическому сценарию в 13.9 млн т вполне реальна, т.к. они составляют всего лишь ≈60% от их производства.

Для того, чтобы затраты на применение удобрений могли дать наибольший эффект, необходимо совершенствовать имеющуюся нормативно-справочную базу, поскольку в агропромышленном комплексе постоянно происходят большие перемены. Выводят новые сорта сельскохозяйственных культур, меняют технику и

технологии возделывания, изменяется плодородие почвы и климат. В связи с этим исследования по изучению эффективности минеральных удобрений необходимо проводить постоянно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численность населения в мире по годам [Электр. ресурс]. Режим доступа URL: //total-rating.ru/1918-chislennost-v-mire-po-go-dam.html#tablica_s_dannymi_chislennosti_naseleniya_po_godam_i_dinamika_rosta_naseleniya_v_mire_po_-godam_do_2017_goda (Дата обращения: 08.10.2019).
2. Посевные площади, потребление удобрений [Электр. ресурс]. Режим доступа URL: //https://knoema.ru/atlas (Дата обращения: 08.10.2019).
3. *Кудеяров В.Н.* Баланс углерода и азота в современном земледелии Российской Федерации // Фундаментальные проблемы управления циклом азота в современном земледелии. Владимир: ВНИИОУ – филиал Верхневолжского ФАНЦ, 2019. С. 3–23.
4. Анализ мирового рынка минеральных удобрений в 2012–2016 гг., прогноз на 2017–2021 гг. [Электр. ресурс]. Дата выпуска 14.11.2017. Режим доступа URL: //https://marketing.rbc.ru/research/39455/ (Дата обращения: 14.11.2019).
5. *Алтухов А.И., Сычев В.Г., Винничек Л.Б.* Развитие производства и рынка минеральных удобрений // Плодородие. 2019. № 3 (108). С. 6–9.
6. *Алтухов А.И., Сычев В.Г., Винничек Л.Б.* Российский рынок минеральных удобрений: проблемы и возможности решения // Вестн. КурскГСХА. 2019. № 5. С. 1–8.
7. Концепция развития агрохимии и агрохимического обслуживания сельского хозяйства Российской Федерации на период до 2010 г. М.: ВНИИА, 2005. 80 с.
8. Прогноз потребности и платежеспособности спроса сельского хозяйства Российской Федерации на минеральные удобрения до 2020 года. М.: ВНИИА, 2011. 80 с.
9. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования: М.: РАН, 2019. 349 с.
10. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и его резервы // Агрохимия. 2016. № 8. С. 3–11.
11. *Шафран С.А.* Проблема азота в земледелии России и ее решение. Плодородие почв России: состояние и возможности. М.: ВНИИА, 2019. С. 32–39.
12. *Неттевич Э.Д.* Итоги селекции основных зерновых культур в начале 3-го тысячелетия. М.: НИИСХ ЦРНЗ, 2002. 45 с.
13. *Журавлева Е.В.* Научное обоснование повышения продуктивности и качества зерна интенсивных сортов озимой пшеницы в земледелии Центрального Нечерноземья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 2011. 41 с.
14. *Политыко П.М., Киселев Е.Ф., Долгих А.В.* Воздействие удобрений и средств защиты растений на качество зерна интенсивных сортов озимой пшеницы // Пробл. агрохим. и экол. 2016. № 1. С. 10–17.
15. *Ожередова А.Ю., Есаулко А.Н.* Влияние минеральных удобрений на содержание элементов питания в растениях и урожайность зерна озимой пшеницы // Плодородие. 2019. № 4. С. 6–8.
16. *Сычев В.Г., Шафран С.А.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.

Soil Fertility in Russia and Ways of Its Regulation

V. G. Sychev[a], S. A. Shafran[a,#], and S. B. Vinogradova[a,##]

[a]D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia

[#]E-mail: shafran38@mail.ru

[##]E-mail: vniia-vin@mail.ru

The assessment of the current state of application of fertilizers in Russia in comparison with developed foreign countries is given. These data indicate the impact of the level of fertilizer use on soil fertility and crop yields, these data suggest that without the use of fertilizers, no other factors (variety, plant protection products, etc.) can provide an increase in soil fertility and, accordingly, increase productivity. According to three scenarios for the development of agriculture, the country's need for mineral fertilizers until 2030 is determined and a forecast of the balance of nutrients in agriculture in Russia for this period is made.

Key words: mineral fertilizers, soil fertility, yield, balance of nutrients, forecast.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 14–21

УДК 63:54

БАЛАНС АЗОТА В ЗЕМЛЕДЕЛИИ РОССИИ И ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

© 2020 г. С. А. Шафран

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

E-mail: shafran38@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2019 г.
После доработки 28.11.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Обобщение многочисленного экспериментального материала с использованием методов математического моделирования позволило разработать нормативы окупаемости азотных удобрений прибавкой урожая зерновых культур для основных типов почв страны. Использование этих нормативов позволяет устанавливать дозы азота с учетом агрохимических свойств почв и уровня планируемой урожайности, прогнозировать эффективность применения азотных удобрений, оценивать их экономическую эффективность.

Ключевые слова: баланс азота, нормативы окупаемости азотных удобрений, эффективность азота, типы почв, агрохимические свойства.

DOI: 10.31857/S0002188120060113

ВВЕДЕНИЕ

В мировом производстве минеральных удобрений азотные занимают первое место. В нашей стране азот также сыграл важную роль в развитии земледелия. Во второй половине XX века в России быстрыми темпами стала развиваться промышленность по производству минеральных удобрений. Начиная с 1966–1970 гг. по 1986–1990 гг., их применение почти утроилось и во все периоды внесение азотных удобрений преобладало над фосфорными и калийными. Затем произошел резкий спад в применении удобрений, но при этом применение азотных удобрений сократилось в меньшей степени по сравнению с фосфорными и калийными. Если использование фосфора и калия уменьшилось в 12 с лишним раз, то азота – только в 5.3 раза. Соотношение вносимых удобрений изменилось в пользу азота и составляет в последние годы 1 : 0.37 : 0.23. Доля азота от общего внесения составляла 62–64%. Согласно уровню применения азотных удобрений, изменился баланс азота в земледелии России. До 1975 г. вынос азота урожаями превышал его поступление в почву с минеральными и органическими удобрениями. Затем в течение 3-х последующих пятилеток внесение азота стало больше его выноса урожаями, основной поток которых был направлен в Нечерноземную зону. В 1990-х гг. применение азотных удобрений резко сократилось. Ежегодный дефицит этого элемента стал составлять 19–35 кг/га (табл. 1). Это означает, что значительная часть урожая формируется за счет ресурсов почвы и если их не восполнять, то рано или позд-

Таблица 1. Баланс азота в земледелии России (среднее за год), кг/га пашни

Год	Внесение с удобрениями		Вынос урожаем	Баланс
	минеральными	органическими		
1966–1970	10	9	31	–12
1971–1975	18	12	33	–3
1976–1980	23	16	36	3
1981–1985	29	20	29	20
1986–1990	36	20	34	22
1991–1995	16	10	34	–8
1996–2000	8	4	33	–21
2001–2005	7	2	30	–21
2006–2010	10	4	33	–19
2011–2015	10	3	40	–27
2016	12	3	46	–31
2017	12	3	50	–35
2018	13	3	42	–26

Таблица 2. Урожайность озимой пшеницы в зависимости от содержания минерального азота в почвах без внесения удобрений, ц/га

Почвы	Содержание $N_{мин}$ в почве		
	низкое	среднее	повышенное и высокое
Дерново-подзолистые	12.4	16.3	24.6
Серые лесные	13.7	19.2	27.4
Черноземы выщелоченные	17.1	24.0	34.1
Черноземы типичные	12.8	17.9	24.8
Черноземы обыкновенные	12.2	17.1	24.6
Черноземы карбонатные	18.2	23.4	28.8
Каштановые	9.0	16.2	23.3

но 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 вносят в наименьшем количестве. Это вызвано увеличением диспаритета цен на минеральные удобрения и растениеводческую продукцию. Стало труднее получать прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от удобрений, стоимость которых превышала бы затраты на их применение.

В связи с этим назрела необходимость в дальнейшем совершенствовании методов определения потребности растений в удобрениях для того, чтобы более рационально их использовать при возделывании сельскохозяйственных культур. Вопросы диагностики азотного питания являются наиболее сложными по сравнению с фосфорным и калийным. В силу своей высокой подвижности формы минерального азота делают невозможным использование для диагностических целей методов, аналогичных применяемым при обследовании почв на содержание подвижных форм фосфора и калия с периодичностью (в зависимости от зоны) в 5–10 лет. Для определения потребности растений в азотных удобрениях необходимо ежегодное и оперативное обследование посевов.

Кроме того, эффективность азотных удобрений зависит не только от содержания доступных форм азота в почве, но и от других агрохимических показателей, таких как реакция почвенной среды и степень обеспеченности подвижными формами фосфора и калия. Многочисленные полевые опыты свидетельствуют о том, что агрохимические свойства почв оказывают гораздо большее влияние на урожайность культур и эффективность применения удобрений по сравнению с генетическими свойствами и агрометеорологическими условиями [1, 2].

Для того, чтобы эти результаты могли успешно использовать при определении потребности сельскохозяйственных культур в элементах питания, нужна надежная научно обоснованная база, в которой результаты полевых опытов были бы привязаны к конкретным агрохимическим свойствам почв. Такие разработки выполнены ВНИИА для основных зерновых культур, картофеля, льна-долгунца и сахарной свеклы [3–6].

Цель работы – обобщение многочисленного экспериментального материала с использованием методов математического моделирования для разработки нормативов окупаемости азотных удобрений прибавкой урожая зерновых культур для основных типов почв страны.

Таблица 3. Прибавка урожайности озимой пшеницы от азотных удобрений в зависимости от содержания минерального азота в почве, ц/га

Почвы	Содержание $N_{мин}$ в почве					
	низкое		среднее		повышенное и высокое	
	N30	N60	N30	N60	N30	N60
Дерново-подзолистые	8.0	9.4	7.3	8.6	5.9	6.9
Серые лесные	6.3	7.7	4.9	6.0	3.6	4.7
Черноземы выщелоченные	5.5	7.8	4.2	6.0	3.4	4.8
Черноземы типичные	5.0	6.6	3.9	5.1	2.3	3.1
Черноземы обыкновенные	3.2	4.2	2.8	3.8	1.6	2.1
Черноземы карбонатные	3.0	4.6	2.3	3.5	1.6	2.5
Каштановые	2.0	2.8	1.5	2.1	1.1	1.4

Таблица 4. Прибавка урожайности яровой пшеницы от азотных удобрений в зависимости от содержания нитратного азота в почвах, ц/га

Содержание $N\text{-}NO_3$, мг/кг	Урожайность без удобрений, ц/га	Прибавка урожайности, ц/га			
		N30	N60	N90	N120
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

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой разработки служил метод математического моделирования, который позволил обработать большой массив экспериментальных данных, установить влияние изучаемых факторов на урожайность культур и эффективность азотных удобрений, выявить из них наиболее значимые и на этой основе создать соответствующие модели и подготовить их табличную интерпретацию. Исходной информацией для этого были полевые опыты, проведенные научно-исследовательскими учреждениями Геосети ВНИИА и агрохимической службой. В отличие от имеющихся, эти материалы разработаны для основных типов и подтипов почв в пределах Федеральных округов. При наличии достаточной информации выборки подразделялись также и по гранулометрическому составу почв. Это касалось в основном дерново-подзолистых почв. К обобщению принимали опыты, схемы проведения которых позволяли вычленить отдельное действие азотных удобрений.

На первом этапе обобщения определяли парную корреляцию между изучаемыми факторами, и если она оказывалась достоверной и устойчивой, то данный фактор включали в модель. Влияние изучаемых факторов на результативный признак оценивали величинами коэффициентов корреляции или корреляционным отношением.

В связи с тем, что в структуре баланса азота наибольший удельный вес занимает зерновой комплекс, имеет смысл вопросы его регулирования рассмотреть на примере основных культур, составляющих этот комплекс. Для установления влияния степени обеспеченности азотом в опы-

Таблица 5. Прибавка урожайности пшеницы от азотных удобрений при различном содержании подвижного фосфора в почвах, ц/га

Почвы	Содержание P_2O_5					
	низкое		среднее		выше среднего	
	N30	N60	N30	N60	N30	N60
Озимая пшеница						
Дерново-подзолистые	6.3	6.9	8.3	9.2	8.5	9.4
Серые лесные	4.1	5.4	5.6	7.4	5.8	7.7
Черноземы выщелоченные	3.2	4.9	4.5	6.8	5.1	7.8
Черноземы типичные	3.3	4.7	4.3	6.3	4.5	6.6
Черноземы обыкновенные	2.3	2.9	3.0	3.8	3.4	4.2
Черноземы карбонатные	1.6	2.4	2.6	4.0	3.0	4.6
Каштановые	1.3	1.9	1.7	2.5	1.8	2.8
Яровая пшеница						
Дерново-подзолистые	3.8	4.2	4.9	5.4	6.4	7.0
Серые лесные	2.3	2.5	3.1	3.4	3.2	3.5
Черноземы выщелоченные	1.6	1.8	2.2	2.3	2.5	2.7
Черноземы обыкновенные и южные	1.0	1.3	1.4	1.7	1.6	2.1

Таблица 6. Прибавка урожайности пшеницы от азотных удобрений при различном содержании подвижного калия в почвах, ц/га

Почвы	Содержание K_2O					
	низкое		среднее		выше среднего	
	N30	N60	N30	N60	N30	N60
Озимая пшеница						
Дерново-подзолистые	6.7	7.6	8.0	8.8	8.6	9.2
Серые лесные	4.4	6.0	5.3	7.0	6.6	7.6
Черноземы выщелоченные	3.7	5.8	4.3	6.5	4.9	7.2
Черноземы типичные	3.7	5.5	4.2	6.0	4.2	6.1
Черноземы обыкновенные	2.4	3.1	2.5	3.7	3.3	4.1
Черноземы карбонатные	2.3	3.5	2.4	3.7	2.5	3.8
Каштановые	1.4	2.2	1.7	2.5	1.7	2.5
Яровая пшеница						
Дерново-подзолистые	4.3	4.8	5.2	5.7	5.5	6.0
Серые лесные	2.5	2.8	3.0	3.2	3.1	3.4
Черноземы выщелоченные	1.8	2.0	2.2	2.4	2.3	2.4
Черноземы обыкновенные и южные	1.1	1.4	1.3	1.8	1.6	2.0
Лугово-черноземные (Дальневосточный округ)	2.7	3.1	2.9	3.3	3.0	3.4

Таблица 7. Прибавка урожайности озимой пшеницы от азотных удобрений при различной степени кислотности почв, ц/га

Почвы	pH_{KCl}	Урожайность без удобрений	Дозы азота, кг/га			
			30	60	90	120
Дерново-подзолистые	≤5.5	23.1	8.2	9.2	9.8	10.2
	>5.5	25.7	10.2	11.4	12.2	12.4
Серые лесные	≤5.5	23.0	5.4	5.9	6.2	6.3
	>5.5	25.9	6.8	7.5	7.9	8.0

тах использовали различные методы определения доступных форм азота в почвах: содержание нитратного, аммонийного, щелочно-гидролизуемого (по Корнфильду), легкогидролизуемого (по Тюрину–Кононовой) азота, нитрификационной способности почв (по Кравкову).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты корреляционного анализа показали, что содержание азота независимо от метода его определения оказывало весьма существенное влияние на урожайность и эффективность азотных удобрений практически для всех изученных почв. Связь представляла четко выраженную криволинейную зависимость. Общая закономерность была такова: с увеличением содержания азота в почвах возрастала урожайность и снижалась эффективность азотных удобрений. Это хорошо видно на примере с озимой пшеницей. Увеличение степени обеспеченности почв, независимо от их генезиса, от низкой до повышенной степени обеспеченности минеральным азотом удваивало урожайность на всех представленных почвенных разностях (табл. 2). С повышением содержания минерального азота происходит снижение прибавки урожайности зерна (табл. 3).

Наряду с этим, при продвижении с севера на юг происходило снижение прибавки урожайности озимой пшеницы от внесения азота. На дерново-подзолистых почвах прибавка урожайности в 1.5–2.0 раза превышала данный показатель на черноземных и в 4 раза – на каштановых почвах. Аналогичная закономерность отмечена также для почв, где в качестве диагностического показателя использовали содержание нитратного азота. С повышением содержания нитратного азота в почвах возрастала урожайность яровой пшеницы в контрольных вариантах и снижалась прибавка урожайности от внесения азотных удобрений. Наиболее высокий эффект был отмечен при низкой степени обеспеченности почв нитратным азотом (табл. 4).

Наряду с содержанием доступных форм азота на эффективность применения азотных удобрений под пшеницу большое влияние оказывает степень обеспеченности почв подвижным фосфором. Увеличение содержания подвижного фосфора от низкой до повышенной группы способствует приросту урожайности как озимой, так и яровой пшеницы в 1.4–1.7 раза на всех представленных почвенных разностях (табл. 5). Аналогичная закономерность отмечена и по степени обеспеченности почв подвижным калием (табл. 6). Степень кислотности дерновоподзолистых и серых лесных почв также способствовала росту урожайности без внесения удобрений и увеличению прибавок урожайности от азотных удобрений (табл. 7).

Таким образом, из рассмотренных результатов исследований следует, что на урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность при-

Таблица 8. Урожайность озимой пшеницы без внесения удобрений в зависимости от комплекса агрохимических свойств почв, ц/га

Почвы	Содержание P_2O_5			
	низкое		выше среднего	
	Содержание K_2O			
	низкое	выше среднего	низкое	выше среднего
Низкое содержание минерального азота				
Дерново-подзолистые	7.3 / 8.1	12.1 / 12.9	12.2 / 13.5	16.5 / 18.4
Серые лесные	8.7 / 9.8	12.7 / 14.3	12.4 / 14.0	16.5 / 18.5
Черноземы				
выщелоченные	11.5	15.2	18.4	22.1
типичные	8.6	11.5	13.7	16.6
обыкновенные	7.7	12.2	12.6	17.1
карбонатные	11.1	13.4	23.8	26.1
Каштановые	8.0	12.7	13.7	18.4
Повышенное содержание минерального азота				
Дерново-подзолистые	14.6 / 16.2	23.2 / 30.3	24.3 / 27.1	33.0 / 36.7
Серые лесные	17.4 / 19.6	25.5 / 28.7	24.8 / 28.0	32.9 / 37.0
Черноземы				
выщелоченные	23.1	29.7	36.8	44.2
типичные	16.6	22.3	26.6	32.2
обыкновенные	15.5	24.5	25.2	34.2
карбонатные	17.5	21.2	37.6	41.3
Каштановые	14.4	22.9	24.7	33.2

Примечание. Над чертой – pH ≤ 5.5, под чертой – pH > 5.5. То же в табл. 9, 10.

меняемых под них доз азотных удобрений оказывают влияние несколько факторов. Среди них – содержание доступных форм азота в почвах, степень их обеспеченности подвижными формами фосфора и калия, реакция почвенной среды. Все перечисленные факторы находятся во взаимодействии друг с другом и могут оказывать как положительное, так и в некоторых случаях отрицательное действие на урожайность и эффективность азотных удобрений. В связи с этим при оценке агрохимических показателей плодородия почв в продукционном процессе необходим учет их взаимного влияния. При этом следует иметь в виду, что каждое поле характеризуется не каждым в отдельности из перечисленных показателей, а взаимодействием этих факторов друг с другом в единой системе. Разработка соответствующих математических моделей и их табличная интерпретация позволяют оценить уровень плодородия почв по комплексу агрохимических свойств различных почв на эффективность азотных удобрений, статистически обосновать значимость установленных зависимостей и представить в табличной форме полученные данные для основных типов почв России.

Результаты исследований показали, что для всех изученных почв комплекс агрохимических свойств оказывает большое влияние на урожайность сельскохозяйственных культур и на эффективность применения под них азотных удобрений. При переводе почв от низкой степени окультуренности в повышенную увеличивается урожайность озимой пшеницы без внесения удобрений в 2.5–4.0 раза (табл. 8).

Для каждого из рассмотренных типов почв отмечена значительная разница во влиянии степени их обеспеченности P_2O_5 и K_2O и улучшении

Таблица 9. Прибавка урожайности озимой пшеницы от азотных удобрений в зависимости от комплекса агрохимических свойств почв, ц/га

Почвы	Содержание P_2O_5							
	низкое				выше среднего			
	Содержание K_2O							
	низкое		выше среднего		низкое		выше среднего	
	N30	N60	N30	N60	N30	N60	N30	N60
Низкое содержание минерального азота								
Дерново-подзолистые	5.2 / 6.5	6.0 / 7.5	6.8 / 8.5	7.6 / 9.5	7.4 / 9.1	8.5 / 10.6	9.0 / 11.2	10.1 / 12.5
Серые лесные	4.0 / 4.7	4.6 / 5.3	5.8 / 6.5	6.1 / 7.2	6.1 / 7.0	6.9 / 7.9	7.7 / 8.8	8.5 / 9.8
Черноземы								
выщелоченные	4.2	4.2	4.9	5.6	5.0	7.0	7.4	8.5
типичные	3.9	4.4	4.4	4.9	5.5	6.2	6.1	6.8
обыкновенные	2.0	2.3	3.0	3.4	3.3	3.7	4.3	4.7
карбонатные	2.0	2.3	2.2	2.5	3.8	4.4	3.9	4.7
Каштановые	1.4	1.7	1.8	2.1	2.0	2.5	2.5	2.9
Повышенное содержание минерального азота								
Дерново-подзолистые	3.8 / 4.8	4.4 / 5.5	5.0 / 6.2	5.6 / 7.0	5.4 / 6.7	6.2 / 7.8	6.6 / 8.3	7.5 / 9.2
Серые лесные	2.5 / 2.9	2.8 / 3.3	3.4 / 4.0	3.7 / 4.4	3.7 / 4.3	4.2 / 4.9	4.7 / 5.4	4.8 / 6.0
Черноземы								
выщелоченные	2.2	2.6	3.0	3.4	3.7	4.3	4.6	5.2
типичные	1.8	2.0	2.0	2.3	2.5	2.9	2.8	3.2
обыкновенные	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.8	2.1	2.3
карбонатные	1.0	1.2	1.2	1.3	2.0	2.4	2.1	2.5
Каштановые	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.5

реакции почвенной среды на действие азотных удобрений. Например, при увеличении содержания подвижного фосфора от низкого по повышенного в дерново-подзолистых почвах прибавка урожайности озимой пшеницы возрастала в 1.4 раза. При аналогичной степени обеспеченности почв подвижным калием прирост урожая увеличивался в 1.2–1.3 раза, а при одновременном улучшении фосфатного и калийного режимов – в 1.7–1.8 раза (табл. 9). Такую же закономерность наблюдали и для других почв. Разница состояла лишь в абсолютных величинах прибавки урожайности и соотношениях между низко- и повышено обеспеченными группами почв.

Немалый интерес представляют также данные, отражающие влияние комплекса агрохимических свойств почв на окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая, поскольку, располагая такими данными, представляется возможность выбрать оптимальный вариант применения азотных удобрений, исходя из имеющихся условий (табл. 10). Основополагающими при этом являются экономические показатели. Сюда относятся соотношения цен на минеральные удобрения и сельскохозяйственную продукцию, которые постоянно меняются. В зависимости от этого изменяются также и границы окупаемости удобрений, отражающие величину прибавки урожая, стоимость которой равна затратам на применение удобрения. Например, в ценах 2019 г. средняя стоимость зерна пшеницы 3-го класса составила 13250 руб./т, 4-го – 10650, 5-го – 8650 руб./т, а стоимость аммиачной селитры в ф.м. – 12500 руб./т, общие затраты на ее применение в д.в. – 64700 руб./т. Следовательно, граница окупаемости аммиачной селитры для пшеницы 3-го класса составляет 4.9, 4-го – 6.1 и

Таблица 10. Окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая озимой пшеницы в зависимости от комплекса агрохимических свойств почв, кг/кг

Почвы	Содержание P_2O_5							
	низкое				выше среднего			
	Содержание K_2O							
	низкое		выше среднего		низкое		выше среднего	
	N30	N60	N30	N60	N30	N60	N30	N60
Низкое содержание минерального азота								
Дерново-подзолистые	17.3 21.7	10.0 12.5	22.7 28.3	12.7 15.8	24.7 30.3	14.2 17.7	30.0 37.3	16.8 20.8
Серые лесные	13.3 15.7	7.7 8.8	18.7 21.7	10.2 12.0	20.3 23.3	11.5 13.2	25.7 29.3	14.2 16.3
Черноземы								
выщелоченные	11.7	7.0	16.7	10.2	16.7	11.7	24.7	14.2
типичные	13.0	7.3	14.7	8.2	18.3	10.3	20.3	11.3
обыкновенные	6.7	3.8	10.0	5.7	11.0	14.3	6.2	7.8
карбонатные	6.6	3.8	7.3	4.2	12.7	7.3	13.0	7.8
Каштановые	4.7	2.8	6.0	3.5	7.3	4.2	8.3	4.8
Повышенное содержание минерального азота								
Дерново-подзолистые	12.7 16.0	7.3 9.2	16.7 20.7	9.3 11.7	18.0 22.3	10.3 13.0	22.0 17.7	12.5 15.3
Серые лесные	8.3 9.7	4.7 5.5	11.3 13.3	6.2 7.3	12.3 14.3	7.0 8.2	15.7 18.0	8.5 10.0
Черноземы								
выщелоченные	7.3	4.3	10.0	5.7	12.3	7.2	15.3	8.7
типичные	6.0	3.3	6.7	3.8	8.3	4.8	9.3	5.3
обыкновенные	3.3	2.0	5.0	2.8	5.3	3.0	7.0	3.8
карбонатные	3.3	2.0	4.0	2.2	6.7	4.0	7.0	4.2
Каштановые	2.7	1.5	3.3	1.8	4.0	2.2	4.3	2.5

5-го – 7.5 кг/кг. Это означает, что для того чтобы затраты на применение данного удобрения окупились, необходимо получить на каждый 1 кг азота в зависимости от качества соответственно >4.9, 6.1 и 7.5 кг зерна.

Сопоставление этих величин с данными табл. 10 показывает, что при получении зерна 3-го класса затраты на применение аммиачной селитры окупятся в дозах 30–60 кг/га на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, черноземах выщелоченных и типичных при низком содержании минерального азота. При повышенной обеспеченности положительный результат можно получить только на дерново-подзолистых и серых лесных почвах. Получение зерна 4-го класса сократит диапазон рентабельного использования аммиачной селитры, 5-го класса – позволит окупить затраты на применение данного удобрения только в дозе 30 кг/га при низком содержании минерального азота и повышенном – подвижного фосфора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные данные показали, что их использование открывает широкие возможности для организации более рационального применения азотных удобрений. Они позволяют устанавливать дозы азота с учетом агрохимических свойств почв и уровня планируемой урожайности, прогнозировать эффективность применения азотных удобрений, оценивать при этом не только агрономическую, но и экономическую эффективность. Применение удобрений по предлагаемым нормативам даст возможность за счет оптимизации доз повысить их окупаемость,

уменьшить затраты азота на формирование урожайности сельскохозяйственных культур и снизить себестоимость их производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шафран С.А.* Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений // Агрохимия. 2015. № 3. С. 26–33.
2. *Шафран С.А., Духанина Т.М.* Значение комплексного агрохимического окультуривания в повышении эффективности азотных удобрений под пшеницу // Агрохимия. 2015. № 11. С. 21–30.
3. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. М.: ВНИИА, 2016. 96 с.
4. Прогнозная оценка окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая картофеля в зависимости от агрохимических свойств почв. М.: ВНИИА, 2014. 80 с.
5. Система оценки влияния агрохимических факторов на формирование урожайности льна-долгунца. М.: ВНИИА, 2016. 124 с.
6. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Аристархов А.Н.* Нормативы оценки и методика прогнозирования эффективности применения минеральных удобрений под сахарную свеклу в зависимости от агрохимических свойств почв. М.: ВНИИА, 2018. 188 с.

Nitrogen Balance in Agriculture of Russia and Its Regulation in Modern Conditions

S. A. Shafran

D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia
E-mail: shafran38@mail.ru

Generalization of numerous experimental materials with the use of mathematical modeling methods allowed developing standards of nitrogen fertilizers payback by increase of grain crops yield on the main types of soils of the country. The use of these standards allows you to set the dose of nitrogen with the accounting agrochemical properties of soil and level of the planned yield, to predict the effectiveness of applying nitrogen fertilizer, to assess their economic efficiency.

Key words: nitrogen balance, payback standards of nitrogen fertilizers, nitrogen efficiency, soil types, agrochemical properties.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 22–32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ
Плодородие почв

УДК 631.811.1:631.416.1:631.445.24:631.459

ПОТОКИ ^{15}N, ПОЧВЕННОГО И СИМБИОТИЧЕСКОГО АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЭРОДИРОВАННОЙ ПОЧВЕ

© 2020 г. А. А. Завалин[1,*], Н. Я. Шмырева[1], О. А. Соколов[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

E-mail: zavalin.52@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.
После доработки 04.02.2020 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

В микрополевом опыте с использованием меченного ^{15}N азотного удобрения на эродированной дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в течение 15 лет при выращивании в севообороте зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав 2-го и 3-го года жизни изучали потоки азота в системе удобрения–почва–растения. Возделываемые культуры в 1.3–1.5 раза больше потребляли азот удобрения (^{15}N), почвенный и симбиотический азот на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью. В почве приводораздельной части склона иммобилизовалось в 1.3–1.4 раза больше и в 1.3–3.0 раза меньше терялось ^{15}N, чем в нижней части склона. При локальном способе применения азотного удобрения культуры севооборота потребляли в 1.3–1.6 раза больше ^{15}N, в 1.2 раза – азота почвы и в 1.3–1.6 раза – симбиотического азота по сравнению с разбросным способом внесения. При локализации азотного удобрения иммобилизация азота удобрения и симбиотического и минерализация почвенного азота под культурами севооборота увеличивалась в 1.1–1.5 раза на всех элементах склона, газообразные потери азота, наоборот, снижались в 1.4–7.2 раза. При локальном внесении азотного удобрения биомасса зерна повышалась на 26–28%, сена трав – на 19–26%, содержание сырого белка увеличивалось на 0.3–1.1% в зерне на 3.4–5.4% – в сене многолетних трав. Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами, это достигалось за счет дополнительного использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь элемента. При разбросном способе внесения ^{15}N мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части склона (2–3°) и на 8 м, 13 м и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

Ключевые слова: азотное удобрение, изотоп ^{15}N, потоки азота, иммобилизация, минерализация, устойчивость агроценоза, эродированная почва.

DOI: 10.31857/S0002188120060149

ВВЕДЕНИЕ

Азот является важнейшим фактором регулирования минерального питания растений и плодородия почв, в том числе подверженным водной эрозии. Эрозия почв – серьезная проблема современного земледелия, которая наносит ущерб их плодородию и продуктивности сельскохозяйственных культур, усиливает экологическую нестабильность агроценозов [1]. С жидким стоком в результате эрозии почв из почв теряется ≈1.4 млн т азота в год. Водная эрозия сопровождается процессами дегумификации почв, не использованный растениями азот удобрений претерпевает в почве целый ряд превращений: иммобилизуется почвой, улетучивается в атмосферу и вымывается в нижние горизонты почвенного профиля, а на склонах, кроме этого, мигрирует с поверхностным и внутрипочвенным латеральным стоком талых и ливневых вод [2]. Все это приводит к увеличению отрицательной статьи баланса азота при недостаточном внесении минеральных и других удобрений [3]. Оценить потоки азота в агросистеме возможно с применением стабильного изотопа азота ^{15}N [4]. Ранее было показано, что при внесении изотопно-меченого Na в дерново-подзолистой почве иммобилизовалось 24–40% азота удобрения (от применяемой дозы). Степень использования зерновыми культурами иммобилизованного азота снижалась в первые 5 лет, а затем оставалась на одном уровне – ≈1% от исходного содержания. За 14 лет систематического внесения меченого азота удобрений растения использова-

ли из суглинистой почвы 31%, из супесчаной – 18% от внесенного количества ^{15}N [4, 5]. Установлено также, что использование азота растениями и его закрепление в почве определяются соотношением C : N в поступающих растительных остатках. В частности, при внесении растительных остатков с широким соотношением C : N (например, солома риса) в почве закреплялось максимальное количество меченого азота по сравнению с растительными остатками с узким соотношением углерода и азота (соя, сорго) [6]. Эти данные характеризуют отдельные аспекты участия азота удобрения в круговороте этого элемента в системе почва–растения и не раскрывают потоки элемента при использовании других его источников.

Цель работы – определить параметры круговорота азота удобрения, почвенного и симбиотического азота в агрофитоценозе сельскохозяйственных культур при длительном внесении меченного ^{15}N азотного удобрения (N_a) в севообороте на эродированной дерново-подзолистой почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в течение 15 лет (2000–2015 гг.) с сернокислым аммонием (N_a), обогащенным меченным азотом ^{15}N (20 ат. %) в микрополевом опыте, который размещали на делянках длительного стационарного опыта Смоленского НИИСХ в севообороте с чередованием культур: озимая рожь – овес – ячмень с подсевом многолетних трав – травы 2-го года жизни – травы 3-го года жизни. Почва – дерново-подзолистая среднесуглинистая на карбонатном мореном суглинке слабо- (приводораздельная часть склона 2–3°) и среднесмытая (нижняя часть склона 5–7°). Содержание физической глины – 32–34%. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы верхней и нижней части склона: pH_{KCl} 5.7 и 6.1, $H_г$ (по Каппену) – 1.8 и 0.8 ммоль-экв/100 г почвы, содержание обменных Ca^{2+} – 5.5 и 6.0 и Mg^{2+} – 2.0 и 2.2 ммоль-экв/100 г почвы, гумус (по Тюрину) – 2.1 и 0.8%, $N_{общ}$ – 0.19 и 0.9%, подвижный P_2O_5 – 137 и 187 мг/кг и подвижный K_2O – 138 и 167 мг/кг почвы (по Кирсанову). Микрополевой опыт (размер делянок 0.5 × 1 м) проводили на склоне ЮВ (юго-восточной) экспозиции вогнуто-выпуклой формы в верхней части с уклоном 2–3°, в нижней – 5–7°. Повторность опыта четырехкратная, с ^{15}N – двукратная. Защитные полосы между микроделянками составляли 0.5 м. Обработка почвы: отвальная вспашка + рыхление подпахотного слоя на глубину 10–15 см. Перед закладкой опыта проведено известкование почвы из расчета полной нормы гидролитической кислотности. Меченое азотное удобрение (N50 для зерновых и N30 для трав) вносили весной лентой на глубину 10 см и вразброс на фоне PK-удобрений ($P_{сд}$ в дозах P50 для зерновых и P30 для трав и K_x в дозах K50 для зерновых и K30 для трав).

В почвенных и растительных образцах определяли: $N_{общ}$ – методом сухого сжигания по Дюма на анализаторе Flesh EA модель 1112, атомный % ^{15}N – на масс-спектрометре “Delta V” (ФРГ). Потоки азота в агроэкосистеме рассчитывали по методикам [7–10]. Результаты учета биомассы статистически обрабатывали методом дисперсионного анализа (STATVNIA), достоверность различий оценивали по *F*-критерию Фишера.

Метеоусловия в период вегетации культур севооборота несколько различались, например, гидротермический коэффициент (при среднемноголетней норме 1.7) изменялся в течение севооборота при выращивании озимой ржи – 1.3–1.7, овса – 0.9–1.5, ячменя – 1.6–2.0, трав 2-го года жизни – 1.5–2.1, трав 3-го года жизни – 1.0–2.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате 15-летнего исследования установлено, что максимальное количество азота удобрения (в 1.4–1.5 раза больше) и азот почвы (в 1.5 раза больше) зерновые культуры потребляли на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью (табл. 1). При локальном применении N_a зерновые культуры в 1.3–1.4 раза больше потребляли азот удобрения и в 1.2 раза больше – азот почвы по сравнению с разбросным способом его внесения. Локализация азотного удобрения обеспечивала дополнительное потребление зерновыми культурами “экстра-азота”: в 1.3–1.4 раза больше на приводораздельной части склона и в 1.2–1.6 раза – в нижней его части.

Потребление многолетними травами 2-го года жизни азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота в нижней части склона снижалось в 1.5–1.6 раза, травами 3-го года жизни – в 1.3–1.5 раза по сравнению с приводораздельной его частью (табл. 2). В травах 3-го года жизни вследствие выпадения клевера при перезимовке [10] повышалась доля азота удобрения и азота почвы и снизилась доля симбиотического азота.

При локальном применении азотного удобрения многолетние травы 2-го года жизни в 1.8 раза больше потребляли азот удобрения, азота почвы – в 1.2 раза и симбиотического азота – в 1.3 раза, тогда как травы 3-го года жизни – в 1.5, 1.2 и 1.4 раза

Таблица 1. Потребление азота удобрения и азота почвы зерновыми культурами

Вариант	Общий вынос азота, г/м^2	В том числе азот				“Экстра-азот”	
		удобрения		почвы			
		1	2	1	2	1	2
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
P50K50 (фон)	3.24	–	–	3.24	100	–	–
Фон + ^{15}N50 вразброс	6.33	1.07	18	5.78	82	2.01	30
Фон + ^{15}N50 локально	9.01	1.82	21	6.94	79	4.14	42
Нижняя часть склона, 5–7°							
P50K50 (фон)	2.12	–	–	2.12	100	–	–
Фон + ^{15}N50 вразброс	4.58	0.68	18	3.90	82	1.56	34
Фон + ^{15}N50 локально	5.96	1.22	23	4.74	77	2.58	41
P, %	4						
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.84						
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.60						
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.49						

Примечание. В графе 1 – г/м^2, 2 – %. То же в табл. 2, 9.

соответственно по сравнению с разбросным способом внесения N_a.

В нижней части склона зерновые культуры использовали в 1.5 раза, а бобово-злаковые травы – в 1.3–1.5 раза меньше азот удобрения по сравнению с приводораздельной частью (табл. 3). При этом иммобилизация азота удобрения снижалась при выращивании зерновых культур в 1.4–1.5 раза, а при выращивании трав – в 1.1–1.2 раза. Газообразные потери азота удобрения, наоборот, возрастали при выращивании зерновых культур в 1.3–1.8 раза, при выращивании бобово-злаковых трав – в 1.3–3.0 раза. Наиболее интенсивно газообразные соединения азота возрастали при выращивании многолетних трав 3-го года жизни (в 1.5–3.0 раза). Повышение потерь азота удобрения в нижней части склона связано с температурно-влажностным режимом почвы, с изменением структуры микробоценоза, усилением процессов денитрификации [2], в результате этого снижалось участие азота удобрения в продукционном процессе.

При локальном применении азотного удобрения зерновые культуры в 1.5–1.6 раза лучше использовали азот удобрения, травы 2-го года жизни – в 1.9–2.0 раза, травы 3-го года жизни – в 1.4–1.6 раза по сравнению с разбросным способом его внесения. Азотное удобрение, внесенное локально, стимулировало минерализацию и иммобилизацию азота в почве одновременно (с разной скоростью), вследствие чего происходило сужение соотношения C : N в почве [2, 11]. В результате растения лучше использовали азот удобрения и азот почвы (а травы – и симбиотический азот), его больше иммобилизовалось в почве и меньше терялось, не загрязняя окружающую среду [12, 13].

На дерново-подзолистых почвах зерновые культуры формируют азотный пул за счет почвенного азота (63–90% от общего выноса), а бобовые растения – за счет симбиотического азота (40–85% от общего выноса) [2, 14]. Потоки азота при выращивании зерновых культур характеризовались следующими параметрами (табл. 4). Например, при выращивании ячменя доля нетто-минерализации азота росла от приводораздельной части к основанию склона (72–83 против 66–73% в верхней части склона). Реиммобилизация почвенного азота проходила с наименьшей скоростью при разбросном применении азотного удобрения в нижней части склона.

Складывающиеся условия минерализации почвенного азота существенно влияли на образование и потери газообразных азотсодержащих соединений. В нижней части склона терялось больше в 1.4–1.5 раза почвенного азота, чем на приводораздельной его части. При локальном применении N_a газообразные потери азота почвы снижались в 2 раза на всех элементах склона. При разбросном применении N_a усиливались процессы минерализации почвенного азота, росло образование газообразных азотсодержащих соединений и сни-

Таблица 2. Потребление азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота многолетними бобово-злаковыми травами

Вариант	Общий вынос азота, г/м^2	В том числе азот				Симбиотический азот	
		удобрения		почвы			
		1	2	1	2	1	2
Травы 2-го года жизни							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
P30K30 (фон)	9.5	–	–	1.5	17	8.0	83
Фон + $^{15}N30$ вразброс	12.2	0.7	6	2.0	18	9.8	77
Фон + $^{15}N30$ локально	16.4	1.4	8	2.3	15	12.7	77
Нижняя часть склона, 5–7°							
P30K30 (фон)	6.1	–	–	1.0	17	5.1	83
Фон + $^{15}N30$ вразброс	7.1	0.5	7	1.2	18	6.2	75
Фон + $^{15}N30$ локально	10.6	1.0	9	1.5	15	8.1	76
P, %	3						
HCP_{05} частные средние, г/м^2	4.4						
HCP_{05} рельеф, г/м^2	3.1						
HCP_{05} удобрения, г/м^2	2.5						
Травы 3-го года жизни							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
P30K30 (фон)	4.1	–	–	2.4	58	1.7	42
Фон + $^{15}N30$ вразброс	8.6	1.0	11	4.2	49	3.4	40
Фон + $^{15}N30$ локально	11.0	1.5	14	4.9	44	5.2	38
Нижняя часть склона, 5–7°							
P30K30 (фон)	2.9	–	–	1.8	51	1.4	49
Фон + $^{15}N30$ вразброс	5.6	0.7	13	2.6	48	2.3	40
Фон + $^{15}N30$ локально	7.0	1.1	15	2.9	41	3.1	44
P, %	4						
HCP_{05} частные средние, г/м^2	4.2						
HCP_{05} рельеф, г/м^2	3.0						
HCP_{05} удобрения, г/м^2	2.4						

жалось его участие в продукционном процессе зерновых культур.

При выращивании многолетних бобово-злаковых трав 3-го года жизни растения больше потребляли азот почвы и меньше симбиотический азот по сравнению с травами 2-го года жизни (табл. 5). Под травами 3-го года жизни усиливались процессы минерализации, иммобилизации и образование газообразных соединений почвенного азота. В верхней части склона больше минерализовалось и закреплялось почвенного азота и меньше его терялось по сравнению с нижней его частью.

Под травами 3-го года жизни существенно снижалась интенсивность процессов минерализации–иммобилизации/реиммобилизации симбиотического азота. Снижалось также образование газообразных соединений по сравнению с травами 2-го года жизни. Активность этих процессов превращения симбиотического азота снижалась в нижней части склона в 1.1–1.3 раза по сравнению с верхней приводораздельной его частью. При локальном применении азотного удобрения активность процессов минерализации и иммобилизации симбиотического азота снижалась по сравнению с разбросным способом его

Таблица 3. Потоки и баланс азота удобрения при выращивании зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав на различных элементах рельефа

Вариант	Использовано растениями		Иммобилизовано в слое 0–100 см почвы		Потери	
	1	2	1	2	1	2
Зерновые культуры						
Фон + ^{15}N50 вразброс	1.09 / 21	0.68 / 14	1.35 / 27	0.92 / 18	2.56 / 52	3.40 / 68
Фон + ^{15}N50 локально	1.82 / 33	1.22 / 24	1.87 / 37	1.34 / 27	1.31 / 26	2.45 / 49
P, %	3		4		3	
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.13		0.22		0.30	
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.10		0.16		0.21	
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.10		0.16		0.21	
Травы 2-го года жизни						
Фон + ^{15}N30 вразброс	0.69 / 23	0.53 / 17	1.06 / 35	0.86 / 29	1.25 / 42	1.61 / 54
Фон + ^{15}N30 локально	1.36 / 45	1.00 / 34	1.25 / 42	1.06 / 35	0.40 / 13	0.94 / 31
P, %	4		4		4	
HCP_{05} частных средних, г/м^2	0.14		0.15		0.25	
$НСР_{05}$ рельеф, г/м^2	0.10		0.11		0.17	
$НСР_{05}$ удобрения, г/м^2	0.10		0.11		0.17	
Травы 3-го года жизни						
Фон + ^{15}N30 вразброс	0.96 / 32	0.73 / 24	1.20 / 41	0.97 / 33	0.84 / 30	1.30 / 44
Фон + ^{15}N30 локально	1.53 / 51	1.08 / 36	1.22 / 40	1.12 / 37	0.25 / 9	0.80 / 27
P, %	4		3		4	
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.62		0.23		0.41	
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.44		0.16		0.29	
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.44		0.16		0.29	

Примечание: В графе 1 – приводораздельная часть склона, 2–3°; 2 – нижняя часть склона 5–7°; над чертой – азот удобрения, г/м^2; под чертой – азот удобрения, % от внесенного.

внесения. Низкое использование азота удобрения озимой рожью (9–16% от примененной дозы) при разбросном способе применения удобрения связано с высокой его миграцией с поверхностным стоком и по профилю почвы, а также со значительными газообразными потерями (61–75% от дозы) [12].

Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами (табл. 6). Агрофитоценоз злаковых культур находился в зоне резистентности (на более низком уровне устойчивости). Более высокая устойчивость агрофитоценоза трав достигалась за счет дополнительного (лучшего) использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь азота [14–17]. Одновременно бобово-злаковые травы 3-го года жизни уступали травам 2-го года жизни на всех элементах склона при обоих способах применения азотного удобрения. Устойчивость трав 3-го года жизни не изменилась при локальном способе внесения азотного

Таблица 4. Потоки азота почвы при выращивании ячменя на различных элементах рельефа, г/м^2

Показатель	Приводораздельная часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Потребление азота почвы растениями	6.6	11.4	4.7	6.9
Остаточный минеральный азот	1.8	3.1	0.7	1.0
Иммобилизованный–реиммобилизованный азот почвы	13.2	13.0	8.5	9.7
Газообразные потери азота почвы	25.6	12.3	34.1	17.9
Минерализованный азот почвы	52.3	44.1	53.1	40.5
Нетто-минерализованный азот	37.7	29.4	43.6	29.5
Реиммобилизованный азот	14.6	14.8	9.4	11.1
P, %	2			
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.5			
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.9			
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.9			

Примечание: В графе 1 – азот удобрения вразброс, 2 – азот удобрения локально. То же в табл. 5.

удобрения по сравнению с разбросным способом его применения, поскольку минерализация и иммобилизация почвенного азота изменялась с одинаковой скоростью [7].

Продуктивность зерновых культур в зернотравяном севообороте определялась местом их размещения на склоне и применением N_a (табл. 7). Наибольшую массу зерна (по результатам 3-х ротаций севооборота) формировал ячмень. Все зерновые культуры на приводораздельной части склона формировали массу зерна и соломы больше в 1.4–1.5 раза по сравнению с нижней частью склона. При локальном внесении N_a масса зерна всех культур повышалась на 26–28, масса соломы – на 63–64% по сравнению с разбросным способом его применения.

Содержание в урожае сырого белка определяется биологическими особенностями культур и условиями их выращивания (табл. 8). В нижней части склона содержание сырого белка в зерне изученных культур снижалось в среднем на 0.5–1.0% (озимой ржи – на 0.4–1.0%, овса – на 0.1–0.7%, ячменя – на 1.0–1.4%) по сравнению с приводораздельной частью склона, что было связано с условиями азотного питания и потоками азота в агроэкосистеме [2, 4, 7]. При локальном применении N_a содержание сырого белка в зерне повышалось в среднем на 0.7–1.0% (озимой ржи – на 0.8–0.9%, овса – на 0.7–1.3%, ячменя – на 0.7–0.9%) по сравнению с разбросным способом внесения.

За счет лучшего потребления азота удобрения, почвенного и симбиотического азота многолетние бобово-злаковые травы 2-го и 3-го года жизни формировали в 1.4 раза бóльшую массу сена на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью (табл. 9). За счет локализации азотного удобрения продуктивность травосмесей повышалась: трав 2-го года жизни – на 19–20, трав 3-го года жизни – на 21–26% по сравнению с разбросным способом его внесения.

Минимальное содержание сырого белка многолетние бобово-злаковые травы накапливали на приводораздельной части склона при локальном применении азотного удобрения. Например, в верхней части склона содержание сырого белка в биомассе трав 2-го года жизни превышало на 1.2–2.9%, в травах 3-го года жизни на 3.0–4.0% по сравнению с травами нижней части склона. При локальном применении азотного удобрения содержание сырого белка повышалось в биомассе трав 2-го года жизни на 3.9–5.4%, трав 3-го года жизни – на 3.4–3.5% по сравнению с разбросным способом его внесения в дозе N30.

Установлена также миграция ^{15}N по склону почвы при разбросном систематическом 15-летнем применении азотного удобрения в 5-польном зерно–травяном севообороте в результате водной эрозии. Показано, что азот удобрения мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части

Таблица 5. Потоки азота почвы и симбиотического азота при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на склоне

Показатель	Верхняя часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Травы 2-го года жизни				
Азот почвы				
Общий вынос азота почвы	1.7	1.9	1.4	1.7
Иммобилизованный азот	3.9	2.4	3.1	3.1
Газообразные потери азота почвы	3.8	0.6	6.2	2.8
Минерализованный азот (М)	9.7	5.3	10.8	7.9
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	5.8	2.9	7.7	4.8
Реиммобилизованный азот (РИ)	3.6	2.1	3.0	2.9
P, %	3			
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.4			
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.3			
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.1			
Симбиотический азот				
Вынос симбиотического азота	12.6	14.9	8.2	9.9
Остаточный минеральный азот	0.8	1.0	0.3	0.5
Иммобилизованный азот	20.1	14.0	15.5	11.7
Газообразные потери азота	19.7	2.8	26.9	11.5
Минерализованный азот (М)	53.1	32.7	51.9	33.5
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	33.0	18.7	35.4	21.8
Реиммобилизованный азот (РИ)	19.3	13.1	16.3	11.2
P, %	3			
HCP_{05} частные средние, г/м^2	1.3			
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.9			
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.9			
Травы 3-го года жизни				
Азот почвы				
Общий вынос азота почвы	3.3	4.1	2.1	2.3
Иммобилизованный азот	5.5	5.4	5.0	3.5
Газообразные потери азота почвы	4.3	1.0	7.2	3.5
Минерализованный азот (М)	13.4	10.8	14.4	9.5
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	7.9	5.4	9.3	6.0
Реиммобилизованный азот (РИ)	5.3	5.1	4.9	3.3
P, %	3			
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.5			
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.4			
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.2			

Таблица 5. Окончание

Показатель	Верхняя часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Симбиотический азот				
Вынос симбиотического азота	3.4	3.6	1.4	2.2
Остаточный минеральный азот	0.7	1.0	0.3	0.4
Иммобилизованный азот	5.6	3.4	2.7	2.7
Газообразные потери азота	4.4	0.6	3.8	2.3
Минерализованный азот (М)	14.6	8.7	8.2	7.6
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	9.0	5.2	5.5	4.9
Реиммобилизованный азот (РИ)	4.9	2.5	2.4	2.3
P, %	4			
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.5			
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.4			
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.2			

склона (2–3°) и на 8, 13 и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования, проведенного в 3-х ротациях 5-польного зернотравяного севооборота (2000–2015 гг.), на склоне юго-восточный экспозиции эродированной дерново-подзолистой почвы определены параметры круговорота азота удобрения, почвенного и симбиотического азота. В приводораздельной части склона (2–3°) зерновые культуры и многолетние бобово-злаковые травы больше в 1.3–1.5 раза потребляли азот удобрения и почвенный азот, травы также лучше потребляли симбиотический азот по сравнению с нижней частью склона (5–7°). При выращивании многолетних бобово-злаковых трав (2-го и 3-го годов жизни) в почве закреплялось азота на 22% больше, чем после зерновых культур (30–41% и 18–38% от дозы соответственно). В почве приводораздельной части склона иммобилизовалось азота удобрения больше в 1.3 раза, почвенного и симбиотического азота – в 1.4 раза, чем в нижней части склона.

Таблица 6. Показатели интегральной оценки функционирования системы почва–растение при выращивании зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав

Часть склона	Способ внесения азотных удобрений	Зерновые культуры		Многолетние травы 2-го года жизни		Многолетние травы 3-го года жизни	
		1	2	1	2	1	2
Приводораздельная часть склона, 2–3°	N вразброс	28	2.6	37	1.7	38	1.6
	N локально	34	2.0	40	1.4	37	1.8
Нижняя часть склона, 5–7°	N вразброс	18	4.6	31	2.2	32	2.0
	N локально	27	2.6	34	1.9	32	2.0
P, %		4	4	3	4	3	4
HCP_{05} частные средние, г/м^2		5	0.4	4	0.3	4	0.4
HCP_{05} рельеф, г/м^2		4	0.3	2	0.2	2	0.3
HCP_{05} удобрения, г/м^2		4	0.3	2	0.2	2	0.3

Примечания. 1. Минерализованный азот – М, нетто-минерализованный азот – Н-М, реиммобилизованный азот – РИ. 2. В графе 1 – РИ : М, %; 2 – Н-М : РИ.

Таблица 7. Продуктивность зерновых культур при выращивании на различных элементах склона

Вариант	Зерно	Прибавка		Солома	Прибавка	
	г/м^2		%	г/м^2		%
Приводораздельная часть склона, 2–3°						
P50K50 (фон)	177	–	–	269	–	–
Фон + ^{15}N50 вразброс	301	123	69	483	198	67
Фон + ^{15}N50 локально	379	203	111	617	323	112
Нижняя часть склона, 5–7°						
P50K50 (фон)	130	–	–	198	–	–
Фон + ^{15}N50 вразброс	203	84	82	336	138	75
Фон + ^{15}N50 локально	259	138	127	423	226	128
P, %	2.4			3		
HCP_{05} частные средние, г/м^2	24			30		
HCP_{05} рельеф, г/м^2	14			21		
HCP_{05} удобрения, г/м^2	14			14		

Газообразные потери азота удобрения при выращивании зерновых культур на приводораздельной части склона, наоборот, снижались в 1.3–1.8 раза, азота почвы – в 1.4–1.5 раза, а при выращивании трав азота удобрения – в 1.3–3.0 раза и азота почвы – в 1.2 раза по сравнению с нижней частью склона. В верхней приводораздельной части склона при выращивании многолетних бобово-злаковых трав газообразные потери симбиотического азота сокращались в 1.4–3.5 раза по сравнению с нижней частью склона.

При локальном способе применения азотного удобрения в 1.3–1.4 раза возрастало потребление азота удобрения зерновыми культурами и в 1.5–1.6 раза – многолетними бобово-злаковыми травами по сравнению с разбросным способом его внесения. При этом было больше в 1.2 раза потребление почвенного азота зерновыми культурами и травами и в 1.3–1.6 раза – симбиотического азота многолетними травами.

При локализации удобрения N_a в 1.4–1.5 раза увеличивалась иммобилизация ^{15}N и N почвы под зерновыми культурами, а также в 1.1–1.3 раза – симбиотического азота под многолетними травами. Локальный способ применения N_a обеспечивал снижение газообразных потерь ^{15}N в 1.4–1.8 раза и в 1.9–2.1 раза азота почвы при выращивании зерновых культур, а также в 1.6–3.3 и в 2.1–6.3 раза при выращивании трав соответственно. При выращивании трав сокращались потери симбиотического азота в 1.6–7.2 раза, что повышало экологическую устойчивость агрофитоценоза на обоих элементах склона.

Локальное внесение N_a увеличивало на 26–28% массу зерна и на 19–26% биомассу многолетних трав по сравнению с разбросным способом. Содержание сырого белка в зерне зерновых культур возрастало на 0.3–1.1%, в сене трав 2-го года жизни – на 3.9–5.4%, в сене трав 3-го года жизни – на 3.4–3.5%.

Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами. Аг-

Таблица 8. Содержание сырого белка в зерне зерновых культур (средние в 3-х ротациях), % на сухое вещество

Вариант	Культуры		
	озимая рожь	овес	ячмень
Приводораздельная часть склона, 2–3°			
P50K50 (фон)	6.8	7.4	7.7
Фон + ^{15}N50 вразброс	7.4	9.2	8.4
Фон + ^{15}N50 локально	8.3	10.5	9.3
Нижняя часть склона, 5–7°			
P50K50 (фон)	5.8	6.9	6.3
Фон + ^{15}N50 вразброс	7.0	9.1	7.4
Фон + ^{15}N50 локально	7.6	9.8	8.1
P, %	46	4	3
HCP_{05} частные средние, г/м^2	0.9	1.2	0.9
HCP_{05} рельеф, г/м^2	0.7	0.8	0.6
HCP_{05} удобрения, г/м^2	0.5	0.7	0.5

Таблица 9. Продуктивность и качество биомассы многолетних бобово-злаковых трав

Вариант	Биомасса сена, г/м^2	Прибавка				Сырой белок, %
		к фону		от локализации		
		1	2	1	2	
Травы 2-го года жизни						
Приводораздельная часть склона, 2–3°						
P30K30 (фон)	493	–	–	–	–	17.8
Фон + ^{15}N30 вразброс	620	120	26	–	–	20.8
Фон + ^{15}N30 локально	726	232	51	112	19	26.2
Нижняя часть склона, 5–7°						
P30K30 (фон)	356	–	–	–	–	16.6
Фон + ^{15}N30 вразброс	444	75	25	–	–	19.4
Фон + ^{15}N30 локально	531	175	55	87	20	23.3
P, %	3					4
HCP_{05} частные средние, г/м^2	42					3.2
HCP_{05} рельеф, г/м^2	24					2.2

рофитоценоз злаковых культур находился в зоне резистентности (на более низком уровне устойчивости). Более высокая устойчивость агрофитоценоза трав достигалась за счет дополнительного (лучшего) использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь. При этом бобово-злаковые травы 3-го года жизни уступали травам 2-го года жизни на всех элементах склона при обоих способах применения азотного удобрения.

При разбросном способе внесения ^{15}N мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части склона (2–3°) и на 8, 13 и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.Л.* Почвенный покров России в условиях глобальных вызовов // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 11. С. 984–992.
2. *Завалин А.А., Соколов О.А.* Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
3. *Кудеяров В.Н.* Оценка питательной деградации пахотных почв России // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 9. С. 771–775.
4. *Кореньков Д.А.* Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
5. *Кореньков Д.А., Борисова Н.И., Васенева Л.В., Семенов Ю.И.* Превращения изотопно-меченого иммобилизованного азота удобрений в системе почва–растение в полевых условиях за 14 лет // Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 32–34.
6. *Smith C.J., Chalk P.M.* The residual value of fertiliser N in crop sequences: An appraisal of 60 years of research using ^{15}N tracer// Field Crops Res. 2018. V. 217. P. 66–74.
7. *Помазкина Л.В.* Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Усп. совр. биол. 2004. Т. 124. № 1. С. 66–76.
8. *Турчин Ф.В.* Использование азотных удобрений урожаем и его превращение в почве // Журн. ВХО. 1965. Т. 10. № 4. С. 400–401.
9. *Fried M., Dean J.* Concerning the measurement of available soil nutrients // Soil Sci. 1952. V. 73. № 4. P. 263–271.
10. *Трепачев Е.П.* Агроэкологические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 531 с.
11. *Jnselsbacher E., Wanek. W., Strauss J.* A novel ^{15}N tracer model reveals: Plant nitrate governs nitrogen transformation rates in agricultural soils // Soil Biol. Biochem. 2013. V. 57. P. 301–310.
12. *Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я.* Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур // Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе. М.: ВНИИА, 2012. Т. 2. 272 с.

13. *Kleinebecker T., Holzel N., Prati D.* Evedence from the real world: ^{15}N natural abundances reveal enhanced nitrogen use at high plant diversity in Central European grassland // J. Ecol. 2014. V. 102. P. 456–465.
14. *Kriszan M., Amelung W., Schellberg J.* Longterm changes of delta ^{15}N natural abundance of plants and soil in a temperate grassland // Plant and Soil. 2009. V. 325. P. 157–169.
15. *Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Завалин А.А., Черников В.А.* Роль симбиотического азота и устойчивость его циклов при выращивании многолетних трав на склоне // Плодородие. 2016. № 1. С. 50–52.
16. *Pardo L.H., Templer P.H., Goodale C.L.* Regional assessment of N saturation using foliar and root $\delta^{15}N$ // Biogeochemistry. 2006. V. 80. P. 143–171.
17. *Rascher K.G., Hellman C., Maguas C.* Community scale ^{15}N-isoscapes: tracing the spatial impact of an exotic N_2 – fixing invader // Ecol. Let. 2012. V. 15. P. 484–491.

Flows of ^{15}N, Soil and Symbiotic Nitrogen in Sod-Podzolic Eroded Soil

A. A. Zavalin[a,#], N. Ya. Shmyreva[a], and O. A. Sokolov[a]

[a] *D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

[#] *E-mail: zavalin.52@mail.ru*

In microfield experiment using labeled ^{15}N nitrogen fertilizer on an eroded sod-podzolic medium loamy soil for 15 years when growing crops and perennial leguminous grasses of the 2nd and 3rd years of life, nitrogen fluxes were studied in the fertilizer system–soil–plants. Cultivated crops consumed 1.3–1.5 times more nitrogen of fertilizer (^{15}N), soil and symbiotic nitrogen on the drive-divide part of the slope compared to its lower part. In the soil of the drive-divide part of the slope, 1.3–1.4 times more is immobilized and 15–3.0 times less ^{15}N is lost than in the lower part of the slope. With the local method of applying nitrogen fertilizer, crop rotation crops consumed 1.3–1.6 times more than ^{15}N, 1.2 times soil nitrogen and 1.3–1.6 times symbiotic nitrogen compared to the spread method. With the localization of nitrogen fertilizer, the immobilization of nitrogen fertilizer and symbiotic and soil mineralization under crop rotation crops increased 1.1–1.5 times on all elements of the slope. Gaseous nitrogen losses, on the contrary, decreased 1.4–7.2 times. When nitrogen fertilizer is applied locally, grain biomass increases by 26–28%, grass hay by 19–26%, crude protein content increases by 0.3–1.1% in grain by 3.4–5.4% in perennial grass hay. Agrophytocenosis of perennial leguminous-grasses functioned in a more stable state compared with cereals, this is achieved due to the additional use of biological nitrogen, its greater immobilization and less nitrogen loss. With the spread method of application, ^{15}N migrated down the slope from the site of application to a distance of 5 m in the first year, 9 m in the third year, and 55 m after 15 years on the drive-divide part of the slope (2–3°) and 8 m, 13 m and 72 m, respectively, in the lower part of the slope (5–7°).

Key words: nitrogen fertilizer, ^{15}N isotope, nitrogen fluxes, immobilization, mineralization, agrocenosis stability, eroded soil.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 33–40

УДК 631.416.13:631.445.51:631.8(571.54)

НИТРАТНЫЙ РЕЖИМ КАШТАНОВЫХ ПОЧВ БУРЯТИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2020 г. А. С. Билтуев[1,*], Л. В. Будажапов[1], А. К. Уланов[1]

[1]Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 670045 Улан-Удэ, ул. Третьякова, 25з, Россия

**E-mail: global@burniish.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.
После доработки 12.02.2020 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Представлены результаты исследования нитратного режима каштановых почв под культурами зернопарового севооборота в зависимости от применения различных систем удобрения в вегетационно-полевом и стационарном полевом опытах. Установлены уровни содержания нитратов при посеве, динамика их изменения в течение вегетации зерновых культур и распределение в профиле почвы. Определено влияние факторов тепло- и влагообеспеченности на содержание нитратного азота в период посева культур.

Ключевые слова: каштановая почва, зерновые культуры, удобрения, содержание нитратов.

DOI: 10.31857/S0002188120060046

ВВЕДЕНИЕ

Содержание азота и его доступных форм является важнейшим показателем плодородия почв. Криоаридные условия функционирования сухих степей Забайкалья формируют почвы с укороченным профилем и низким содержанием гумуса. В соответствии с этим, в пахотном горизонте каштановых почв содержится незначительное количество общего и минерального азота. Недостаток наиболее подвижной формы – нитратного азота – является основным агрохимическим фактором, лимитирующим продуктивность полевых культур в сухостепной зоне Бурятии. Между тем, применение минеральных и органических удобрений в аридных условиях не гарантирует высокой обеспеченности растений азотным питанием [1–3].

В каштановых почвах доминируют актиномицеты при очень низком содержании грибов и бактерий, что свидетельствует о ксерофитном характере микробоценоза [4–6]. В оптимальных условиях увлажнения и температур проявляется высокая энергия аммонификационных и нитрификационных процессов [6, 7]. Однако в полевых условиях, при неблагоприятном увлажнении их интенсивность значительно сокращается в соответствии с численностью микроорганизмов. Например, в условиях типичной засухи численность аммонификаторов снижается от десятков миллионов до тысяч, а нитрификаторов – от сотен до следов в 1 г почвы [6]. Подобное обусловлено тем, что аммонификаторы в большей степени адаптированы к жесткому гидротермическому режиму сухой степи. Вследствие низкого содержания органического вещества и короткого периода микробиологической активности в каштановых почвах Бурятии накапливается малое количество нитратного азота. Основным агротехническим приемом повышения плодородия почв является применение минеральных и органических удобрений. В краткосрочных полевых опытах [8] при определении эффективных форм азотных удобрений и способов их внесения установлено, что наибольшей нитрификации подвергаются водный аммиак, мочевина и более медленно – сульфат аммония, а азот удобрений, внесенный под зяблевую вспашку, сохраняется до весны без существенных потерь. В многолетнем агрохимическом опыте [9] определены темпы накопления нитратного азота в паровом поле, динамика его содержания под культурами севооборота. Доказано, что запасы нитратов осенью в почве находятся в обратной зависимости от урожайности культур; установлено увеличение содержания нитратного азота при внесении удобрений как в верхних (0–40 см), так и в нижних (60–100 см) слоях почвенного профиля, свидетельствующее о нисходя-

щей миграции при выпадении обильных осадков; выявлена тесная связь прибавки урожаев при внесении азотных удобрений с количеством нитратов в верхних горизонтах почвы. Между тем, научные исследования нитратного режима каштановых почв, проведенные в полевых опытах, представлены в незначительном количестве, и в целом они основаны на материалах 1960–1990 гг. прошлого века. В современных условиях, при усилении аридизации климата сухих степей подвергается изменениям весь блок климатических, почвенных и биологических условий функционирования агроценозов, где проявляются иные аспекты нитратного режима каштановых почв. Характеристика нитратного пула каштановых почв и определение закономерностей его изменения при внесении удобрений является целевой установкой наших исследований. Многолетние данные позволяют не только статистически обобщить показатели нитратного режима, но и оценить влияние различных факторов на его динамику.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение нитратного режима каштановой почвы проводили в вегетационно-полевом (2000–2002 гг.) и длительном полевом агрохимическом (1996–2019 гг.) опытах БурНИИСХ, заложенных в богарных условиях в центральной сухостепной зоне Бурятии. В вегетационно-полевом опыте изучали динамику содержания нитратов под культурами севооборота пар–пшеница–ячмень–овес в вариантах контроль и N60P40K40. Удобрения вносили в сосуды без дна, площадью 0.09 м^2 в слой 0–20 см почвы перед посевом культур, повторность в опыте восьмикратная [10]. В длительном стационарном опыте под культурами зернопарового севооборота (пар–яровая пшеница–овес–овес на зеленую массу) – в контрольном (без удобрений) и в вариантах с внесением полного минерального (N40P40K40) и органического (навоз 40 т/га) удобрений определяли влияние факторов среды на накопление стартовых запасов нитратного азота ко времени посева в различных слоях почвы. Органические удобрения вносили в паровое поле, минеральные ($N_{аа}$, $P_{сд}$, K_x) – под культуры севооборота. Агротехнологические операции по возделыванию культур выполняли в соответствии с рекомендованной зональной системой земледелия. Посев первой культуры – пшеницы после пара проводили в 1-й декаде мая, овса после пшеницы – во 2-й декаде мая, овса на зеленую массу – во 2-й декаде июня. Повторность в опыте четырехкратная, размещение вариантов – систематическое, учетная площадь делянок – 100 м^2. В опытах высевали районированные сорта: пшеницы – Селенга, овса – Гэсэр, ячменя – Наран.

Для изучения особенностей морфологического строения почвы на территории опытного участка был заложен почвенный разрез с координатами N 51°43′45.20″; E 107°14′51.75″. Изученная почва отнесена к стволу постлитогенных почв, отделу светлогумусовых аккумулятивно-карбонатных, типу каштановые. Она характеризуется наличием светлогумусового горизонта AJ, мощностью 24 см, ниже которого залегает ксерометаморфический горизонт BMK (24–40 см). На глубине 40–70 см залегает текстурно-карбонатный горизонт CAT, бурно вскипающий от соляной кислоты. Ниже размещается супесчаная с прослойками мелкого щебня почвообразующая порода C_{Ca}. Ведущими почвенными процессами при формировании почвы является аккумуляция и трансформация светлогумусовых соединений и педогенная мобилизация карбонатов [11]. Пахотный горизонт – супесчаный бесструктурный либо слабоструктурен, с малым диапазоном активной влаги, обладает высокой водопроницаемостью и слабой водоудерживающей способностью. Почвенный профиль практически однообразен по гранулометрическому составу и представлен супесями с преобладанием крупно-, средне- и мелкопесчаных фракций. Агрофизические свойства почвы неблагоприятные (табл. 1). Почвы значительно уплотнены, плотность сложения и твердой фазы почвы увеличивалась с глубиной.

Почва – старопахотная, агрохимический опыт на данном участке был заложен в 1967 г. и продолжается в настоящее время. В результате длительного применения удобрений изменился и агрохимический статус почвы (табл. 2). Пахотный слой характеризуется реакцией среды, близкой к нейтральной, низким содержанием гумуса и общего азота. Содержание подвижного фосфора изменялось в вариантах опыта от высокого в контроле до очень высокого в удобренных вариантах; калия – от среднего в контроле, до повышенного при применении N40P40K40 и высокого в варианте применения органических удобрений.

Метеорологические условия периода исследований соответствовали тренду аридизации территории [12]. Характеристика засушливости идентифицировалась по классификации, описанной в работе [13], в качестве определяющего климат показателя выбран ГТК (по Селянинову) за май–август. За исследованный период с 1996 по 2019 г. 9 лет отмечали сильные засухи с ГТК = 0.3–0.6,

Таблица 1. Физические и водно-физические свойства каштановой почвы опытного участка

Слой, см	Плотность сложения	Плотность твердой фазы	МГ	ВУЗ	НВ	Порозность общая, % от объема
	г/см^3		% от абсолютно сухой почвы			
0–10	1.43	2.65	2.03	3.1	11.3	46
20–30	1.50	2.68	2.11	4.0	10.8	44
50–60	1.67	2.71	2.17	3.5	12.1	38
90–100	1.71	2.71	2.00	3.4	9.0	36

Примечание. МГ – максимальная гигроскопичность, ВУЗ – влажность устойчивого завядания, НВ – наименьшая влагоемкость.

Таблица 2. Показатели плодородия пахотного слоя почвы в различных вариантах применения удобрений

Вариант	pH_{H_2O}	Гумус, %	Общий азот, мг/кг	$P_2O_{5подв}$	$K_2O_{обм}$
				мг/кг (по Чирикову)	
Контроль	6.9	0.87	720	140–171	66–78
N40P40K40	6.7	1.05	810	233–269	85–93
Навоз 40 т/га	6.9	1.71	1050	243–295	161–188

Таблица 3. Продуктивная влага под культурами зернопарового севооборота перед посевом

Культура	Слой почвы, см	Содержание продуктивной влаги, мм				
		$M \pm m$	σ	lim	$M \pm t_{0.05}m$	V, %
Пшеница	0–20	13.8 ± 1.9	6.3	6.0–27.0	9.6–18.0	45.0
	0–50	51.2 ± 7.1	23.4	11.2–90.0	35.7–66.7	45.7
Овес	0–20	10.1 ± 2.3	7.8	2.0–26.0	4.9–15.3	76.9
	0–50	27.2 ± 4.7	15.7	9.0–57.0	16.8–37.7	57.9
Овес на зеленую массу	0–20	9.2 ± 2.3	7.8	1.0–20.0	4.0–14.4	84.5
	0–50	30.5 ± 5.4	17.8	6.0–62.0	18.7–42.3	58.2

5 лет – умеренные засухи с ГТК = 0.6–0.8 (1996, 2000, 2002, 2005, 2009 гг.), 3 года – слабые засухи с ГТК = 0.8–1.0 и 7 лет – обеспеченного увлажнения с ГТК = 1.0–1.3. В среднем, по нашим многолетним данным, в условиях сухой степи Бурятии относительно благоприятные условия для накопления нитратов в почве наблюдались в короткий период со второй декады июля по вторую декаду августа (рис. 1).

Влажность почвы зависела не только от метеорологических факторов, но и размещения культур в зернопаровом севообороте. По мере удаления от парового поля снижалось содержание продуктивной влаги в почве (табл. 3). Отметим, что

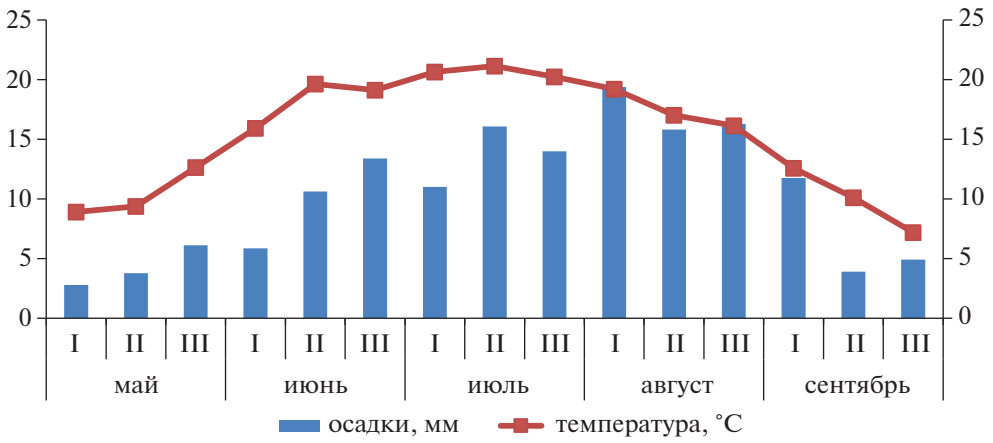

Рис. 1. Метеорологические условия в период проведения исследования (по данным Иволгинской АМС).

Таблица 4. Изменение содержания $N\text{-}NO_3$ в слое 0–20 см почвы под зерновыми культурами в течение вегетационного сезона (2000–2002 гг.)

Вариант (фактор *A*)	Год	$N\text{-}NO_3$, мг/кг (фактор *B*)			$M \pm m$
		весна	лето	осень	
	2000	3.3 ± 0.6	0.3 ± 0.1	2.53 ± 0.44	2.0 ± 0.2
	2001	2.9 ± 0.4	0.3 ± 0.2	0.21 ± 0.09	1.2 ± 0.1
	2002	1.7 ± 0.4	0.4 ± 0.1	0.08 ± 0.03	0.7 ± 0.1
	$M \pm m$	2.6 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.90 ± 0.30	1.3 ± 0.2
N60P40K40	2000	4.7 ± 0.5	1.1 ± 0.3	2.36 ± 0.58	2.7 ± 0.3
	2001	4.7 ± 0.3	0.3 ± 0.1	1.47 ± 0.27	2.2 ± 0.1
	2002	4.0 ± 0.3	1.3 ± 0.4	2.41 ± 0.49	2.6 ± 0.2
	$M \pm m$	4.4 ± 0.2	0.9 ± 0.2	2.1 ± 0.3	3.1 ± 0.2
$НСР_{05}$ (*A*)					0.4
$НСР_{05}$ (*B*)					0.5
$НСР_{05}$ (*AB*)					0.7

под первой культурой – пшеницей после пара содержание продуктивной влаги относительно других полей было не только больше, но и более стабильным.

Отбор почвенных образцов для определения содержания нитратов производили в длительном стационарном опыте перед посевом культур, в вегетационно-полевом опыте – в 3 срока: весной при посеве в 1-й декаде мая, летом в 3-й декаде июля, осенью в 3-й декаде сентября.

Агрофизические свойства почв определяли общепринятыми методами [14]. Агрохимические показатели определяли следующими методами: pH_{H_2O} – потенциометрическим, гумус – по Тюрину, общий азот – по Кьельдалю, нитратный азот – потенциометрическим, подвижные формы фосфора и калия – по Чирикову [15]. Результаты обрабатывали математико-статистическими методами по [16]. Тренды динамики показателей построены на основе метода наименьших квадратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На территории Сибири в агрохимических опытах с полевыми культурами определено преимущественное потребление растениями нитратного азота. При наличии значительного количества обменного аммония в почвах растения ощущали дефицит азотного питания, и применение азотных удобрений обеспечивало значимую прибавку урожая [17–21]. Характеристика нитратного пула каштановых почв и закономерности его изменения представлены через описание различных показателей: динамики изменения его содержания в период весна–лето–осень, содержания нитратов перед посевом в зависимости от систематического внесения удобрений и распределения $N\text{-}NO_3$ в профиле почв.

Динамика изменения содержания нитратов под зерновыми культурами в течение вегетационного периода представлена по результатам вегетационно-полевого опыта (табл. 4). Содержание нитратного азота перед посевом в засушливых условиях 2000–2002 гг. оказалось очень низким не только в контроле (lim = 1.7–3.3 мг/кг), но и при внесении N60 в составе полного минерального удобрения (lim = 4.1–4.8 мг/кг). Динамика $N\text{-}NO_3$ в слое 0–20 см слое обусловлена преобладанием иммобилизации над нитрификацией. В связи с этим обеспечение азотным питанием растущих растений привело к снижению содержания нитратов практически до следов в летний период. К моменту достижения зерновыми культурами восковой спелости резко сокращались объемы азотного питания. В условиях сухой степи Бурятии это, как правило, происходило в 3-й декаде августа. В зависимости от сочетания метеорологических условий варьировала и нитрификационная активность почвы. При относительно влажной и теплой погоде (2000 г.) содержание нитратов существенно возрастало к моменту уборки, в более засушливых условиях отмечали либо стабилизацию на уровне середины лета, либо дальнейшее снижение их содержания (2001–2002 гг.). С момента уборки до весны следующего года содержание нитратов существенно не менялось. Запасы нитратов в целом за период наблюдений были в несколько раз меньше, чем содержание обменного аммония. Подобное было обусловлено преимущественным потреблением

Таблица 5. Влияние систематического внесения удобрений на содержание нитратного азота под культурами при посеве (средние за 2009–2019 гг.)

Вариант (фактор *A*)	Слой, см	Содержание $N\text{-}NO_3^-$ под культурами, мг/кг (фактор *B*)					
		пшеница		овес		овес на з/м	
		$M \pm m$	V, %	$M \pm m$	V, %	$M \pm m$	V, %
Контроль	0–20	3.5 ± 0.2	29.3	2.5 ± 0.4	49.5	3.2 ± 0.5	52.4
	0–40	6.7 ± 0.5	30.3	4.8 ± 0.7	49.7	6.1 ± 1.2	66.9
N40P40K40	0–20	4.3 ± 0.4	27.5	3.3 ± 0.6	57.0	3.5 ± 0.5	46.8
	0–40	8.3 ± 0.5	21.7	7.0 ± 1.1	50.2	6.9 ± 0.8	41.4
Навоз 40 т/га	0–20	4.7 ± 0.3	20.9	3.5 ± 0.5	47.6	4.2 ± 0.3	27.2
	0–40	9.1 ± 0.6	20.4	7.1 ± 1.0	45.6	7.8 ± 0.6	25.1
HCP_{05} (*A*)	0–20	0.8					
	0–40	1.6					
HCP_{05} (*B*)	0–20	0.8					
	0–40	1.6					
HCP_{05} (*AB*)	0–20	1.4					
	0–40	2.8					

нитратной формы азота и очень низкой нитрификационной активностью почв в засушливый период, в целом сопутствующий исследованиям.

Стартовое содержание $N\text{-}NO_3$ в почве при посеве является диагностическим признаком обеспеченности растений азотным питанием [22–27]. Вид удобрения, удаленность культур во времени от парового поля оказали существенное влияние на содержание нитратного азота в пахотном и подпахотном слоях почвы. В зернопаровом севообороте пар–пшеница–овес–овес на зеленую массу определили влияние систематического применения удобрений и климатических условий на накопление нитратов перед посевом культур (табл. 5).

Содержание нитратов в почве под пшеницей после парового предшественника в контрольном варианте в целом за 11 лет наблюдений варьировало в пределах 1.8–5.4 мг/кг в слое 0–20 см и 2.0–11.5 мг/кг в слое 0–40 см. Столь низкое содержание нитратов под пшеницей за весь период наблюдений было обусловлено тем, что паровое поле не обеспечивало благоприятных условий для нитрификационных процессов, в первую очередь из-за недостаточного почвенного увлажнения. Например, из 11-ти лет в 8-ми отмечали сильную засуху, причем в последние 5 лет – ежегодную. Внесение полных минеральных и органических удобрений позволило повысить содержание $N\text{-}NO_3$ соответственно на 23–24% в слое 0–20 см и на 24–36% – в слое 0–40 см. Влияние факторов среды на накопление нитратов под пшеницей было различным в вариантах опыта. В контроле величина коэффициента корреляции возрастала в ряду: продуктивная влага в слое 0–40 см ($r = 0.09 \pm 0.33$), температура воздуха ($r = 0.23 \pm 0.32$), осадки в декаду посева ($r = 0.57 \pm 0.27$). При внесении минеральных удобрений показатели влияния факторов среды были практически равными: продуктивная влага в слое 0–40 см ($r = 0.37 \pm 0.31$), температура воздуха ($r = 0.23 \pm 0.32$), осадки в декаду посева ($r = 0.40 \pm 0.31$). Более значимые связи отмечены в варианте с внесением органических удобрений: зависимость от продуктивной влаги и осадков повысилась соответственно до $r = 0.66 \pm 0.25$ и $r = 0.59 \pm 0.27$. Наличие существенных связей содержания нитратов в варианте применения органических удобрений с влажностью почвы и осадками доказало усиление нитрификации при увеличении массы органических остатков.

Вторая культура – овес после пшеницы – находилась в менее благоприятных условиях увлажнения, чем пшеница, в силу удаления во времени от парового поля. Вследствие этого содержание нитратов было достоверно меньше и в среднем в контроле составило 2.5 мг/кг при размахе от 0.8 до 4.2 мг/кг в пахотном слое, в подпахотном слое показатели были схожими. Ежегодное внесение N40 в составе полного минерального удобрения привело к увеличению содержания нитратов в слое 20–40 см почвы, вследствие этого в целом в слое 0–40 см отмечено существенное повышение содержания $N\text{-}NO_3$ (на 45%). Более значимый

Таблица 6. Распределение $N\text{-}NO_3$ в профиле почвы в контрольном варианте перед посевом (средние за 1996–2012 гг.)

Культура (фактор *А*)	Слой, см (фактор *Б*)	Статистические показатели $N\text{-}NO_3$, мг/кг				
		$M \pm m$	σ	lim	$M \pm t_{0.05}m$	*V*, %
Пшеница	0–20	5.9 ± 0.8	3.4	1.8–14.7	4.1–7.6	57.9
	20–40	4.6 ± 0.7	3.0	1.5–13.4	3.1–6.1	64.3
	40–60	3.3 ± 0.6	2.5	0.7–10.6	2.1–4.6	75.3
	60–80	3.2 ± 0.6	2.5	1.0–10.0	2.0–4.5	77.9
	80–100	3.0 ± 0.6	2.5	1.0–10.5	1.7–4.2	83.1
Овес	0–20	2.5 ± 0.4	1.7	1.3–7.5	1.6–3.4	69.1
	20–40	2.5 ± 0.4	1.8	1.1–7.0	1.5–3.4	74.1
	40–60	2.0 ± 0.3	1.3	0.6–5.8	1.3–2.7	66.5
	60–80	1.9 ± 0.4	1.6	0.5–6.3	1.1–2.7	82.5
	80–100	2.2 ± 0.6	2.3	0.6–9.5	1.0–3.4	104
Овес на зеленую массу	0–20	2.5 ± 0.4	1.7	0.9–6.5	1.6–3.3	66.3
	20–40	3.1 ± 0.6	2.7	0.9–10.0	1.7–4.4	86.8
	40–60	2.8 ± 0.4	1.7	0.9–6.7	1.9–3.7	60.3
	60–80	3.1 ± 0.6	2.4	0.9–8.6	1.8–4.3	78.3
	80–100	2.3 ± 0.4	1.6	0.9–6.5	1.5–3.1	68.7
HCP_{05} (*А*)		0.71				
HCP_{05} (*Б*)		0.91				
HCP_{05} (*АБ*)		1.58				

эффект оказало последействие навоза 40 т/га, достоверное увеличение содержания $N\text{-}NO_3$ отмечено как в слое 0–20 см, так и в слое 0–40 см. Влияние условий тепло- и влагообеспеченности на содержание нитратов, вне зависимости от вариантов внесения удобрений, возрастали в ряду: сумма осадков в (1-я–2-я декада мая) → средняя температура воздуха (1-я–2-я декада мая) → содержание продуктивной влаги в слое 0–40 см. Внесение удобрений снижало зависимость запасов $N\text{-}NO_3$ от температуры воздуха и осадков: если в контроле данные показатели составляли соответственно $r = 0.48 \pm 0.29$ и $r = 0.38 \pm 0.30$, то действие N40P40K40 и последействие навоза 40 т снижали их до $r = 0.25$–0.11 и $r = 0.17$–0.12. В отличие от первой культуры, количество продуктивной влаги оказало большее влияние на содержание нитратов: $r = 0.45 \pm 0.29$ в контроле и $r = 0.74 \pm 0.22$ в варианте с минеральным удобрением.

Третья культура севооборота – овес на зеленую массу – возделывали как однолетнюю траву и высевали в более поздние сроки – во 2-й декаде июня. По запасам продуктивной влаги 3-я культура была наименее обеспечена в сравнении с другими. Основная мотивация срока посева – использование региональных особенностей климата для подведения наиболее критического периода развития овса от кущения до выхода в трубку под максимум летних осадков в середине лета и использование осадков второй половины лета для прироста вегетативной массы. Для предотвращения иссушения почвы основную и предпосевную обработки почвы проводили без отрыва от посева. Более длительный период нахождения необработанной почвы в состоянии биологической активности позволил накопить большее количество нитратов в почве относительно 2-й культуры, что приближалось по запасам к первой пшенице после пара. Основным фактором, влияющим на накопление нитратов, было количество осадков, выпавшее с мая по 2-ю декаду июля, влияние температур воздуха и продуктивной влаги было низким. Подобное связано с тем, что 2 этих фактора менее вариабельны, чем осадки. Зависимость содержания $N\text{-}NO_3$ от осадков составила в контроле $r = 0.62 \pm 0.26$, снижаясь в удобренных вариантах до $r = 0.46 \pm 0.29$ и $r = 0.34 \pm 0.31$ соответственно в органическом и минеральном вариантах.

На режим нитратного азота в слое 0–40 см влияет не только азотминерализующий потенциал, но и миграционные потоки легкорастворимых солей в почвенном профиле. Распределение нит-

ратов по горизонтам обусловлено их морфологическими свойствами и характером перемещения влаги. Почвы подвержены периодическому сквозному промачиванию при длительных обильных осадках, между тем восходящего потока легкорастворимых солей из-за щебнистости и опесчаненности грунта не происходит [28, 29]. Изучение дифференциальной порозности показало, что ≈70% всех пор составляли крупные, диаметром от 3 мкм до 2 мм, что создавало благоприятные условия для аэрации, диффузного движения водяных паров [30]. В условиях сильной засухи, происходящей с 70%-ной вероятностью, активный влагооборот осадков происходил, в основном, в слое 0–20 см почвы. В годы с достаточным увлажнением изменялся и водный режим почв. При интенсивных осадках, обычно выпадающих во второй половине лета, влага способна сбрасываться до почвообразующих пород [30].

Изучение распределения нитратного азота в слое 0–100 см почвы проводили в отделе агрохимии БурятНИИСХ в 1996–2012 гг. в стационарном полевом опыте. Метеорологические условия этого периода были относительно благоприятными, из 17 лет исследования в 10-ти отмечена засуха различной интенсивности, а 7 лет были благоприятными по увлажнению. Дано статистическое обобщение выборки данных по содержанию нитратного азота в 1-метровом слое почвы в контрольном варианте под культурами зернопарового севооборота (табл. 6).

При посеве пшеницы содержание нитратного азота было максимальным в слое 0–20 см, достоверно снижалось до глубины 40–60 см и стабилизировалось на уровне 3.0 мг/кг. Под 2-й культурой (овес после пшеницы) характер снижения был не столь выражен, во всей почвенной толще содержалось приблизительно одно количество нитратов в пределах 1.9–2.5 мг/кг. Аналогичный характер распределения отмечен и под 3-й культурой (овес на зеленую массу), но при более высоких показателях (2.5–3.1 мг/кг). Разница содержания $N\text{-}NO_3$ от поверхности до глубины 90–100 см под первой культурой составила 2.9 мг/кг, под второй и третьей – 0.3 и 0.2 мг/кг. Изменение содержания нитратного азота, описываемого экспоненциальным трендом, позволило определить константу скорости его снижения с глубиной под различными культурами. Соответственно с этим распределением изменялись и константы скорости снижения содержания нитратов на каждые 10 см глубины; под пшеницей ($k = 0.172$), овсом ($k = 0.053$) и овсом на зеленую массу ($k = 0.017$). Характер распределения нитратов свидетельствовал о их миграции вниз по профилю, что было обусловлено не только легким гранулометрическим составом почв, но и периодически их промывным водным режимом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, содержание нитратного азота в каштановой почве при посеве культур 4-польного зернопарового севооборота было очень низким, как в пахотном, так и подпахотном слоях и различалось в зависимости от культур севооборота и систем удобрения. Более высокое содержание нитратного азота отмечено при посеве пшеницы после пара и овса на зеленую массу, а минимальное – под второй культурой – овсом после пшеницы. Внесение удобрений существенно повышало нитратный пул почвы, при этом действие и последействия навоза 40 т/га было более ощутимо, чем полного минерального удобрения N40P40K40.

Метеорологические условия оказывали существенное влияние на накопление нитратов, для первой культуры севооборота были более значимы осадки в декаду посева, для второй культуры – продуктивная влага, для третьей – сумма осадков за май и первую половину июля. Влияние температур воздуха было менее значимо, чем условия увлажнения.

Динамика изменения содержания нитратного азота под вегетирующими растениями характеризовалась снижением от низкого содержания весной до следов к лету и незначительным возрастанием с конца августа до окончания периода биологической активности почв. В 1-метровом профиле в варианте без удобрений отмечено относительно равномерное распределение нитратов в почвенной толще.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гамзиков Г.П., Лапухин Т.П., Уланов А.К.* Эффективность систем удобрения в полевых севооборотах на каштановых почвах Забайкалья // Агрохимия. 2005. № 9. С. 24–30.
2. *Будажапов Л.З.* Биокинетический цикл азота в системе почва–удобрение–растение в условиях Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 39 с.
3. *Билтуев А.С., Лапухин Т.П., Будажапов Л.В.* Климат, плодородие почв и продуктивность зерновых культур в аридных условиях Забайкалья: состояние и прогноз. Улан-Удэ: БурятГСХА, 2015. 141 с.
4. *Абашеева Н.Е., Ракшаина М.Ц.* Об азотном режиме некоторых типов почв Селенгинского среднегорья Бурятской АССР // Физические и химические свойства почв БурАССР. Улан-Удэ, 1966. С. 79–85.

5. *Чимитдоржиева Г.Д., Меркушева М.Г., Абашеева Н.Е.* Аминокислотный состав растительности и почв Забайкалья // Агрохимия. 1989. № 1. С. 87–92.
6. *Нимаева С.Ш.* Микробиология криоридных почв. Новосибирск: Наука, 1992. 175 с.
7. *Борисова Т.*С., *Чимитдоржиева Г.Д.* Трансформация органических веществ в дефлированной каштановой почве при компостировании // Агрохимия. 2000. № 8. С. 25–30.
8. *Ревенский В.А.* Эффективность азотных удобрений на каштановых почвах Бурятии. Новосибирск: Наука, 1985. 149 с.
9. *Лапухин Т.П.* Система применения удобрений в полевых севооборотах на каштановых почвах сухой степи Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул, 2000. 40 с.
10. *Карпинский Н.П., Францессон В.А.* О разработке вопросов диагностики применения удобрений с учетом результатов почвенно-агрохимических исследований // Методические указания по Геосети опытов с удобрениями. М., 1961. 20 с.
11. *Балданов Б.Ц.* Разнообразие почв бассейна реки Иволга, их морфогенетические характеристики и рациональное использование: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2013. 23 с.
12. *Обязов В.А.* Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Казань, 2014. 38 с.
13. *Уланова Е.С.* Засухи в СССР и их влияние на производство зерна // Метеорол. и гидрология. 1988. № 7. С. 127–134.
14. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
15. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
16. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
17. *Кочергин А.Е., Остроумова О.А.* Динамика аммиачного и нитратного азота в прииртышском черноземе под посевами яровой пшеницы // Почвоведение. 1957. № 8. С. 86–92.
18. *Кочергин А.Е., Гамзиков Г.П.* Эффективность азотных удобрений в черноземной зоне Западной Сибири //Агрохимия. 1972. № 6. С. 3–11.
19. *Гамзиков Г.П.* Особенности действия азотных удобрений по почвенно-климатическим зонам Западной Сибири // Научн. тр. СибНИИСХ. 1971. № 2(17). С. 61–67.
20. *Гамзиков Г.П.* Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 266 с.
21. *Ермохин Ю.И.* Диагностика питания растений. Омск: ОмскГАУ, 1995. 208 с.
22. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Западной Сибири. М., 1968. С. 316–336.
23. *Мальцев В.Т.* Установление оптимальных доз азотных удобрений под зерновые культуры в условиях Иркутской области // Агрохимия. 1995. № 12. С. 62–70.
24. *Кудеяров В.Н., Рынск И.Н.* Диагностика азотного питания яровой пшеницы в условиях Иркутской области // Агрохимия. 1967. № 4. С. 13–20.
25. *Гамзиков Г.П.* К вопросу о географии действия азотных удобрений в Западной Сибири // Агрохимия. 1975. № 10. С. 3–9.
26. *Гамзиков Г.П., Кочергин А.Е., Крупкин П.И.* Рекомендации по диагностике азотного питания полевых культур и применению азотных удобрений. Новосибирск, 1983. 30 с.
27. *Мальцев В.Т.* Азотные удобрения в Приангарье. Новосибирск: РАСХН, СО, 2001. 272 с.
28. *Бохиев В.Б.* Теоретические основы и практические приемы почвозащитного земледелия в сухостепной зоне Бассейна озера Байкал: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Омск, 1993. 47 с.
29. *Куликов А.И., Дугаров В.И., Корсунов В.М.* Мерзлотные почвы, экология, теплоэнергетика и прогноз продуктивности. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1997. 312 с.
30. *Билтуев А.С., Будажапов Л.В., Уланов А.К., Хутакова С.В.* Агрофизические свойства и динамика влажности каштановой почвы в условиях засухи в сухостепной зоне Бурятии // Вестн. НГАУ. 2017. № 1. С. 77–83.

Nitrate Regime of Chestnut Soil of Buryatia when Applying Fertilizers

A. S. Biltuev[a,#], L. V. Budazhapov[a], and A. K. Ulanov[a]

[a] *Buryat Agricultural Research Institute Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation ul. Tretyakova 25"z", Ulan-Ude 670045, Republic of Buryatia, Russia*

[#] *E-mail: global@burniish.ru*

The results of studies of the nitrate regime of chestnut soils under crops of grain – steam crop rotation depending on the use of different systems of fertilizers in vegetation-field and stationary field experiments are presented. The levels of nitrate content during sowing, dynamics of changes during the growing season of grain crops and distribution in the soil profile were established. The influence of heat and moisture factors on the content of nitrate nitrogen during the sowing period was determined.

Key words: chestnut soil, grain crops, fertilizers, nitrate content.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 41–47

УДК 631.416.1:631.445.12(476)

АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ БЕЛАРУСИ

© 2020 г. Л. Н. Лученок

Институт мелиорации
220040 Минск, ул. Некрасова, 39-2, республика Беларусь
E-mail: l_luchenok@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2019 г.
После доработки 15.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Представлены данные по фракционному составу пула азота в торфяных почвах различных стадий трансформации, расположенных на территории Беларуси. В торфяных почвах с содержанием органического вещества <50% южной и центральной зон отмечена более высокая доля лабильных фракций N от общего азота в сравнении с агроторфяными, а их запасы увеличиваются с юга на север.

Ключевые слова: торфяные почвы, стадии трансформации, Беларусь, азотный режим, почвенный азот, минеральный азот, легкогидролизуемый азот.

DOI: 10.31857/S0002188120060071

ВВЕДЕНИЕ

В Беларуси осушено и находится в интенсивном сельскохозяйственном производстве около 1 млн га осушенных торфяных почв, которые на сегодняшний день представлены целым комплексом почвенных разновидностей с содержанием органического вещества (***ОВ***) от 5 до >80% [1]. Длительная (более 45 лет) их эксплуатация и появление в результате нее трансформированных (сработанных) торфяных почв с содержанием *ОВ* <50% требует оценки параметров их плодородия, главным образом, азотного режима. Этот показатель учитывается и является определяющим при нормировании доз минеральных азотных удобрений. Большое количество минерального азота, легко высвобождаемого в торфяных почвах сразу после осушения, в настоящее время на порядок меньше, а его образование и накопление во вновь образованных разновидностях изучено недостаточно [2, 3]. Кроме того, необходимо оценивать содержание почвенного азота и его вариабельность в зависимости от биоклиматического потенциала и способа использования пашни [4–6]. Эти данные необходимы для разработки зональных систем земледелия, включающих применение адаптивных доз азотных удобрений, что позволит минимизировать как минерализацию торфяных почв и сохранить их плодородие, так и затраты на внесение азота.

Таким образом, цель работы – оценка азотного режима торфяных почв различных стадий трансформации, расположенных в 3-х гидролого-климатических зонах Беларуси, а также влияние влажности и температуры на динамику содержания фракций минерального азота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Республики Беларусь было проведено экспедиционное обследование ряда мелиоративных объектов с осушенными торфяными почвами, расположенными в южной, центральной и северной гидролого-климатических зонах.

Южная зона*:* Канал Бона около н.п. Борисово (Кобринский р-н, N52° 10.247′, E24° 22.604′), польдер “Кристиново” около н.п. Лопатино (Пинский р-н, N 52°01.578′, E 26°18.578′), 2 точки на территории Полесской опытной станции (Лунинецкий р-н, N 52°12.173′, E 26°37.189′; N 52°11.435′, E 26°36.953′), объект “Марьино” около н.п. Коммуна (Любанский р-н, N 52°36.345′, E 28°02.817′).

Центральная зона: н.п. Майзорово и Лучное (Червеньский р-н, N 53°38.29′, E 28°28.385′), 2 точки на Дричинском массиве около н.п. Вендеж (Пуховичский р-н, N 53°33.495′, E 28°03.646′).

Северная зона: н.п. Ютишки (Браславский р-н, N 55°30.814′, E 26°44.495′), н.п. Петровщина (Шарковщинский р-н, N 55°14.460′, E27° 33.617′), н. п. Варлань (Докшицкий р-н: точка 1 – N 54°51.469′, E 28°01.175′, точка 2 – N 54°51.244′, E 28°00.471′, н.п. Слобода (р. Поня) (Докшицкий

Таблица 1. Зависимости содержания азота (мг/кг) различных фракций от величины содержания органического вещества (*OB*, %) в антропогенно-преобразованных торфяных почвах

Фракция азота	Южная зона	Центральная зона	Северная зона
Валовый (N_g)	$N_g = 312.85OB$ ($R^2 = 0.99$)	$N_g = 312.21OB$ ($R^2 = 0.99$)	$N_g = 276.91OB$ ($R^2 = 0.70$)
Негидролизуемый (N_{uh})	$N_{uh} = 259.06OB$ ($R^2 = 0.98$)	$N_{uh} = 260.76OB$ ($R^2 = 0.98$)	$N_{uh} = 276.91OB$ ($R^2 = 0.70$)
Трудногидролизуемый (N_{hl})	$N_{hl} = 1304.6\mathrm{Ln}(OB) - 912$ ($R^2 = 0.84$)	$N_{hl} = 1496.6\mathrm{Ln}(OB) - 2526.3$ ($R^2 = 0.89$)	$N_{hl} = 2907.46\mathrm{Ln}(OB) - 6950.9$ ($R^2 = 0.59$)
Легкогидролизуемый (N_l)	$N_l = 536.79\mathrm{Ln}(OB) - 1009.3$ ($R^2 = 0.93$)	$N_l = 619.53\mathrm{Ln}(OB) - 1016.4$ ($R^2 = 0.86$)	$N_l = 849.8\mathrm{Ln}(OB) - 2181.2$ ($R^2 = 0.51$)
Минеральный (N_m)	$N_m = 1.0142OB$ ($R^2 = 0.6549$)	$N_m = 0.8658OB$ ($R^2 = 0.7223$)	$N_m = 0.637OB$ ($R^2 = 0.129$)
Нитратный ($N\text{-}NO_3$)	$N\text{-}NO_3 = 0.4979OB$ ($R^2 = 0.8175$)	$N\text{-}NO_3 = 2902OB$ ($R^2 = 0.83$)	$N\text{-}NO_3 = 277OB + 29.1$ ($R^2 = 0.045$)
Аммонийный ($N\text{-}NH_4$)	$N\text{-}NH_4 = 0.6088OB$ ($R^2 = 0.6656$)	$N\text{-}NH_4 = 0.5756OB$ ($R^2 = 0.4467$)	$N\text{-}NH_4 = 0.36OB + 2.39$ ($R^2 = 0.406$)

Примечание. Диапазон содержания *OB* в слое 0–20 см = 3.0–90%. То же в табл. 2.

р-н, N 54°52.421′, E27° 59.591’), н.п. Веретеи (под ЛЭП) (Докшицкий р-н, N 54°37.307′, E 27°54.778′).

На каждом объекте были выбраны реперные точки с мощными, средне- или маломощными торфяными почвами (содержание *OB* >50%), торфяно-минеральными и минеральными остаточно-торфяными (содержание *OB* 20–50%) или постторфяными (содержание *OB* <20%) почвами [7]. Все точки находились на полях, на которых реализовывали кормовые севообороты. Торф на объектах – низинный, по ботаническому составу – осоково-тростниковый или тростниково-осоковый (70–80% : 30–20%), с включениями остатков древесины лиственной (до 15%). Почвенные пробы отбирали ранней весной (апрель–начало мая в зависимости от зоны). Азот почвы (нитратный и аммонийный, минеральный, легкогидролизуемый, трудногидролизуемый и негидролизуемый остаток) определяли по методу Семененко [8].

Оценку влияния температуры и влажности на динамику содержания минерального и легкогидролизуемого азота в торфяных почвах различных стадий трансформации проводили в лабораторном эксперименте. Были отобраны 3 почвенные разновидности: минеральная пост-торфяная (*OB* ~5%), торфяно-минеральная (*OB* ~25%), агроторфяная (*OB* ~84%). Образцы воздушно-сухой почвы массой 250 г были просеяны через сито 2 мм и помещены в пластиковые сосуды. Влажность почвы поддерживали на протяжение всего периода инкубации на уровне 0, 30 и 60% весовой (абсолютной) влажности. Динамику фракций минерального азота оценивали в течение 42 сут при 3-х температурных режимах: 5, 20 и 30°C. Необходимый температурный режим обеспечивали термостатированием почвенных образцов с использованием холодильной камеры (5 ± 0.5°C) и термостата (30 ± 0.5°C), и при комнатной температуре (20 ± 1.0°C).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Около 93–95% азота почвы недоступно растениям. Бóльшая часть этого количества закреплена в гумусоподобных веществах, в растительных и животных остатках, микробной биомассе и продуктах ее метаболизма. Поэтому содержание азота (мг/кг) в торфяных почвах различных стадий трансформации, главным образом, определяется содержанием *OB* в органогенном слое. Обследование всех объектов показало, что фракционный состав почвенного азота в южной и центральной зонах зависел от содержания *OB* (табл. 1). В северной зоне установлена заметная связь содержаний валового, негидролизуемого, трудногидролизуемого и легкогидролизуемого азотов от содержания *OB*, в то время как количество минерального, аммонийного и нитратного азота не зависело от стадии трансформации торфяной почвы. Однако для оценки их плодородия необходимо оценивать в них запасы азота (т/га), особенно лабильных и доступных для растений фракций, с учетом всех происходящих с этими почвами изменений (осадка, уплотнения и т.п.).

Таблица 2. Зависимости запасов азота различных фракций (т/га) от ОВ (%) в антропогенно-преобразованных торфяных почвах

Фракция азота	Южная зона	Центральная зона	Северная зона
Негидролизуемый (N_{uh})	$N_{uh} = 0.1133OB + 3.0443$ ($R^2 = 0.6902$)	$N_{uh} = 0.1043OB + 4.6962$ ($R^2 = 0.7282$)	$N_{uh} = 0.2235OB - 0.7281$ ($R^2 = 0.2595$)
Трудногидролизуемый (N_{hl})	$N_{hl} = -0.001OB + 2.3287$ ($R^2 = 0.0016$)	$N_{hl} = -0.007OB + 3.0671$ ($R^2 = 0.1034$)	$N_{hl} = 0.0733OB + 0.5779$ ($R^2 = 0.1584$)
Легкогидролизуемый (N_l)	$N_l = 0.0025OB + 0.5962$ ($R^2 = 0.1059$)	$N_l = 0.004OB + 1.3866$ ($R^2 = 0.2659$)	$N_l = 0.0205OB + 0.030$ ($R^2 = 0.2246$)
Минеральный (N_m)	$N_m = 0.00008OB + 0.038$ ($R^2 = 0.0206$)	$N_m = -0.0002OB + 0.0565$ ($R^2 = 0.1956$)	$N_m = -0.0012OB + 0.01$ ($R^2 = 0.0968$)
Нитратный ($N\text{-}NO_3$)	$N\text{-}NO_3 = 0.00008OB + 0.013$ ($R^2 = 0.0772$)	$N\text{-}NO_3 = 0.00002OB + 0.0126$ ($R^2 = 0.0109$)	$N\text{-}NO_3 = 0.0006OB + 0.0159$ ($R^2 = 0.0663$)
Аммонийный ($N\text{-}NH_4$)	$N\text{-}NH_4 = 0.000004OB + 0.025$ ($R^2 = 0.00007$)	$N\text{-}NH_4 = -0.0002OB + 0.0439$ ($R^2 = 0.2144$)	$N\text{-}NH_4 = 0.0005OB + 0.0161$ ($R^2 = 0.0496$)

Эти показатели, особенно запасы минерального азота, важны при расчете доз азотных удобрений.

В ходе исследования установлено, что только запасы валового и негидролизуемого азота определяются величиной содержания *OB*. Запасы трудногидролизуемого и лабильных фракций N (легкогидролизуемого, минерального (нитратного и аммонийного)) не зависели от содержания *OB* и от стадии трансформации торфяной почвы (табл. 2).

Установлено, что гидролого-климатические условия (биоклиматический потенциал) влияют на фонд почвенного азота. Запасы легкогидролизуемого азота в почве в южной зоне находятся на уровне 0.71 ± 0.15 т/га, центральной и северной – 1.16 ± 0.35 и 1.26 ± 0.35 т/га соответственно. Запасы минерального азота также увеличивались с юга на север и в среднем составляли 0.04 ± 0.15, 0.05 ± 0.20 и 0.08 ± 0.20 т/га соответственно. Количество аммонийного и нитратного азота могло варьировать в течение вегетационного периода и определяться его погодными условиями и возделываемыми культурами.

Анализ качественного состава пула почвенного азота показал, что он различен в зависимости от места расположения и содержания *OB*. Доля негидролизуемого N ($\boldsymbol{P_{Nuh}}$) находилась в пределах от 60 до 90% от содержания общего азота: в центральной зоне она варьировала в пределах 70–85%, в северной – 65–75%. Наибольший разброс величин N_{uh} отмечен в южной зоне. В южной (уравнение (1)) и центральной (уравнение (2)) зонах доля N_{uh} возрастала с ростом содержания *OB* в почве:

$$P_{Nuh} = 0.2985OB + 61.989 \quad (R^2 = 0.569), \quad (1)$$

$$P_{Nuh} = 0.2505OB + 63.767 \quad (R^2 = 0.932). \quad (2)$$

В северной зоне P_{Nuh} оставалась постоянной независимо от стадии трансформации торфяной почвы.

Доля трудногидролизуемого N ($\boldsymbol{P_{Nhl}}$) в южной (уравнение (3)) и центральной (уравнение (4)) зонах снижалась при увеличении содержания *OB* в почве с 30 до 10%:

$$P_{Nhl} = -0.2985OB + 38.011 \quad (R^2 = 0.569), \quad (3)$$

$$P_{Nhl} = -0.2505OB + 36.233 \quad (R^2 = 0.9324), \quad (4)$$

в то время как в северной зоне оставалась в пределах 25–35% не зависимо от содержания.

Доля легкогидролизуемого азота ($\boldsymbol{P_{Nl}}$) в южной зоне (уравнение (5)) варьировала в пределах 5–10% от содержания общего азота и снижалась при увеличении количества *OB* в почве:

$$P_{Nl} = -0.045OB + 9.2128 \quad (R^2 = 0.641), \quad (5)$$

в центральной зоне (уравнение (6)) этот показатель составил 5–20% и его величина также определялась содержанием *OB*:

$$P_{Nl} = -0.1356OB + 17.482 \quad (R^2 = 0.7894). \quad (6)$$

В северной зоне доля легкогидролизуемого азота составляла 5–10% от содержания общего азота и не зависела от стадии трансформации торфяных почв.

Доля минерального азота ($\boldsymbol{P_{Nm}}$), в т.ч. нитратного и аммонийного, находилась в пределах 0.2–0.6%. Зависимости между пулом N_m, в т.ч. $N\text{-}NO_3$

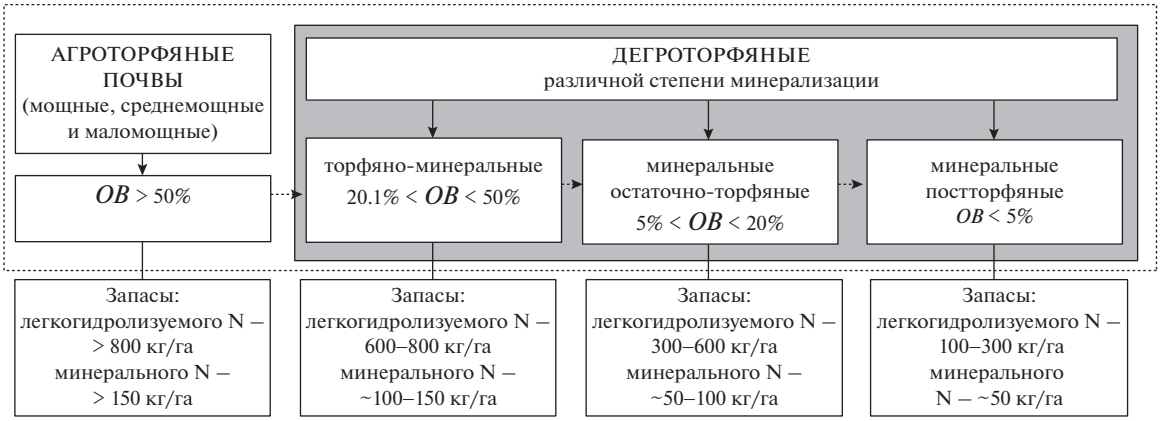

Рис. 1. Запасы легкогидролизуемого и минерального азота в торфяных почвах различных стадий трансформации после 40 лет их сельскохозяйственного использования.

и $N\text{-}NH_4$, и содержанием *OB* в торфяных почвах различных стадий трансформации были слабые и умеренные: R^2 варьировал от 0.2 до 0.5. Высокая связь между содержаниями минерального азота и *OB* отмечена только в центральной зоне. Установлено накопление в минерализованных торфяных почвах легкодоступных для растений форм азота.

Запасы легкогидролизуемого и минерального N в почвах увеличивались с юга на север, что свидетельствовало о более интенсивном использовании его растениями в более благоприятных для ведения растениеводства агроклиматических зонах при формировании урожая (в том числе за счет биоклиматического потенциала зоны).

Таким образом, запасы доступного растениям почвенного азота в слое 0–20 см варьировали в зависимости от стадий трансформации торфяных почв, но оставались достаточными, что свидетельствовало о высокой степени потенциального плодородия почв. В агроторфяных почвах все еще имеется значительный потенциал для минерализации *OB* и высвобождения лабильных фракций азота (рис. 1). Однако в используемых в сельхозпроизводстве торфяных почвах минерализации подвержено не только органическое вещество торфа, а и корневых и пожнивных остатков возделываемых культур. И вклад каждого компонента в общую минерализацию установить сложно. Возможно, свежее *OB* растительных остатков подвергается этому процессу в большей степени, чем почвы.

В лабораторном эксперименте по оценке влияния только абиотических факторов на динамику содержания лабильных фракций почвенного азота (легкогидролизуемого, нитратного и аммонийного) установлено, что количество лабильных фракций азота в одинаковых условиях (температуры и влажности) определялось стадией трансформации торфяных почв. Например, в агроторфяных почвах (*OB* >50%) даже при нулевой влажности количество легкогидролизуемого азота (с максимумом через 14 сут инкубации) в 2.0–2.5 раза было больше по сравнению с торфяно-минеральной (*OB* = 20–50%) и более чем в 20 раз по сравнению с постторфяной почвой (*OB* <5%) (max – через 28 сут) (рис. 2). В торфяно-минеральной почве ярко выраженных максимумов не было отмечено, а количество легкогидролизуемого азота в течение периода проведения эксперимента находилось в пределах 605–1200 мг/кг. Наиболее стабильными к влиянию абиотических факторов были торфяно-минеральные и агроторфяные почвы.

Увеличение влажности и температуры не приводили к значительным изменениям количества N_l в почве, через 28 сут инкубации отмечена тенденция к замедлению процессов, приводящих к его образованию. Структура пула минерального азота (нитратного и аммонийного) также определялась стадией трансформации торфяных почв: чем больше содержание в них *OB*, тем интенсивнее накапливалась в почве фракция $N\text{-}NO_3$ (рис. 3).

Во всех почвенных разновидностях, кроме минеральных постторфяных почв (при содержании *OB* <5%), содержание нитратного азота было больше по сравнению с аммонийным. В постторфяных почвах количества аммонийного и нитратного азота были сопоставимы. В агроторфяных почвах после первых 7 сут инкубации содержание $N\text{-}NO_3$ было в 38 раз больше по сравнению с минеральными пост-торфяными и в 3.6–4.4 раза – с торфяно-минеральными почвами.

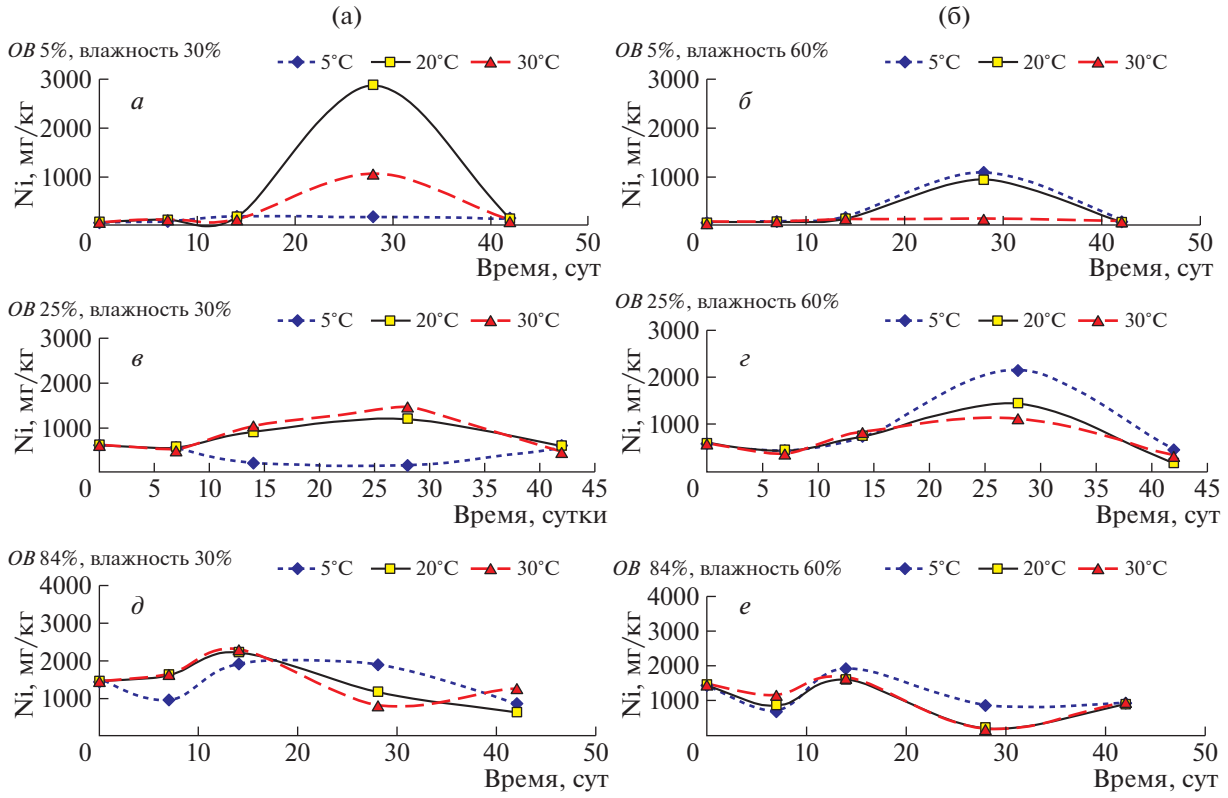

Рис. 2. Динамика содержания легкогидролизуемого азота в минеральных пост-торфяных (а, б), торфяно-минеральных (в, г) и агроторфяных (д, е) почвах при различных температурах и влажности.

В агроторфяных и торфяно-минеральных почвах отмечено снижение содержания нитратного азота после 14 сут инкубации с 231 до 81.5 мг/кг и с 88 до 34 мг/кг соответственно.

При увеличении влажности почвы до 30% не отмечено значительных изменений в динамике и количественном содержании $N\text{-}NO_3$. При абсолютной влажности 60% в торфяно-минеральных и минеральных пост-торфяных (соответствующие подтоплению и затоплению соответственно) отмечено снижение количества нитратного азота. В агроторфяной почве при температурах 5 и 20°C содержание $N\text{-}NO_3$ оставалось без изменений, при 30°C возрастало в 1.7 раза, через 7 сут снижалось до исходных величин (~226 мг/кг). При абсолютной влажности 30 и 60% в агроторфяных почвах при 30°C отмечена тенденция к повышению содержания $N\text{-}NH_4$ в 4.4–4.6 раза (с 20 до 78 и 125 мг/кг при 30%- и 60%-ной влажности соответственно) с увеличением времени экспозиции, в то время как при нулевой влажности оно оставалось стабильным на уровне 24.4 мг/кг. При температурах 5 и 20°C наблюдали снижение содержания аммонийного азота через 7–14 сут инкубации.

ВЫВОДЫ

1. При разработке систем применения азотных удобрений, особенно зерновых, необходимо учитывать накопление минерального азота за осенне-весенний период. В связи с тем, что его запасы даже в сильно минерализованных торфяных почвах могут составлять 50 кг/га и более (в затяжные холодные весны), то целесообразно дробное внесение азотных минеральных удобрений. Особенно этот прием актуален для торфяно-минеральных и агроторфяных почв, на которых предпосевное применение азотных удобрений может быть исключено, а всю планируемую дозу вносят во время некорневых подкормок.

2. Оценка динамики содержания пула лабильных фракций азота показала, что интенсивность процессов, приводящих к их накоплению, либо остается стабильной в течение 42 сут, либо имеет максимум через 7–14 сут с дальнейшим снижением до уровня меньше исходного.

3. В течение вегетационного периода количество осадков, температурный режим воздуха и перепады ночных и дневных температур менялись в широком диапазоне. Таким образом, вероятность совпадения благоприятных почвенных и погод-

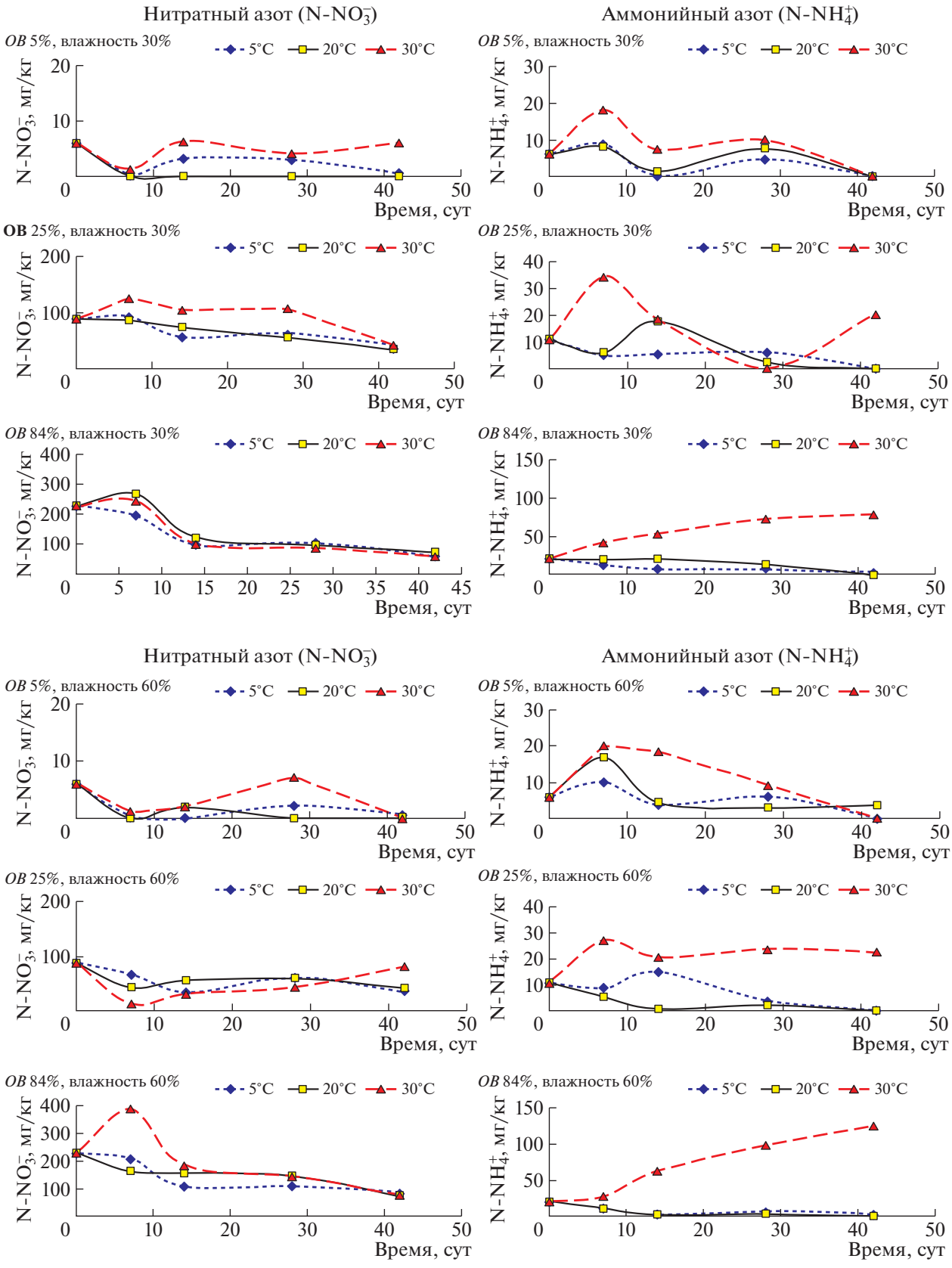

Рис. 3. Динамика содержания нитратного и аммонийного азота в минеральных пост-торфяных (*OB* ~5%), торфяно-минеральных (*OB* ~25%) и агроторфяных (*OB* ~84%) почвах при различных температурах и влажности 30 и 60%.

ных условий для достижения длительной максимальной интенсивности минерализации органического вещества почв (*ОВ*) в природных условиях Беларуси достаточно низкая. Поэтому нельзя утверждать, что происходит значительная минерализация *ОВ*, приводящая к полной деградации и потере плодородия торфяных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цытрон Г.С., Шульгина С.В., Азаренок Т.Н.* Пространственно-временная трансформация осушенных органогенных почв сельскохозяйственных земель Беларуси // Весці НАН Белурусі. Сер. Аграрных навук. 2016. № 2. С. 10–16.
2. *Семененко Н.Н.* Влияние осушения и сельскохозяйственного использования на трансформацию химического состава торфяных почв // Мелиорация. 2009. № 2 (62). С. 147–152.
3. *Семененко Н.Н., Каранкевич Е.В.* Модели прогноза трансформации фракционного состава азота торфяных почв Полесья под влиянием антропогенных факторов // Мелиорация. 2011. № 65. С. 122–130.
4. *Царенко В.П.* Азот в торфяных почвах и его трансформация: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.–Пушкин, 1992. 40 с.
5. *Царенко В.П.* Азотный режим осушенных торфяных почв // Гумус и почвообразование. 2009. С. 46–58.
6. *Горский А.С.* Влияние бессменного возделывания многолетних трав на питательный режим торфяной почвы // Мат-лы деловой программы XXVII Международ. агропром. выставки “Агрорусь – 2018”: “Качественный рост российского агропромышленного комплекса: возможности, проблемы и перспективы”. СПб.: СПбГАУ, 2018. С. 92–94.
7. *Смеян Н.И., Цитрон Г.С.* Классификация, диагностика и систематический список почв Беларуси. Минск: Ин-т почвовед. и агрохим., 2007. 220 с.
8. *Семененко Н.Н.* Агрохимические методы исследования состава соединений азота, фосфора и калия в торфяных почвах. Мн.: Белорус. наука, 2013. 78 с.

Nitrogen Regime of Peat Soils of Belarus

L. N. Luchanok

Institute for Land Reclamation
ul. Nekrasova 39-2, Minsk 220040, Belarus
E-mail: l_luchenok@mail.ru

It was present data on the fractional composition of the nitrogen pool in peat soils of different stages of transformation, located on the territory of Belarus. In peat soils with an organic matter (*OM*) content of less than 50% of the southern and central zones, a higher proportion of labile N fractions of total nitrogen compared to agro-peat ones was noted, and their reserves increase from south.

Key words: peat soils, transformation stages, Belarus, soil nitrogen, mineral nitrogen, easily hydrolyzed nitrogen.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 48–52

Питание растений

УДК 631.811.1:631.559:633.321

БИОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ КЛЕВЕРА КРАСНОГО

© 2020 г. В. Н. Баринов[1], М. Н. Новиков[1,*]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, п. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия
**E-mail: novik.mich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.12.2019 г.
После доработки 22.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

В исследовании на дерново-подзолистой супесчаной почве опытного поля ВНИИОУ в течение 2009–2014 гг. показана возможность использования для подкормки клевера красного биологического азота однолетних бобовых растений путем применения их в качестве покровных культур при посеве клевера. Увеличивая содержание усвояемых форм азота и других элементов питания в почве, они нивелировали осенне-весеннее азотное голодание растений клевера, оказали положительное влияние на развитие его биомассы и формирование по сравнению с беспокровными посевами дополнительного укосного урожая за 3 года пользования в зависимости от вида покровных культур – 144–256 ц/га (17–30%). Наиболее эффективными были варианты с узколистным люпином. Годовой условно чистый доход составил 13.6–14.8 тыс. руб./га.

Ключевые слова: клевер красный, покровные культуры, биологический азот, урожайность, доход.
DOI: 10.31857/S0002188120060034

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ведущих высокоурожайных, кормовых и почвоулучшающих культур в Нечерноземной зоне страны является клевер красный (луговой). По кормовым достоинствам он относится к лучшим видам многолетних трав.

Большинство посевов как злаковых, так и бобовых многолетних трав и их смесей, в Нечерноземной зоне в период отрастания весной страдает от недостатка азотного питания. Это связано с тем, что осенние запасы азота в пахотном слое вымываются осенними осадками и весенними талыми водами. К тому же весной из-за температурных условий и переувлажнения почвы процессы биологической мобилизации азота почвы очень ослаблены или отсутствуют. В этой связи агротехникой возделывания многолетних трав предусмотрено проведение весенних подкормок минеральным азотом в дозах N30–40 [1]. В современных условиях, при высоких ценах на минеральные удобрения это – дорогостоящее мероприятие, не всегда удачное: в отдельных случаях минеральный азот попадает на сухую почу и не участвует в питании растений, в других – вымывается осадками. Поэтому возникла необходимость разработки биологических приемов подкормки клевера красного азотом и другими элементами питания, которые образуются в почве при минерализации корне-пожнивных остатков покровных бобовых культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты (2009–2012 гг. – 1-я закладка, 2011–2014 гг. – 2-я закладка), проведенные в ВНИИОУ, включали ведущие многолетние травы Нечерноземной зоны: клевер красный сорта ВИК 7 (100%), в качестве покровных культур использовали зерновые злаки – тритикале сорта Ульяна (100%) и растения-доноры биологического азота – узколистный люпин сорта Кристалл (100%), кормовые бобы сорта Узуновские (100%), смесь вики сорта Льговская с овсом сорта Анастасия (50% + 50%), смеси люпина с тритикале (75% + + 25%) и бобов с тритикале (75% + 25%). Покровные культуры возделывали по агротехнике однолетних трав. Величина учетной делянки – 13.2 м^2, повторность четырехкратная. Опыт закладывали в 2-х полях. Предшественник во всех вариантах – горчица белая.

Таблица 1. Влияние покровных культур на густоту стояния клевера, шт./м^2

Покровная культура	Средние за 2009 и 2011 гг.		Средние за 2010 и 2012 гг.
	всходы	перед уходом в зиму	после перезимовки
Без покрова	171	290	285
Тритикале	175	289	288
Люпин узколистный	174	294	281
Бобы кормовые	173	294	281
Вика + овес	166	292	286
Люпин + тритикале	166	293	285
Бобы + тритикале	165	293	285
$НСР_{05}$	12	20	19

Таблица 2. Урожайность зеленой массы клевера красного в первый год жизни и покровных культур, ц/га

Покровная культура	Урожайность		Итого
	клевера красного	покровных культур	
Без покрова	165	–	165
Тритикале	65	154	219
Люпин узколистный	76	178	254
Бобы кормовые	84	187	271
Вика + овес	85	201	286
Люпин + тритикале	87	206	293
Бобы + тритикале	87	223	310
$НСР_{05}$	8	17	26

Почва под опытом – дерново-подзолистая супесчаная, сформированная на двучленных флювиогляциональных отложениях. Пахотный горизонт характеризуется низким содержанием гумуса (1.0–1.5%), реакцией среды, близкой к нейтральной (pH_{KCl} 6.0–6.2, $H_г$ – 0.43–0.67, S – 6.4–7.1), повышенной обеспеченностью усвояемыми формами фосфора и калия (12.8 и 14.1 мг/100 г почвы соответственно). Рельеф – плакор с микропонижениями, имеющими небольшой (до 0.5°) уклон на север. Климат – умеренно влажный, умеренно континентальный, среднегодовое количество осадков – 526–650 мм, сумма активных температур – 2000–2100°С, ГТК – 1.2–1.3 [2].

В опыте под зяблевую вспашку фоном были внесены фосфоритная мука и K_x из расчета P90K90. Клевер и покровные культуры сеяли перекрестно: сначала покровные культуры, затем клевер. Агротехника в опыте – общепринятая для Владимирской обл. [3]. Закладку опыта проводили в 1-й декаде мая, норма высева семян, кг/га: клевер –25, люпин и бобы – 200, вика с овсом – 40, тритикале –180.

В опыте определяли влияние покровных культур на густоту стояния растений многолетних трав (клевера) [4] в периоды всходов (3-я декада мая), перед уходом в зиму (2-я декада ноября) и после перезимовки (3-я декада мая), содержание нитратного и аммиачного азота в пахотном слое почвы перед уходом посевов клевера в зиму и весной при их отрастании [5], укосный урожай покровных культур и однолетних трав в 1-й год жизни и в течение 3-х лет хозяйственного использования [4], развитие сегетальных видов растений [6], поражение многолетних трав болезнями и вредителями [7, 8], накопление кормовых единиц (**к.е.**) в укосном урожае клевера [9, 10], содержание корневой массы в пахотном слое, ее удобрительные показатели [1, 11], экономическую эффективность покровных культур при возделывании клевера красного [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Покровные культуры не оказали существенного влияния на густоту стояния растений клевера в периоды всходов, перед уходом в зиму и после перезимовки (табл. 1). В полной мере потенциал всхожести семян клевера проявился не после посева, а в течение вегетационного периода растений 1-го года жизни, и перед уходом в зиму разницы в густоте стояния растений и внешнем развитии не было отмечено. Гибель растений в процессе перезимовки составила от 2 в контроле до 3% в вариантах с люпином и бобами, что не вызвало контрастных различий густоты стояния перезимовавших растений в вариантах опыта. Все покровные культуры угнетающе действовали на развитие клевера в первый год жизни. Более высокая урожайность зеленой массы клевера сформировалась лишь в самостоятельных посевах – 165 ц/га, под покровными культурами – 65–87 ц/га. Урожайность покровных культур была свыше 200 ц/га, из покровных культур более высокой продуктивностью обладали смешанные посевы, суммарная урожайность увеличилась в вариантах с покровными культурами на 33–87% (табл. 2). Перед уходом в зиму развитие клевера красного во всех вариантах опыта выровнялось (высота растений, цвет листьев, отсутствие болезней и вредителей).

В период укосной спелости бобовых покровных культур под их совместным влиянием с клевером 1-го года жизни отмечен достоверный при-

Таблица 3. Влияние покровных культур в период укосной спелости на накопление корне-пожнивных остатков (корней) и элементов питания в них

Покровная культура	Сухая масса корней, ц/га	Содержание в корнях, %			Накопление в корнях, кг/га			Итого элементов питания, кг/га
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	
Без покрова	33	1.44	0.54	1.10	47	18	36	101
Тритикале	44	1.18	0.52	1.13	52	23	50	125
Люпин узколистный	51	1.45	0.51	1.07	74	26	55	155
Бобы кормовые	53	1.38	0.52	1.07	73	28	57	158
Вика + овес	59	1.32	0.51	1.10	78	30	65	173
Люпин + тритикале	59	1.43	0.51	1.08	84	30	64	178
Бобы + тритикале	61	1.37	0.52	1.08	84	32	66	182
$НСР_{05}$	16				15	18	17	

рост накопления в почве корне-пожнивных остатков и повышенное содержание в них элементов питания (табл. 3).

Бобовые культуры и их смеси со злаковыми способствовали увеличению накопления в корне-пожнивных остатках азота на 27–37 кг/га (57–74%), общего содержания элементов питания – 54–81 кг/га (53–80%). Корне-пожнивные остатки с приоритетным накоплением азота способствовали увеличению содержания в почве подвижных форм азота в критические периоды потребности в нем растениями клевера (табл. 4). В осенний период в вариантах с бобовыми покровными культурами содержание подвижных форм азота в почве было практически одинаковым, весной в начале активного развития клевера отмечали более интенсивное потребление растениями подвижных форм азота в вариантах с люпином, что отразилось на показателях укосной урожайности (табл. 5). В 1-й и 2-й годы пользования бóльшая урожайность клевера была достигнута в вариантах с люпином, что было связано, видимо, с высокой донорской способностью люпина к азотному питанию акцепторных растений и хорошо развитой корневой системой этой культуры в подпахотных горизонтах, которая минерализуясь, обеспечивала клевер дополнительными элементами питания [13]. На 3-й год пользования отмечен значительный выпад клевера и, как следствие, снижение его продуктивности, но эффект покровных культур проявлялся даже более контрастно, чем в предыдущие 2 года. При этом возросла эффективность покровных культур в вариантах с кормовыми бобами и смесями люпина с тритикале и вики с овсом.

Таблица 4. Влияние покровных культур на содержание подвижных форм азота в почве под клевером красным

Покровная культура	Содержание $N\text{-}NO_3 + N\text{-}NH_4$, мг/100 г почвы	
	2-я декада ноября	3-я декада апреля
Без покрова	34.2	20.1
Тритикале	28.5	19.2
Люпин узколистный	38.4	22.6
Бобы кормовые	37.5	30.5
Вика + овес	37.5	29.3
Люпин + тритикале	37.6	27.1
Бобы + тритикале	37.5	38.1
$НСР_{05}$	4.5	2.5

Эффект положительного длительного воздействия покровных культур на урожайность клевера красного был связан не только с улучшением под их влиянием минерального питания клевера, но и формированием более развитой его корневой системы с повышенным содержанием биогенных элементов, а также накоплением в почве подвижных форм азота (табл. 6). Содержание подвижных форм азота учитывали в 1 декаде мая под посевами клевера 3-го года пользования. Большее положительное влияние на накопление корне-пожнивных остатков и основных элементов питания оказывали люпин и его сочетание с тритикале, вика с овсом, несколько меньше была эффективность в вариантах с кормовыми бобами. Усиливая накопление корневой массы и содержание в ней элементов питания, покровные культуры с бобовым компонентом не только способствовали росту продуктивности клевера красного, но и оказывали положительное влияние на плодородие почвы. Покровные культуры не способствовали поражению растений клевера болезнями и вредителями. Под их пологом (особенно

Таблица 5. Влияние покровных культур на урожайность посевов клевера (средние за 2 закладки опыта)

Покровная культура	Годы пользования						Итого, ц/га
	1-й год (3 укоса)		2-й год (2 укоса)		3-й год (2 укоса)		
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	
Без покрова	330	100	300	100	222	100	852
Тритикале	340	103	281	94	226	102	847
Люпин узколистный	480	145	348	116	280	125	1108
Бобы кормовые	390	118	305	102	301	135	996
Вика + овес	405	122	335	112	326	145	1066
Люпин + тритикале	422	127	348	116	330	148	1100
Бобы + тритикале	388	118	318	106	302	136	1008
$НСР_{05}$	37		12		18		

Примечание. В графе 1 – ц/га, 2 – % к контролю без покрова.

Таблица 6. Влияние покровных культур на развитие корневой системы и содержание подвижного азота под клевером красным 2-го года пользования

Покровная культура	Масса корней, ц/га	Содержание в корнях, кг/га				Содержание $N\text{-}NO_3 + N\text{-}NH_4$, мг/100 г почвы
		N	P_2O_5	K_2O	итого	
Без покрова	295	140	42	81	263	12.3
Тритикале	276	125	38	91	254	13.8
Люпин узколистный	341	166	56	112	334	16.4
Бобы кормовые	300	150	50	98	298	15.1
Вика + овес	328	162	57	112	331	14.3
Люпин + тритикале	341	166	59	109	334	20.5
Бобы + тритикале	313	149	52	97	298	20.7
$НСР_{05}$	38	20	11	21	41	2.1

Таблица 7. Экономическая эффективность использования покровных культур при возделывании клевера красного

Покровная культура	Урожайность, ц к.е./га		Стоимость суммарного урожая	Затраты на возделывание клевера и покровных культур	Условно чистый доход
	клевера за 3 года пользования	клевера 1-го года жизни и покровных культур	руб./га		
Без покрова	187	36	176400	10000	166400
Тритикале	186	48	187200	17880	169320
Люпин узколистный	244	56	240000	19100	220900
Бобы кормовые	219	60	223200	20000	203200
Вика + овес	234	63	237600	18700	218900
Люпин + тритикале	242	64	244800	19020	225780
Бобы + тритикале	222	68	232000	19240	212960

смешанных посевов) в 1-й год жизни клевера заметно хуже развивались сорняки, их количество уменьшалось в среднем на 23, масса – на 67%.

При определении экономической эффективности использования покровных культур суммарную урожайность клевера за 4 года и покровных культур учитывали в кормовых единицах (к.е.), используя коэффициент пересчета зеленой массы (0.22), стоимость 1 к.е. (8 руб.), 1 кг семян клевера красного (120 руб.), люпина узколистного (22 руб.), кормовых бобов (25 руб.), вики с овсом (17 руб.), тритикале (16 руб.), затраты на возделывание и уборку покровных культур и клевера определяли по технологическим картам (табл. 7).

Наилучшие показатели экономической эффективности покровных культур были в вариантах с люпином. За 4 года жизни клевера по сравнению с чистыми посевами выход кормовых единиц возрос на 80 и 88 ц/га (36 и 40%), условно чистый доход – на 54.5 и 59.4 тыс. руб./га (31 и 34%), в среднем за год – 13.6 и 14.8 тыс. руб. Близкими показателями к вариантам с люпином отличались варианты с викой и бобами. С точки зрения организации посевов и экономии затрат на семена покровных культур выгодней использовать монокультуру бобовых культур, но для получения полноценных по составу кормов в год посева клевера целесообразны смешанные посевы покровных культур при преобладании бобового компонента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями на дерново-подзолистой супесчаной почве опытного поля ВНИИОУ в течении 2009–2014 гг. установлена возможность использования для подкормок клевера красного азота однолетних бобовых растений путем применения их в качестве покровных культур. Они, увеличивая содержание усвояемых форм азота и других элементов питания в почве, оказали положительное влияние на развитие растений клевера в осенний и весенний периоды, формирование их биомассы в процессе вегетации, на развитие корневой системы клевера и накопление в ней элементов питания. Эффективное действие покровных культур прослежено в течение 3-х лет хозяйственного пользования клевера красного. Наиболее эффективными покровными культурами были люпин узколистный и его смесь с тритикале. Условно чистый доход в среднем на 1 га посевов составил 13.6 и 14.8 тыс. руб. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник агронома Нечерноземной зоны / Под ред. Гуляева Г.В. М.: Колос, 1980. 576 с.
2. Агроклиматические ресурсы Владимирской области. М., 1968. 145 с.
3. Система ведения земледелия Владимирской области. Владимир, 1983. 131 с.
4. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М., 1968. 336 с.
5. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1 (анализ почв) / Под ред. Панникова В.Д. М., 1953. 164 с.
6. *Шептухов В.Н., Гафаров Р.Ш., Пахаскири Т.В.* Атлас основных видов сорных растений России. М.: КолосС, 2009. 914 с.
7. *Хохряков М.К.* Определение болезней растений. Л.: Колос, 1966. 532 с.
8. *Брянцев В.А.* Сельскохозяйственная энтомология. Л.: Колос, 1966. 342 с.
9. *Панников В.Д.* Программа и методика исследований в Географической сети полевых опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии. М., 1990. 187 с.
10. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 2 (анализ растений) / Под ред. Панникова В.Д. М., 1976. 128 с.
11. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 240 с.
12. Методические указания по определению экономической эффективности удобрений и других средств химизации, применяемых в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1979. 25 с.
13. *Новиков М.Н., Такунов И.П., Слесарева Т.И., Баринов В.Н.* Смешанные посевы с люпином в земледелии Нечерноземной зоны. М.: Столичная типография, 2008. 160 с.

Biological Method for Optimizing Nitrogen Nutrition and Increasing Productivity of Red Clover

V. N. Barinov[a] and M. N. Novikov[a,#]

[a] The All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – Branch of the Upper Volga Federal Agricultural Research Center
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, p. Vyatkino 601390, Russia

[#]E-mail: novik.mich@yandex.ru

In a study on sod-podzolic sandy loam soil of the vniiou experimental field during 2009–2014, the possibility of using red biological nitrogen of annual legumes for clover feeding by using them as cover crops when sowing clover was shown. Increasing the content of assimilable forms of nitrogen and other nutrients in the soil, they leveled the autumn-spring nitrogen starvation of clover plants, had a positive impact on the development of its biomass and the formation of an additional mowing crop for 3 years of use, depending on the type of cover crops – 144–256 c/ha (17–30%). The most effective options were narrow-leaved lupine. Annual notional net income was 13.6–14.8 thousand rubles/ha.

Key words: red clover, cover crops, biological nitrogen, yield, income.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 53–63

Удобрения

УДК 631.8:631.62:631.445.51:633/635(470.4)

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ПЛОДОРОДИЕ ОРОШАЕМЫХ ТЕМНО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ПОВОЛЖЬЯ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

© 2020 г. В. В. Пронько[1], Н. А. Пронько[2], О. В. Рухович[3], М. В. Беличенко[3,*], В. А. Романенков[3,4], Т. М. Ярошенко[5], Н. Ф. Климова[5], Д. Ю. Журавлев[5]

[1] Научно-производственное объединение "Сила Жизни"
410005 Саратов, ул. Большая Садовая, 239, Россия

[2] Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова
410012 Саратов, ул. Советская, 61, Россия

[3] Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

[4] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

[5] Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

**E-mail: mvbelichenko@gmail.com*

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.
После доработки 30.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Представлен анализ результатов агрохимических исследований научных учреждений Поволжья, выполненных на орошаемых темно-каштановых почвах. Показано влияние различных видов органических (навоз, сидераты) и минеральных удобрений на агрохимические свойства почв: содержание и баланс гумуса, азота, фосфора, калия. Отмечена высокая эффективность зеленого удобрения в промежуточных и основных посевах, а также многолетних бобовых трав. Сочетание органических удобрений и посевов многолетних трав на современном этапе развития земледелия является основным способом воспроизводства плодородия орошаемых темно-каштановых почв сухой степи Поволжья. Рассмотрены результаты применения минеральных удобрений, препаратов на основе гуминовых кислот и хелатных форм микроудобрений на овощных культурах в условиях капельного орошения.

Ключевые слова: орошение, Поволжье, темно-каштановые почвы, удобрения, зерновые, кормовые, технические и овощные культуры.

DOI: 10.31857/S0002188120060083

ВВЕДЕНИЕ

По имеющимся в литературе сведениям, первые опыты с минеральными удобрениями на орошаемых каштановых почвах Поволжья были проведены А.В. Обуховым на Валуйской мелиоративной станции им. П.А. Костычева в 1894 г. [1]. Изучали отзывчивость зерновых и кормовых культур на азотные, фосфорные и калийные удобрения, которые в то время поступали из-за рубежа. Вопросы влияния различных видов органических и минеральных удобрений на урожай сельскохозяйственных культур, возделываемых в Поволжье на поливных землях, доминировали в агрохимических исследованиях до середины 30-х годов прошлого века [2].

С целью последующего выявления почвенных массивов для целей орошения в предвоенные и послевоенные годы прошлого века была проделана огромная работа, полученные материалы обобщены и опубликованы в научной печати [3, 4]. Ввиду большого научного и практического значения определение агрохимических свойств темно-каштановых почв продолжалось и в последующие годы [5–8].

В начале шестидесятых годов XX века руководством страны был взят курс на широкое мелиоративное строительство, в Поволжье (Самарская, Саратовская, Волгоградская, Астраханская обл. и республика Калмыкия) предполагалось ввести в строй 2.8 млн га орошаемых земель. Фактически к

1990 г. поливная площадь составила 1 млн 689 тыс. га [9]. По расчетам, урожайность основных сельскохозяйственных культур, возделываемых в этой зоне, должна была увеличиться в 3–4 раза по сравнению с богарной [10]. На орошаемых землях были развернуты агрохимические исследования. Большую помощь в их организации и проведении оказала Географическая сеть опытов с удобрениями при существовавшем в то время Всесоюзном НИИ удобрений и агропочвоведения (ныне – ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова). Геосеть готовила и издавала методические указания по проведению опытов, выпускала практические рекомендации по применению удобрений и осуществляла обобщение результатов агрохимических опытов в условиях орошения [11–14].

В настоящем обзоре приведен краткий анализ результатов агрохимических исследований, выполненных на темно-каштановых почвах Поволжья с середины семидесятых годов прошлого века и по настоящее время.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ОРОШАЕМЫХ ТЕМНО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ СУХОЙ СТЕПИ ПОВОЛЖЬЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДОБРЕНИЙ

Темно-каштановые почвы, преимущественно тяжелого гранулометрического состава, преобладают в северной, более увлажненной части сухой степи Поволжья. Они вплотную примыкают к черноземам южным. Вдоль левого берега р. Волги сосредоточены темно-каштановые террасовые почвы. Они, как правило, имеют облегченный гранулометрический состав (легко- и среднесуглинистые) и поэтому обладают лучшими агрохимическими и агрофизическими показателями [5]. В центральном и южном Заволжье преобладают сыртовые темно-каштановые почвы, получившие название от расположенной здесь Сыртовой равнины. Они в основном имеют тяжелый гранулометрический состав (тяжелосуглинистый и глинистый) с отчетливо выраженной солонцеватостью.

Изучение почв сухой степи Поволжья показало, что их распахивание и вовлечение в сельскохозяйственный оборот привело к деградации их состояния. Усилилась минерализация гумуса и азотистых соединений почвы, снизилась сумма поглощенных оснований и произошло уменьшение в ней доли кальция, уменьшилась биологическая активность почв пахотных угодий [8, 15].

Как показала практика, орошение усилило деградационные процессы. Помимо дегумификации и снижения эрозионной устойчивости практически повсеместно отмечен подъем уровня грунтовых вод, последующее засоление и потери доступных для растений элементов питания. В итоге, в период наибольшего развития орошения (1991–1993 гг.) доля деградированных поливных земель в Астраханской обл. составила 68.5, Саратовской – 26.9, Волгоградской – 20.8 и Самарской – 15.1% от их общей площади [9].

Широкомасштабные агрохимические опыты, начатые в конце 1960-х гг. прошлого века, показали, что в повышении урожайности орошаемых культур и регулировании плодородия поливных земель огромное значение принадлежит удобрениям [16].

Многолетними исследованиями ученых Саратовского СХИ было установлено, что на впервые орошаемой темно-каштановой почве Саратовского Заволжья культуры зернокормового севооборота хорошо отзывались на внесение минеральных удобрений, навоза и зеленого удобрения. Эквивалентные по действующему веществу дозы органических и минеральных удобрений (или их сочетаний) практически одинаково влияли на продуктивность как травяного, так и пропашного севооборотных звеньев [4]. На динамику содержания питательных веществ, урожай и его качество запашка зеленой массы тригонеллы (до 27 т/га) в пропашном звене севооборота оказала примерно такое же действие, как и доза навоза 40 т/га.

В сопоставимых вариантах в пропашном севообороте было собрано больше продукции в условных зерновых единицах, чем в травяном. Но прибавки урожая относительно контроля в обоих севооборотах были равнозначные, что свидетельствовало об одинаковой эффективности удобрений в разных севооборотах. В сопоставимых вариантах в травяном севообороте было получено в 2 раза больше белка, чем в пропашном, по экономическим показателям отмечена обратная зависимость.

На содержание органического вещества почвы в травяном севообороте удобрения оказали лучшее влияние, чем в пропашном. Достоверное увеличение исходного содержания гумуса в обоих севооборотах отмечали при заделке навоза 80 т/га и сочетании навоза 40 т/га с минеральными удобрениями. Одни минеральные удобрения и пожнивной сидерат оказывали на этот показатель плодородия неустойчивое влияние.

На прирост сухой надземной массы растений, интенсивность накопления ими питательных веществ и водопотребление в первый год действия удобрений лучше влияли минеральные удобрения. Влияние органических удобрений на эти по-

казатели заметнее проявилось в последействии. В равноудобренных вариантах в обоих севооборотах в сумме за ротацию накапливалось одинаковое количество сухой надземной массы растений.

Вынос элементов питания в удобренных вариантах повышался. Баланс питательных веществ в одинаково удобренных вариантах в каждом севообороте складывался равновеликий. В травяном севообороте баланс азота в удобренных вариантах был положительным или близок к нему, а калия – остродефицитный. В пропашном севообороте расход азота превышал его поступление, а баланс калия приближался к положительному [4].

В этот же временно́й период в Саратовском СХИ изучали вопросы удобрения гороха как новой для условий орошения культуры. Показано, что внесение минеральных удобрений под горох в темно-каштановые почвы Саратовского Заволжья способствовало повышению урожая и улучшению его качества.

Наиболее эффективным оказалось применение фосфорно-калийных удобрений с добавлением небольшой дозы азота (N20P40K40): прибавка составила 5.8 ц/га, и фосфорно-калийного удобрения (P40K20): прибавка была равна 4.1 ц/га. Высокоэффективным было внесение гранулированного суперфосфата в рядки при посеве в дозе P10, повысившего урожай зерна в среднем за 3 года на 2.1 ц/га. Из микроудобрений перспективно оказалось внесение полимикроудобрения ПМУ-7 в дозе 100 г препарата/ц семян.

Минеральные удобрения положительно влияли на качество урожая гороха. В этом отношении лучший результат был получен от применения полного удобрения N20P40K40, заметно увеличившего содержание сырого протеина и снизившего количество клетчатки в зерне гороха. На повышение содержания жира в семенах наиболее благоприятное действие оказывало фосфорное удобрение как при раздельном, так и совместном внесении с калийным удобрением. Удобрения повышали зольность растений и снижали содержание сырой клетчатки, улучшая тем самым пищевые достоинства гороха. Внесение минеральных удобрений способствовало улучшению питательного режима почвы – повышению ее нитрификационной способности и увеличению содержания подвижных форм калия и фосфора в ней [18].

Помимо гороха новыми культурами для орошаемых земель в Поволжье также были соя [19], сахарная [20] и кормовая [21] свекла, подсолнечник [22]. Для них определили оптимальные виды, дозы и сочетания минеральных удобрений.

Общим результатом этих опытов было также то, что они позволили выявить положительное влияние удобрений не только на урожай, но и на качество получаемой продукции. Следует также отметить слабую отзывчивость указанных культур на внесение калия. В опытах с сахарной свеклой [20] впервые в условиях сухой степи Поволжья выявлена высокая эффективность микроудобрений (бора, молибдена).

В семидесятые–восьмидесятые годы прошлого века на орошаемых землях Поволжья самые большие площади занимала яровая пшеница. Актуальным для этого времени был вопрос о подборе сортов этой культуры, пригодных для возделывания в условиях орошения. Усилиями ученых данная проблема была решена [23–25]. Установлено, что максимальной потенциальной продуктивностью в условиях Поволжья обладали короткостебельные сорта мексиканской селекции. Они обеспечивали получение до 6.0 т/га первоклассного зерна при оптимальном водном режиме и внесении N120–160 [25]. Для яровой, а также озимой пшеницы в НИИ сельского хозяйства Юго-Востока были определены диагностические показатели азотного и фосфорного питания [26].

Из кормовых культур в условиях орошения доминировала кукуруза на силос. В рассматриваемый временно́й период наиболее актуальными можно назвать работы по изучению эффективности разных видов и доз азотных удобрений [27]. Результаты опытов показали равноценное в условиях орошения действие нитратных и аммиачных солей, а также позволили определить глубину опускания нитратов с поливной водой в темно-каштановых террасовых почвах. Не менее интересные сведения удалось получить при совместном изучении режимов орошения и доз минеральных удобрений [28].

В опытах с орошаемой яровой пшеницей в 1970-е гг. выявлялась возможность использования на удобрительные цели отходов химической промышленности. Доказана возможность внесения отработанного силикагелевого катализатора (отход производства синтетического спирта) в качестве фосфорного удобрения [29]. Выявлена целесообразность использования побочного продукта при получении акриловой кислоты, содержащего сульфат аммония [30].

Большое внимание в исследованиях на орошаемых землях Поволжья уделяли органическим удобрениям. Помимо навоза крупного рогатого скота, изучали возможность использования на удобрительные цели соломы зерновых культур [31]. Однако это направление в последующем не получило широкого распространения. Зато на

темно-каштановых почвах Заволжья большое внимание уделяли изучению зеленого удобрения [10, 13, 32–36]. Учеными Саратовского СХИ было установлено, что введение бобовых однолетников в полевые орошаемые севообороты служит важным средством поднятия плодородия почвы. Испытание различных способов использования посевов гороха и тригонеллы (на зерно, зеленую массу и сидерацию) показало, что они оказывали неодинаковое влияние на элементы почвенного плодородия.

Основные посевы гороха и тригонеллы на зерно и зеленую массу заметно влияли в течение 2-х лет на мобилизацию подвижных азотных и фосфорных соединений в почве. Влияние гороха, убираемого на зерно, проявлялось на урожае 2-х зерновых культур. Пожнивные бобовые, выращиваемые на зеленую массу, улучшали условия азотного и фосфорного питания преимущественно под первой и последующей культурой.

Особенно заметно повышала плодородие орошаемых земель запашка бобовых сидератов. Под влиянием зеленого удобрения в почве увеличивалось содержание гумуса и общего азота, улучшались водно-физические свойства (сложение, структура, водный режим) и пищевой режим (запасы усвояемых форм азота и фосфора). Положительное влияние бобовых сидератов в занятом пару на элементы почвенного плодородия наблюдали в течение продолжительного периода (3–4 года).

Положительное действие пожнивных бобовых, выращиваемых на зеленую массу, заканчивалось на урожае 2-й культуры, прибавки которого, по данным за 1966 и 1968 гг., составили всего 1.0 ц/га, а бобовых весеннего сева на зеленую массу – на 3-й культуре (прибавка урожая силосной массы кукурузы равнялась 8–11 ц/га).

Применение зеленого удобрения в пару обеспечивало получение наибольших прибавок 4-х последующих культур. Запашка пожнивного удобрения заметно снижала прибавки урожая индикаторных культур. Однако этот срок внесения зеленого удобрения позволял получать в год запашки сидерата урожай зерна яровой пшеницы 26.5 ц/га (среднее за 3 года).

Заделку зеленого удобрения в темно-каштановые поливные почвы Заволжья более целесообразно производить за счет промежуточных, в частности, пожнивных посевов бобовых растений [7, 8, 10]. Пожнивное зеленое удобрение по сравнению с сидеральным паром быстрее окупает затраты на их применение и позволяет получать наибольшее количество добавочного товарного зерна [10].

По данным Саратовского ГАУ, на орошаемой темно-каштановой почве сухостепного Заволжья при заделке 3-го укоса многолетних сидеральных культур в почву поступает от 5.0 до 8.23 т/га свежего органического вещества [11]. Наибольшее поступление органического вещества в почву обеспечивает люцерна синегибридная 3-го года жизни. Бобовые и злаково-бобовые сидеральные удобрения способствовали поступлению достаточного количества азота в почву – 86–120 кг д.в./га.

Сидерация оказывает положительное действие на физическое состояние деградированной староорошаемой темно-каштановой почвы. Наибольший эффект обеспечивает запашка люцерны синегибридной 3-го года жизни, в результате которой на конец звена кормового севооборота достигается снижение плотности почвы на 0.11 г/см^3 и увеличение общей пористости на 8.2%.

Применение сидерации в звене кормового севооборота не обеспечивало создание бездефицитного баланса азота. Запашка сидеральной массы козлятника и люцерны способствовала уменьшению дефицитности баланса азота на 2.1–7.5%. Использование сидератов повышало урожайность культур звена кормового севооборота в прямом действии и последействии. Наибольший эффект в прямом действии достигался при запашке козлятника восточного 6-го года жизни, обеспечивая прибавку урожайности силосной травосмеси на 13.3%. В последействии наибольшую прибавку урожая (3.6%) обеспечивала запашка на зеленое удобрение люцерны синегибридной 3-го года жизни.

Одним из негативных последствий длительного интенсивного использования орошаемых земель является ухудшение их агрохимических свойств и, в первую очередь, снижение содержания гумуса, ухудшение его качественного состава. Результаты исследований, проведенных в ОПХ ВолжНИИГиМ Энгельсского р-на Саратовской обл., показали, что процесс минерализации гумуса в орошаемых землях Саратовского Заволжья был более выраженным по сравнению с неорошаемыми землями. Например, за 20 лет (с 1964 по 1984 гг.) содержание гумуса в орошаемой темно-каштановой почве ОПХ ВолжНИИГиМ уменьшилось на 1%, в то время как в неорошаемых условиях в данном подтипе почв в среднем по Саратовской обл. – на 0.7% [13].

Было установлено, что дегумификация усиливалась с увеличением периода орошения и интенсификации земледелия. Изучение динамики изменения содержания гумуса в темно-каштановой почве показало, что с 1948 по 2008 гг. содержание

гумуса уменьшилось с 3.80 до 2.66%. Была установлена регрессионная зависимость содержания гумуса в орошаемой террасовой темно-каштановой почве хозяйства от времени за 60-летний период. Она носит нелинейный характер и описывается уравнением (критерий Нэша–Сатклиффа = = 0.89):

$$C = 0.0002T^2 - 0.84T + 852.7,$$

где С – содержание гумуса, %; Т – год.

Согласно этой зависимости, ежегодное уменьшение содержания гумуса за рассматриваемый период составило в среднем 0.02% в абсолютных единицах. При этом скорость процесса дегумификации почв ОПХ ВолжНИИГиМ значительно изменялась в течение 60-летнего периода. За первые 20 лет содержание гумуса снижалось в среднем на 0.01% в год. В последующем темпы этого снижения значительно возросли. Наряду с чередованием циклов увлажнения–высушивания почвы такое ускорение этого процесса было обусловлено значительной интенсификацией растениеводства, приведшей к существенному увеличению урожайности поливных культур и выноса ими элементов питания.

Суммарное отчуждение азота возделываемыми культурами возросло за рассмотренный период в 1.94 раза. Примененные дозы азотных удобрений не обеспечивали компенсации увеличивающегося выноса азота. Это привело к созданию постоянного дефицитного баланса этого элемента, повлекшего за собой уменьшение содержания органического вещества почвы и снижение запасов гумуса на 30% по сравнению с исходным.

Определенную роль сыграло и увеличение в структуре посевов доли пропашных культур, отсутствие азотфиксирующей способности у регулярно удобряемой люцерны, уменьшение объемов внесения навоза.

Уменьшение запасов гумуса в почве сопровождалось ухудшением его качественного состава. Негативное воздействие более чем полувекового орошения отразилось на снижении в почве ОПХ ВолжНИИГиМ содержания суммы гуминовых кислот (**ГК**), отношения суммы ГК к сумме фульвокислот (**ФК**) – с 2.5–2.2 до 2.3–2.0 и негидролизуемого остатка. В процессе орошения уменьшилась доля подвижных соединений гумусовых веществ и увеличилось содержание консервативной части гумуса.

Поэтому важной задачей являлась разработка систем удобрения, обеспечивающих поддержание бездефицитного или положительного балансов гумуса в деградированных, длительно орошавшихся почвах. С этой целью на сильно дегумифицированных в процессе длительного орошения темно-каштановых почвах в ОПХ ВолжНИИГиМ был заложен стационарный опыт. В 6-польном зернотравянопропашном севообороте (озимая пшеница – кукуруза на силос – горохоовсяная смесь – озимая пшеница + люцерна – люцерна – люцерна) изучали влияние разных систем удобрения, основанных на использовании органических (навоза), минеральных, органо-минеральных удобрений и недостаточного, умеренного и повышенного водообеспечения на содержание гумуса. Дозы удобрений рассчитывали методом прогнозного ротационного баланса.

Предполивную влажность в активном слое почвы поддерживали при недостаточном водообеспечении на уровне 60% НВ, при умеренном – 70% НВ в критические периоды развития культур и 60% НВ в остальные; при повышенном водообеспечении – 80% НВ в критические периоды и 70% НВ – в остальные периоды. Результаты исследований показали, что для сохранения и повышения содержания гумуса в длительно орошаемой сильно дегумифицированной темно-каштановой почве наиболее эффективной была комплексная органо-минеральная система удобрения [9].

При внесении среднегодовых доз навоза 26.6 т/га и минеральных удобрений N109P17K15 при недостаточном поливном режиме и N153P29K15 – при умеренном за 6-летнюю ротацию было достигнуто небольшое увеличение содержания гумуса (соответственно на 0.07 и 0.17%). Значительного увеличения содержания гумуса (на 0.53%) удалось добиться путем применения высокой дозы навоза и минеральных удобрений (среднегодовые дозы – 53.3 т/га и N196P73K28 соответственно).

В стационарных опытах на Ершовской опытной станции изучали приемы воспроизводства плодородия орошаемых темно-каштановых почв сыртового Заволжья и приемы управления минеральным питанием сельскохозяйственных культур [37]. Результаты многолетних исследований показали, что при отрицательном балансе органических веществ в почве трудно- и негидролизуемые формы азота являлись основными первичными источниками образования гумусовых кислот, легкогидролизуемого органического и минерального азота, а при положительном балансе – основными формами биологического закрепления азота и углерода.

При этом положительный баланс гумуса в почве (+0.50 т/га в год) и общего азота (+26.9 кг/га в год) складывался только при применении органо-

минеральных систем удобрения (навоз 80 т/га + + N45P53,2 ежегодно + пожнивно-корневые остатки (**ПКО**) люцерны) локально в слое 0–40 см. Это происходило за счет минерализации органического вещества с узким соотношением C : N, которое дважды в течение 8-ми лет массированно поступало в почву, минерализуясь на 73% в слое 0–40 см и на 68% в слое 0–100 см при коэффициенте гумификации органического углерода 16% и фульватном типе гумуса.

При вовлечении в активный биохимический круговорот различных форм азотосодержащих органических веществ во всем профиле почвы стабилизация гумусового комплекса была возможна только путем непрерывного воспроизводства биотермодинамически устойчивого гумуса. Это достигалось при положительном балансе органических веществ с умеренным соотношением C : N преимущественно за счет побочной продукции агроценозов, возделывания многолетних трав, применения минерального азота под небобовые культуры на фоне нисходящей миграции свободных гумусовых кислот с последующим их закреплением в почве.

При коэффициентах симбиотической азотфиксации в надземной биомассе люцерны 2–3-го года жизни >0.8, а в ПКО – >0.7, неудобряемая азотом люцерна за 3 года жизни вовлекала в биологический круговорот общего азота 864–1180 кг/га, в том числе 80–82% – симбиотически фиксированного, и в почве под травами складывался слабовыраженный положительный баланс азота. На обогащение почвы азотом сверх его потребления из почвы урожаями тратилось 3–5% от количества азота, вовлеченного в круговорот. Активное использование азота почвы и минерализующихся корневых остатков вегетирующей люцерной существенно снижало запасы биологического азота в почве после многолетних трав с формированием отрицательного баланса азота в почве.

Экологическая опасность загрязнения почвогрунтов мигрирующим азотом возникает при поступлении биофильных минеральных и органических азотсодержащих веществ в размерах, существенно превышающих ассимиляцию азота микробиотой и растениями за вегетацию.

Систематическое внесение фосфора с удобрениями в дозах, превышающих его вынос с урожаями, существенно обогащало слой 0–40 см почвы общим фосфором. При этом происходило увеличение содержания минеральных фосфатов I–II фракции (по Чангу–Джексону) почти во всем почвенном профиле, но с резким возрастанием потерь общего фосфора из слоя 40–100 см почвы [37]. Разрушение минеральных высокоосновных фосфатов почвы в слое 40–100 см происходило в результате гидролитического воздействия как мигрирующих минеральных удобрений, так и фульвокислот, образующихся при минерализации большой массы органических удобрений и пожнивно-корневых остатков люцерны с узким соотношением C : N.

При снижении азотминерализующей способности орошаемой почвы решающим фактором формирования высокопродуктивных агроценозов была оптимизация их азотного питания путем применения, главным образом, азота минеральных удобрений под небобовые культуры. Высокая эффективность фосфорных удобрений была возможна на почвах с низким содержанием подвижного фосфора. При больших запасах в почве общего и обменного калия непрерывное восстановление запасов обменного калия путем систематического применения K120 не влияло на условия калийного питания растений.

Применение навоза с минеральным азотом сужало отношение C : N в почве, усиливало минерализацию органических веществ в период вегетации с дополнительным накоплением подвижных элементов. Это существенно повышало уровень минерального питания растений и общую агроэкономическую эффективность использования почвы при меньших потерях азота почвы и удобрений.

Азотные удобрения не влияли существенно на урожай биомассы люцерны и содержание в ней протеина. Складывающийся в результате синергического эффекта высокий уровень азотного питания яровой твердой пшеницы, идущей после пласта люцерны, обеспечивал формирование высококачественного зерна до 4.0–4.5 т/га без применения азотных удобрений.

Потенциальная способность сильных сортов мягкой озимой и яровой пшеницы к формированию высококачественного зерна реализовалось путем создания относительно избыточного азотного питания в онтогенезе, когда дальнейшее его усиление существенно не повышало урожай зерна. Усиление фосфорного питания, как правило, ухудшало качество зерна [37].

На орошаемых темно-каштановых почвах Поволжья большое внимание уделялось исследованиям эффективности удобрений и прогрессивных систем орошения на плантациях овощных культур. Исследования в этом направлении были начаты Саратовским СХИ в начале 1970-х гг. [38]. Полученные результаты показали, что при возделывании огурца в условиях орошения требуется

полное минеральное удобрение. В дальнейшем, при проведении так называемых экономических реформ, оросительные системы, где поливы осуществлялись дождеванием, были разрушены. Овощные культуры стали возделываться в Заволжье при внутрипочвенном капельном поливе и использовании мелкодисперсного дождевания. Это потребовало внесение определенных коррективов в агрохимические исследования.

Например, в Саратовском ГАУ изучали влияние удобрений, режимов капельного орошения, а также гуминовых препаратов на свойства темно-каштановых почв и урожайность томата, перца сладкого, капусты белокочанной, баклажана, огурца, других овощных культур и картофеля [39–46]. Установлено, что внесение минеральных удобрений в расчетных дозах N100P50K40 и N190P80K70 способствовало улучшению азотного и фосфорного режимов темно-каштановых террасовых почв: содержание аммиачного азота в период высадки рассады перца сладкого увеличивалось в удобренных вариантах на 47–59%, нитратного – на 42–60%, доступного фосфора – на 38–49%. Положительное влияние азотных и фосфорных удобрений на азотный режим почвы отмечено до периода биологической спелости плодов перца сладкого. Внесение калийных удобрений не приводило к заметным изменениям содержания обменного калия в темно-каштановой почве [39].

При выращивании перца сладкого на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья общий вынос азота составил 119–323, фосфора – 41.5–108, калия – 186–589 кг/га. Значительных различий в выносе элементов питания между гибридом Фламинго и сортом Подарок Молдовы не выявлено. Внесение расчетных доз удобрений увеличивало общий вынос азота гибридом Фламинго в 1.43–2.39, фосфора – в 1.32–2.33, калия – в 1.12–1.96 раза; сортом Подарок Молдовы соответственно в 1.27–1.84, 1.23–2.12 и 1.12–1.96 раза. Повышение предполивного порога влажности с 70 до 80% НВ также увеличивало общий вынос элементов питания.

Дозы удобрений и режимы капельного орошения не оказывали заметного влияния на структуру потребления элементов питания различными органами растений перца сладкого: основное их количество шло на формирование ботвы, наименьшее – корневой системы. У сорта Подарок Молдовы доля от потребления всех элементов питания на формирование плодов была больше по сравнению с гибридом Фламинго.

Средний во всех вариантах опыта вынос на 1 т товарной продукции гибрида Фламинго составил: азота – 4.62, фосфора – 1.61, калия – 8.59 кг д.в. и был значительно меньше, чем сорта Подарок Молдовы: соответственно 5.60, 2.15 и 9.38 кг д.в. Наиболее благоприятные условия для экономного расходования элементов питания на построение единицы товарной продукции складывались при расчетной дозе удобрений на урожай 40 т/га и режиме 80% НВ для гибрида Фламинго и 70% НВ – для сорта Подарок Молдовы. Ни один из изученных режимов капельного орошения перца сладкого не приводил к достоверному изменению плотности, пористости и структуры темно-каштановой террасовой среднесуглинистой почвы.

В опытах с капустой белокочанной определены ее биоклиматические коэффициенты ($K_б$) при выращивании в Саратовской обл. Их максимум приходился на период начало завязывания кочана–техническая спелость и составлял 0.35–0.42 мм/мб или 0.20–0.18 мм/°С, в среднем за вегетационный период $K_б$ культуры был равен 0.38 мм/мб или 0.19 мм/°С [40]. Наиболее эффективно почвенная влага и поливная вода использовались при режиме капельного орошения 70% НВ и расчетной дозе удобрений на урожай 70 т/га: коэффициент водопотребления составил 63.3, использования оросительной воды – 29.3 $м^3$/т.

На почвах степной зоны с высоким содержанием гумуса, доступного фосфора и обменного калия общее потребление азота капустой белокочанной поздней достигало 187, фосфора – 57.4, калия – 253 кг/га, общий вынос соответственно – 172, 52.9 и 233 кг/га. Интенсификация поливного режима, внесение минеральных удобрений и повышение их доз увеличивали общий вынос элементов питания.

Вынос элементов питания на 1 т товарной продукции сорта Амагер 611 составил: азота – 1.76, фосфора – 0.53, калия – 2.4 кг д.в., гибрида Колобок F1 соответственно – 1.27, 0.39 и 1.74 кг д.в. Интенсификация режима орошения капусты белокочанной поздней не оказывала заметного влияния на вынос NPK 1 т продукции. Применение удобрений, особенно в высоких дозах, увеличивало вынос элементов питания на единицу товарной и соответствующее количество побочной продукции.

Повышение предполивного порога влажности почвы и внесение изученных доз минеральных удобрений достоверно повышало урожайность капусты белокочанной поздней. По мнению авторов, наилучшим сочетанием факторов, форми-

рующих урожай, было: режим капельного орошения 90% НВ и расчетная доза NHK на урожай 70 т/га, обеспечившие наибольшую урожайность сорта Амагер 85.6 т/га и гибрида Колобок F1 69.6 т/га, а также высокую окупаемость удобрений.

Интенсификация водного питания способствовала снижению содержания в кочанах капусты белокочанной поздней сухих веществ, сахаров и витамина С соответственно на 10.0, 7.5 и 7.9%. Улучшение условий минерального питания положительно влияло на данные показатели качества. Несмотря на это, внесение удобрений и увеличение их доз повышало на 15.8–47.5% содержание в кочанах нитратов, но оно было значительно меньше ПДК [40].

В опытах Саратовского ГАУ с баклажанами было установлено, что самое эффективное использование влаги 54.0 $м^3$/т и оросительной воды 40.1 $м^3$/т достигалось при сочетании режима капельного орошения 90% НВ и расчетной дозы удобрений на урожай 80 т/га [41].

На почвах с высоким содержанием гумуса и высокой обеспеченностью доступным фосфором и обменным калием общее потребление баклажанами азота достигало 348, фосфора – 90.0, калия – 561 кг/га, общий вынос соответственно – 321, 82.0 и 532 кг/га. Сорт Алмаз выносил азота больше на 3.7, фосфора – на 12.6, калия – на 7.5% по сравнению с сортом Черный красавец.

Внесение расчетных доз удобрений увеличивало общий вынос азота сортом Черный красавец на 11.4–57.9%, фосфора – на 14.9–44.3, калия – на 19.7–54.9%, сортом Алмаз – соответственно на 24.0–55.8, 25.3–52.5 и 26.4–50.6%. Повышение предполивного порога влажности с 70 до 80 и с 70 до 90% НВ увеличивало общий вынос азота сортом Черный красавец на 2.3–27.0, фосфора – на 9.5–16.3, калия – на 2.2–17.5%, сортом Алмаз – соответственно на 17.6–34.0, 17.7–12.2, 10.3–20.9%.

Режимы капельного орошения и дозы удобрений не оказывали заметного влияния на структуру потребления элементов питания различными органами растений: основное количество азота (50.2–56.6%), фосфора (48.4–52.1%), калия (54.4–57.6%) шло на формирование листостебельной части, наименьшее – корневой системы. Сорт Алмаз характеризовался лучшей структурой потребления NPK, бóльшая доля которых расходовалась им на формирование плодов.

Вынос элементов питания 1 т товарной продукции сорта Черный красавец составил: азота – 3.27, фосфора – 0.98, калия – 6.29, сорта Алмаз: соответственно 3.56, 1.15 и 7.13 кг д.в. Интенсификация водного и минерального питания баклажан способствовала более экономному расходованию элементов питания, уменьшая вынос NPK 1 т плодов культуры.

Повышение предполивной влажности почвы и внесение изученных доз минеральных удобрений достоверно повышало урожайность баклажан. Наибольшая урожайность плодов сорта Черный красавец 88.7 т/га и сорта Алмаз 81.2 т/га получены при режиме капельного орошения 90% НВ и расчетной дозе на урожай 80 т/га.

Интенсификация водного питания способствовала увеличению содержания в плодах баклажан сухих веществ, сахаров и витамина С соответственно на 21.8, 17.0 и 35.5%. Улучшение условий минерального питания также положительно влияло на данные показатели качества. Несмотря на то, что внесение удобрений и увеличение их доз повышало содержание в плодах нитратов, оно было значительно меньше ПДК [41].

В опытах [42, 43] опрыскивание вегетирующих растений огурца и томата растворами гуминовых препаратов и хелатных микроудобрений не повлияло на питательный режим орошаемой темно-каштановой почвы. Содержание нитратного азота, обменного аммония и доступного фосфора достоверно не различалось в вариантах опыта и изменялось только под влиянием погодных условий вегетационного периода.

Обработка растворами гуминовых препаратов и хелатных микроудобрений вегетирующих растений огурца и томата увеличивала содержание азота, фосфора и калия в плодах и вегетативной массе, что способствовало повышенному накоплению надземной биомассы удобренными растениями. Гуминовые препараты и особенно их сочетания с хелатными микроудобрениями способствовали повышению водоудерживающей способности растений огурца и томата. Обработка вегетирующих растений гуматом калия-натрия с микроэлементами повышала водоудерживающую способность огурца на 13.1, томата – на 2.6%, препаратом реасил микро гидро микс – на 12.6 и 4.9% соответственно. Совместное применение гуминовых препаратов с препаратом реасил гумик N увеличило водоудерживающую способность растений огурца на 14.5 и 15.7%, томата – на 6.3 и 8.9% соответственно.

Применение гуминовых препаратов и хелатных микроудобрений увеличивало общий вынос элементов питания. Особенно значительное увеличение этого показателя отмечено при обработке препаратом реасил гидро микс, при которой общий вынос растениями огурца увеличился: азота – на 35.9, фосфора – на 33.9, калия – на 36.2%, томатами – соответственно на 19.1, 21.6 и 19.4%. Наибольший общий вынос NPK растениями огурца наблюдали при применении препарата реасил форте кальций магний бор амино, томатами – препарата реасил гумик азот на фоне применения реасила гидро микс.

Гуминовые препараты и хелатные микроудобрения не оказывали заметного влияния на вынос элементов питания на единицу товарной и соответствующее количество побочной продукции. Средний во всех вариантах опыта вынос NPK на 1 т плодов огурца составил: азота – 3.17, фосфора – 1.60, калия – 4.56 кг, томатов – соответственно 4.37, 1.98 и 4.23 кг.

На орошаемых темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья наибольшая урожайность плодов огурца 31.0 и 31.1 т/га получена при применении на фоне препарата реасил микро гидро микс, препаратов реасил форте азот гумик и реасил форте кальций магний бор: томата – 79.0 т/га – при применении реасила микро амино меди на фоне гумата калия-натрия с микроэлементами.

Прибавка урожая огурца в результате применения гуминовых препаратов и хелатных микроудобрений была обусловлена в основном увеличением средней массы плода (на 7–24%) и их количества на единице площади (на 51–40%), томата – повышением средней массы плода (на 10–18%) и их количества на одном растении (на 20–22%).

Гуминовые препараты и хелатные микроудобрения способствовали большему накоплению сахаров и увеличивали содержание витамина С в плодах огурца соответственно на 11–13 и 7–8%, томата – на 9–10 и 7–12%. Содержание нитратов в плодах огурца и томата было в 4–6 раз меньше ПДК [45].

При возделывании огурца гибрида F_1 Меринго на орошаемых темно-каштановых почвах Саратовского Левобережья для получения урожайности плодов 31.1 т/га авторы рекомендовали после появления 2-й пары настоящих листьев обрабатывать растения раствором препарата реасил микро гидро микс в норме 1.0 л/га, в фазах цветения и начала плодообразования проводить опрыскивания растений раствором препарата реасил форте карб кальций магний бор в норме 1.0 л/га.

При возделывании томата сорта Новичок красный для получения кондиционных плодов 79.0 т/га рекомендовали: через 5–8 сут после высадки рассады обрабатывать растения раствором гумата калия-натрия с микроэлементами в норме 1.0 л/га, в фазах цветения и начала плодоношения проводить опрыскивания препаратом реасил микро амино медь в норме 1.0 л/га [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Массовые агрохимические исследования на орошаемых темно-каштановых почвах Поволжья были развернуты в конце 1960-х–начале 1970-х гг. За истекший период сельскохозяйственными научными учреждениями и высшими учебными заведениями проведена большая работа, в которой неоценимую научную и методическую помощь в ее осуществлении оказала Географическая сеть опытов с удобрениями. Исследования проводили как в краткосрочных, так и в многолетних стационарных опытах.

Установлено, что систематическое внесение органических удобрений и их сочетаний с минеральными повсеместно оказывало положительное влияние на содержание в орошаемой темно-каштановой почве гумуса и доступных для растений соединений азота и фосфора. Улучшение плодородия орошаемых почв также достигали при включении в севообороты многолетних бобовых трав (2–3 поля). Выявлена отзывчивость зерновых, зернобобовых, кормовых и технических культур на различные виды и дозы минеральных удобрений. Определены дозы и сочетания удобрений, позволяющие получать максимальные в условиях сухой степи прибавки урожая и улучшающие качество получаемой продукции.

В последние годы, в связи с ликвидацией крупных оросительных систем с поливами дождеванием, увеличиваются площади внутрипочвенного полива, в том числе капельного орошения. Его используют главным образом при возделывании овощных культур. Это оказало большое влияние на направленность агрохимических исследований. Выполнены работы по удобрению культур томата, огурца, перца сладкого, капусты белокочанной, баклажана, картофеля и других овощных культур. Они позволили установить не только оптимальные при данном способе полива дозы минеральных удобрений, но и оценить эффективность различных видов препаратов на основе гуминовых кислот и хелатных форм микроудобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Делиникайтис С.А.* Краткий обзор состояния, работ и перспектив Валуйской мелиоративной станции им. П.А. Костычева (1894–1929). Покровск, 1930. 185 с.
2. *Константинов П.Н., Кубарева А.В., Быстров В.С.* Краткий обзор деятельности Краснокутсткой с.-х. опытной станции. Саратов: Юго-Восточное обл. изд-во, 1923. 57 с.
3. *Садовников И.Ф.* Почвы южного Заволжья как объект орошения. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 491 с.

4. *Антипов-Каратаев И.Н., Филиппова В.Н.* Влияние длительного орошения на процессы почвообразования и плодородия почв степной полосы Европейской части СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 206 с.
5. *Горелик Л.А.* Агрохимическая характеристика темно-каштановых террасовых почв и эффективность удобрений в условиях орошения: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1968. 20 с.
6. *Барановская В.А.* Влияние орошения на современный почвообразовательный процесс // Динамика почвенных процессов и плодородия орошаемых земель: сб. научн. тр. Волгоград, 1990. С. 22–35.
7. *Пожилов В.И.* Рациональное применение удобрений как фактор повышения продуктивности орошаемых культур и плодородия почвы в Нижнем Поволжье: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Ленинград–Пушкин, 1991. 40 с.
8. *Пронько В.В., Левина В.С., Панасов М.Н.* Агрохимические свойства каштановых почв Саратовского Заволжья и их трансформация при антропогенном воздействии // Аграр. научн. журн. 2010. № 4. С. 21–25.
9. *Пронько Н.А., Романова Л.Г., Фалькович А.С.* Изменение плодородия орошаемых каштановых почв Поволжья в процессе длительного использования и научные основы его регулирования. Саратов: Изд-во СаратовГАУ, 2005. 220 с.
10. *Радов А.С., Столыпин Е.И.* Удобрение в орошаемом земледелии. М.: Наука, 1978. 390 с.
11. Научные основы и рекомендации по применению удобрений в Нижнем Поволжье / Под ред. Минеева В.Г., Чуб М.П. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1976. 192 с.
12. Рекомендации по применению минеральных удобрений на орошаемых землях / Под ред. Марченко А.Н. М.: Колос, 1977. 48 с.
13. Эффективность удобрений на орошаемых и осушаемых землях: Бюл. Географ. сети опытов с удобрениями. М.: ВИУА, 1977. Вып. 36. 105 с.
14. *Минеев В.Г.* Развитие агрохимических исследований и практика химизации земледелия в Поволжье // Мат-лы регион. совещ. Геосети опытов с удобрениями в Поволжье: Казань, 17–18.09.2009 г. М.: ВНИИА, 2014. С. 3–19.
15. *Левина В.С.* Изменение агрохимических свойств каштановых почв Саратовского Заволжья при сельскохозяйственном использовании и внесении удобрений: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2010. 16 с.
16. *Пронько В.В., Корсаков К.В., Говряков А.С., Алинкина Т.А., Гатаулин Т.С., Фомичев Г.А., Цверкунов С.В., Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А.* Способы и приемы повышения эффективности применения удобрений в агроценозах Поволжья // Бюл. Геосети опытов. Вып. 19 / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2015. 44 с.
17. *Пронько В.В.* Сравнительная эффективность органических, минеральных удобрений и их сочетаний в звеньях орошаемого севооборота на темно-каштановой почве Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1981. 20 с.
18. *Белоголовцев В.П.* Влияние минеральных удобрений на продуктивность гороха в условиях темно-каштановых почв Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1968. 24 с.
19. *Губанов П.Е., Калиберда К.П., Кормилицын В.Ф.* Соя на орошаемых землях Поволжья. М.: Россельхозиздат, 1987. 94 с.
20. *Чуб М.П., Мурсанов В.П.* Влияние микроудобрений на урожай и сахаристость корней сахарной свеклы в условиях орошения // Химия в сел. хоз-ве. 1971. № 7. С. 25–27.
21. *Кравченко В.В.* Влияние органических и минеральных удобрений на питание, рост и продуктивность орошаемой кормовой свеклы на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1983. 16 с.
22. *Голубев В.Д., Пронько В.В.* Удобрение и урожай подсолнечника при орошении // Зерн. хоз-во. 1978. № 5. С. 19–20.
23. *Гречкин В.И.* Влияние орошения и удобрений на урожай и качество зерна сортов яровой пшеницы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1970. 26 с.
24. *Подгорнов В.Г.* Влияние минеральных удобрений на урожай и качество зерна яровой пшеницы на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1973. 20 с.
25. *Колчина Н.А.* Влияние минеральных удобрений и режимов орошения на урожай короткостебельных сортов яровой пшеницы в Саратовском Заволжье: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 1979. 22 с.
26. *Райков В.Н.* Диагностика минерального питания озимой и яровой пшениц на орошаемых темно-каштановых почвах Поволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1988. 20 с.
27. *Медведев И.Ф.* Применение азотных удобрений под орошаемую кукурузу на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1973. 18 с.
28. *Титов В.Н.* Влияние орошения и различных доз минеральных удобрений на урожай и качество продукции кукурузы при различной глубине увлажняемого слоя: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1981. 28 с.
29. *Голубев В.Д., Белоголовцев В.П., Пронько В.В.* Новое фосфорное удобрение // Химия в сел. хоз-ве. 1976. № 5. С. 21–23.
30. *Глебов И.П.* Испытание отходов от производства акрилатов в качестве удобрений яровой пшеницы при орошении в Заволжье: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1983. 16 с.
31. *Иванов П.К., Дедюрина Л.А.* Солома и тригонелла как удобрение в условиях орошения // Вестн. сел.-хоз. науки. 1979. № 2. С. 45–48.
32. *Гаврилов А.М.* Интенсивное использование орошаемых земель. М.: Колос, 1971. 190 с.
33. *Голубев В.Д.* Зеленое удобрение в орошаемом земледелии // Применение удобрений на орошаемых землях. Сб. научн. тр. М.: Колос, 1977. С. 75–95.
34. *Голубев В.Д.* Применение удобрений на орошаемых землях. М.: Колос, 1977. 192 с.

35. *Кормилицин В.Ф.* Влияние способов использования некоторых однолетних бобовых на плодородие темно-каштановой почвы и урожай зерновых культур в условиях орошения Саратовского Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1969. 22 с.
36. *Лим Ю.Р.* Влияние сидерации на плодородие орошаемой темно-каштановой почвы сухостепного Заволжья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2006. 24 с.
37. *Бокарев В.Г.* Воспроизводство плодородия орошаемых темно-каштановых почв Поволжья и управление минеральным питанием сельскохозяйственных культур: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Саратов, 2000. 46 с.
38. *Назаров В.А.* Влияние минеральных удобрений на урожай огурцов в Саратовском Заволжье при орошении: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1983. 22 с.
39. *Пронько Н.А., Новикова Ю.А.* Продуктивность перца сладкого и вынос элементов питания при разных дозах минеральных удобрений и режимах капельного орошения на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья // Макро- и микроэлементы в питании и продуктивность растений. Тр. КубанГАУ. Краснодар, 2010. С. 52–57.
40. *Пронько Н.А., Рябцева Т.Г.* Влияние удобрений на урожайность капусты белокочанной при капельном орошении в Саратовской области // Экологическая стабилизация аграрного производства: Мат-лы Международ. научн. конф. Саратов: НИИСХ Юго-Востока, 2015. С. 55–60.
41. *Пронько Н.А., Бикбулатов Е.И., Голик К.С.* Эффективность минеральных удобрений при выращивании овощных культур при капельном поливе на черноземе южном в Саратовском Правобережье // Агрохимикаты в 21 веке: теория и практика применения: Н. Новгород, Нижегородская ГСХА, 2017. С. 109–112.
42. *Пронько В.В., Степанченко Д.А., Пронько Н.А.* Влияние гуминовых препаратов на продуктивность огурца на орошаемых каштановых почвах Саратовского Заволжья // Аграр. научн. журн. 2018. № 2. С. 31–35.
43. *Пронько Н.А., Степанченко Д.А., Пронько В.В.* Влияние гуминовых препаратов на продуктивность томата на орошаемых каштановых почвах Саратовского Заволжья // Аграр. научн. журн. 2017. № 9. С. 27–27.
44. *Мелихов В.В., Новиков А.А.* Оптимальный режим капельного орошения и минерального питания раннего картофеля // Картофель и овощи. 2011. № 8. С. 16–17.
45. *Пронько Н.А., Бикбулатов Е.И.* Использование воды и удобрений при капельном поливе томатов // Научн. жизнь. 2015. № 6. С. 78–85.
46. *Степанченко Д.А.* Влияние гуминовых препаратов и хелатных микроудобрений на продуктивность огурцов и томатов в Саратовском Заволжье при орошении: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2018. 20 с.

Influence of Fertilizers on Fertility of Irrigated Dark Chestnut Soils of the Volga Region and Productivity of Agricultural Crops

V. V. Pronko[a], N. A. Pronko[b], O. V. Rukhovich[c], M. V. Belichenko[c,#], V. A. Romanenkov[c,d], T. M. Yaroshenko[e], N. F. Klimova[e], and D. Yu. Zhuravlev[e]

[a] Scientific Production Association "Life Force"
ul. Bolshaya Sadovaya, 239, Saratov 410005, Russia
[b] N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University
ul. Sovietskaya 61, Saratov 410012, Russia
[c] D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia
[d] M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskiye Gory 1, p. 12, Moscow 119992, Russia
[e] Agricultural Research Institute of South-East Region
ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia
[#] E-mail: mvbelichenko@gmail.com

The analysis of the results of agrochemical studies of scientific institutions of the Volga region, carried out on irrigated dark chestnut soils. The influence of various types of organic (manure, green manure) and mineral fertilizers on agrochemical properties: the content and balance of humus, nitrogen, phosphorus and potassium is shown. High efficiency of green fertilizer was noted for intermediate and main crops, as well as perennial leguminous herbs. The combination of organic fertilizers and crops of perennial grasses at the present stage of agriculture development is the main way to reproduce the fertility of irrigated dark chestnut soils of the dry steppes of the Volga region. The results of the use of mineral fertilizers, preparations based on humic acids and chelated forms of micronutrient fertilizers on vegetable crops under the conditions of drip irrigation are considered.

Key words: irrigation, Volga region, dark chestnut soils, fertilizers, grain, fodder, industrial and vegetable crops.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 64–68

УДК 631.95:631.416.1:631.445.24:631.559

ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ ДОЗ ОСАДКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД НА АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2020 г. В. А. Касатиков

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, п. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия
E-mail: kasv47@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.11.2019 г.
После доработки 15.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Исследовано влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим и биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы. Показано положительное влияние повышенных доз осадка городских сточных вод и различных уровней известкования на содержание подвижных форм азота, биологическую активность почвы, продуктивность культур зернового звена севооборота.

Ключевые слова: мелиоративные дозы, осадок городских сточных вод, азотный режим, дерново-подзолистая почва, продуктивность, зерновые культуры.

DOI: 10.31857/S0002188120060058

ВВЕДЕНИЕ

При очистке сточных вод вне зависимости от их происхождения и состава неизбежно возникает проблема утилизации образующихся осадков. Осадки городских сточных вод (***ОСВ***) содержат значительное количество органического вещества, азота и зольных элементов, в первую очередь фосфора. Это обусловливает необходимость разработки агроэкологических основ их использования в качестве органических удобрений как в сельском хозяйстве, так и в городском озеленении [1]. Целесообразность данного подхода обусловлена также и тем, что одним из основных условий сохранения экосистем в устойчивом состоянии является использования отходов как сырьевого ресурса с целью уменьшения негативного воздействия на окружающую среду [2]. Использование *ОСВ* на удобрение в исходном состоянии или же в составе компоста с органическими наполнителями – один из приемов утилизации *ОСВ* [3]. При этом по эффективности *ОСВ* не уступают традиционным органическим и минеральным удобрениям [4].

В частности, *ОСВ* и удобрения на их основе благодаря высокому содержанию органического вещества улучшают плодородие почвы и ее агрофизические свойства и повышают урожай сельскохозяйственных культур. Внесение компостов в почву проявляется во влиянии на ее агрохимические свойства, увеличении запасов органического вещества, усилении нитрификации в пахотном слое, возрастании биологической активности почвы, количества целлюлозоразлагающих бактерий и уменьшении доли плесневых грибов. Особенно отчетливо почвоулучшающие свойства компостов проявляются на песчаных, супесчаных и малоплодородных деградированных почвах [5].

Одним из наиболее важных вопросов в исследованиях с органическими удобрениями, является изучение трансформации азота в почве, и его потерь. В то же время при использовании в качестве удобрений *ОСВ* со слабощелочной или нейтральной реакцией среды важным является анализ их влияния на кислотно-основные свойства почвы. С их помощью можно улучшать деградированные песчаные почвы. Исследования по биологической активности почвы выявили, что применение *ОСВ* и удобрения на его основе увеличивает общую численность почвенных микроорганизмов, повышает каталазную активность и создает благоприятные условия для развития основных физиологических групп микробиоты почвы [6].

Таблица 1. Влияние осадка сточных вод в сочетании с известкованием на динамику содержания подвижных форм азота, микробной биомассы и целлюлозолитическую активность дерново-подзолистой супесчаной почвы (слой 0–20 см почвы) при возделывании озимой ржи

Вариант	$N\text{-}NH_4$		$N\text{-}NO_3$		$N_{мин}$ (средние за вегетационный период)		$C_{мб}$		Целлюлозолитическая активность	
	мг/кг									
	фаза колошения	фаза полной спелости	фаза колошения	фаза полной спелости	мг/кг	% к контролю	$C_{мб}$, мг/кг	% к контролю	%	% к контролю
Контроль без удобрений	0.85	1.41	0.0	0.6	0.95	–	375	–	44.7	–
ОСВ 180 т/га + + ДМ 3 т/га	0.91	1.88	0.0	0.8	1.19	125	395	105	56.8	127
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 3 т/га	0.93	2.14	0.0	1.2	1.42	149	565	150	37.3	83
ОСВ 180 т/га + + ДМ 6 т/га	0.89	1.84	0.0	0.55	1.09	115	388	103	54.8	122
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 6 т/га	0.96	2.03	0.0	0.9	1.29	136	559	149	41.7	93
ОСВ 180 т/га + + ДМ 9 т/га	0.90	1.76	0.0	0.45	1.03	108	444	118	48.4	108
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 9 т/га	0.97	1.90	0.0	1.25	1.37	144	582	155	33.0	74

Примечания. 1. *ОСВ* – осадок сточных вод, ДМ – доломитовая мука. 2. Дозы *ОСВ* – суммарные за годы исследования. То же в табл. 2–4.

Цель работы – изучение последействия мелиоративных доз *ОСВ* на азотный режим дерново-подзолистой супесчаной почвы и продуктивность зерновых культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном опыте (заложен в 1984 г.) Географической сети длительных опытов с удобрениями, изучая влияние систематического применения осадка городских сточных вод и доломитовой муки на агроэкологические свойства почвы и урожайность культур. Осадки сточных вод с очистных сооружений г. Владимира вносили с 1984 по 1995 г. ежегодно, с 2000 г. – каждые 5 лет, в сочетании с периодическим известкованием доломитовой мукой в дозах 3, 6, 9 т/га в 1984, 1990, 1995, 2006 гг. За весь период исследования суммарные дозы *ОСВ* составили 180–1440 т/га (50%-ная влажность). Повторность шестикратная. Размер делянки 1.5 × 2.0 м. Учетная площадь 3 м^2. Исследование вели в звене севооборота озимая рожь – яровое тритикале – овес. Подробно условия проведения опыта описаны в работе [1].

Почвенные образцы для исследования отбирали в слое 0–20 см в основных фазах развития зерновых культур для изучения динамики содержания минерального азота. Биологическое состояние почвы оценивали по следующим показателям: содержанию углерода микробной биомассы ($\mathbf{C_{микр}}$), определенного методом регидратации–экстракции [7], и целлюлозолитической активности – по интенсивности разложения целлюлозы [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение вегетационного периода 2016 г. при изучении действия *ОСВ* на озимую рожь определяли динамику содержания минеральных форм азота в пахотном слое почвы (0–20 см). Показали, что в течение вегетации озимой ржи содержание минерального азота в пахотном слое почвы при последействии возрастающих доз *ОСВ* превышало контроль в среднем на 108–149% в зависимости от величины доз *ОСВ* и уровня известкования. При этом, если содержание аммиачного и нитратного азота, углерод микробной биомассы находились в пропорциональной зависимости от доз *ОСВ*, то целлюлозолитическая активность в климатических условиях вегетационного периода 2016 г. находилась в обратной зависимости от доз *ОСВ* и доломитовой муки (табл. 1).

Таблица 2. Влияние последействия различных доз осадка сточных вод и уровней известкования почвы на динамику содержания подвижных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве (слой 0–20 см) при возделывании ярового тритикале

Вариант	Содержание, мг/кг								$N\text{-}NH_4 + N\text{-}NO_3$ (средние), мг/кг	% к контролю
	$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$					
	фаза всходов	фаза кущения	фаза колошения	фаза полной спелости	фаза всходов	фаза кущения	фаза колошения	фаза полной спелости		
Контроль без удобрений	1.19	0.80	0.86	0.82	4.01	0.70	Не найдено	1.08	2.35	100
ОСВ 180 т/га + + ДМ 3 т/га	1.32	0.84	0.97	1.00	4.02	1.24		1.50	2.55	109
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 3 т/га	1.69	0.84	1.64	1.02	5.63	1.79		2.58	3.80	161
ОСВ 180 т/га + + ДМ 6 т/га	1.15	1.12	1.63	1.38	3.61	1.07		1.66	2.90	123
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 6 т/га	1.23	1.04	0.97	1.40	5.25	1.35		2.79	3.50	149
ОСВ 180 т/га + + ДМ 9 т/га	1.20	1.29	0.99	1.32	4.53	0.83		1.48	3.57	151
ОСВ 1440 т/га + + ДМ 9 т/га	1.62	1.58	1.47	1.53	5.26	1.45		2.30	3.80	161

В процессе вегетации ярового тритикале в период последействия *ОСВ* в климатических условиях 2017 г. содержание минеральных форм азота в пахотном слое почвы достигало наибольших величин в начальный период развития культуры с максимальными показателями в условиях применения предельных в данном исследовании доз *ОСВ* (табл. 2). В фазах кущения и колошения содержание минеральных форм снизилось за счет потребления азота растениями в условиях избыточного почвенного увлажнения. Запасы продуктивной влаги в слое 0–20 см почвы достигали 42.5–51.3 мм. Наибольший их уровень был в вариантах с максимальными дозами *ОСВ*. Снижение влажности почвы в конце вегетации ярового тритикале способствовало увеличению содержания $N\text{-}NO_3$ в почве с минимального в фазе колошения до 1.48–2.78 мг/кг почвы в фазе полной спелости и было пропорционально дозам *ОСВ*. Следует отметить более высокий уровень накопления $N\text{-}NO_3$ в слое 0–20 см почвы при возделывании тритикале в отличии от данных, полученных в 2016 г. для озимой ржи. С одной стороны, данная закономерность была обусловлена различными климатическими условиями вегетационных периодов развития озимой ржи и тритикале, с другой стороны, – их длительностью.

Рассматривая суммарное накопление минерального азота в почве при возделывании тритикале следует отметить его пропорциональную зависимость от доз *ОСВ* с превышением относительно контроля на 8.5–61.7% (табл. 2). Такая же зависимость выявлена в исследовании различных биологических показателей почвы, таких как содержание углерода микробной биомассы ($\mathbf{C_{мб}}$) и целлюлозолитическая активность почвы. В частности, при последействии возрастающих доз *ОСВ* содержание $C_{мб}$ превышало контроль в среднем на 108–149%, а целлюлозолитическая активность – на 107–136%.

Исследование азотного режима почвы под посевом овса в климатических условиях вегетационного периода 2018 г. выявили увеличение содержания минерального азота при последействии *ОСВ* в дозах 180 и 1440 т/га на 19–23 и 60–79% (табл. 3). Влияние фактора известкования на суммарное содержание минеральных форм азота было невысоким. Повышение доз доломитовой муки с 3 до 6–9 т/га на фоне последействия 180 т *ОСВ*/га обеспечивало прирост содержания минерального азота в почве на 3.0 и 2.6%, при дозе 1440 т *ОСВ*/га – на 12–3%. Содержание $N\text{-}NO_3$ достигало максимума в фазах всходы–кущение, $N\text{-}NH_4$ – в фазе всходов. В дальнейшем в процес-

Таблица 3. Влияние последействия различных доз осадка сточных вод и уровней известкования почвы на динамику содержания подвижных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве (слой 0–20 см) при возделывании овса

Вариант	Содержание, мг/кг								$N\text{-}NH_4 + N\text{-}NO_3$ (средние), мг/кг	% к контролю
	$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$					
	фаза всходов	фаза кущения	фаза колошения	фаза полной спелости	фаза всходов	фаза кущения	фаза колошения	фаза полной спелости		
Контроль без удобрений	3.31	1.37	2.44	1.42	2.35	1.14	2.71	0.63	3.84	100
ОСВ 180 т/га + ДМ 3 т/га	3.81	1.72	2.75	1.68	2.67	1.32	3.39	0.87	4.56	119
ОСВ 1440 т/га + ДМ 3 т/га	3.77	4.66	2.84	2.26	2.93	1.67	5.44	0.98	6.13	160
ОСВ 180 т/га + ДМ 6 т/га	3.64	3.21	2.57	1.51	2.79	1.24	3.24	0.64	4.71	123
ОСВ 1440 т/га + ДМ 6 т/га	5.84	4.46	3.10	2.18	3.71	1.68	5.62	0.86	6.86	179
ОСВ 180 т/га + ДМ 9 т/га	3.24	2.87	2.35	1.42	3.12	1.49	3.54	0.71	4.68	122
ОСВ 1440 т/га + ДМ 9 т/га	4.79	4.00	2.56	2.26	3.45	2.14	5.14	1.02	6.34	165

Таблица 4. Влияние систематического применения *ОСВ* в сочетании с известкованием на продуктивность звена севооборота озимая рожь – яровое тритикале – овес, ц з.е./га

Вариант	Озимая рожь	Яровое тритикале	Овес	Суммарная продуктивность	Прибавка	
					ц з.е./га	% к контролю
Без удобрений	35.0	16.9	15.8	67.7	–	–
ОСВ 180 т/га + ДМ 3 т/га	39.6	19.7	20.3	79.6	11.9	18
ОСВ 360 т/га + ДМ 3 т/га	43.1	22.1	23.1	88.3	20.6	30
ОСВ 720 т/га + ДМ 3 т/га	47.8	24.7	25.9	98.4	30.7	45
ОСВ 1440 т/га + ДМ 3 т/га	52.8	31.4	28.5	112.7	45.0	67
ОСВ 180 т/га + ДМ 6 т/га	40.5	20.2	18.8	79.5	11.8	17
ОСВ 360 т/га + ДМ 6 т/га	43.1	22.7	21.7	87.5	19.8	29
ОСВ 720 т/га + ДМ 6 т/га	46.9	26.4	25.3	98.6	30.9	46
ОСВ 1440 т/га + ДМ 6 т/га	53.5	31.8	28.8	114.1	46.4	69
ОСВ 180 т/га + ДМ 9 т/га	39.0	20.6	17.9	77.5	9.8	15
ОСВ 360 т/га + ДМ 9 т/га	42.3	23.1	20.4	85.8	18.1	27
ОСВ 720 т/га + ДМ 9 т/га	45.4	27.1	23.8	96.3	28.6	42
ОСВ 1440 т/га + ДМ 9 т/га	50.3	32.4	28.5	111.2	43.5	64

се нитрификации содержание $N\text{-}NH_4$ в почве снижалось. Второй пик его накопления приходился на фазу колошения. Аналогичная зависимость была выявлена при исследовании влияния *ОСВ* на биологические показатели почвы, такие как содержание углерода микробной биомассы, целлюлозолитическая активность дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Оптимизация азотного режима, агроэкологических и биологических свойств пахотного слоя почвы способствовала повышению продуктивности зерновых культур. Выявленная зависимость была систематической и проявлялась в звене севооборота озимая рожь – яровое тритикале – овес в условиях действия и последействия *ОСВ* (табл. 4).

Показано, что продуктивность культур в зерновом звене севооборота возрастала пропорционально суммарным дозам *ОСВ*. В частности, продуктивность озимой ржи в вариантах применения *ОСВ* повышалась на 10–13, 20–24, 29–37 и 42–51% в соответствии с дозами *ОСВ*. Достоверно

значимые прибавки получены на всех фонах известкования, достигая максимума при дозах доломитовой муки 3–6 т/га.

Продуктивность ярового тритикале возрастала в прямой зависимости от суммарных доз *ОСВ* на 17–22, 32–37, 46–61 и 87–94%. Достоверно значимые прибавки были получены на всех фонах известкования, достигая максимума при уровне известкования 9 т/га.

Продуктивность овса, как и для предыдущих культур звена севооборота, возрастала в прямой зависимости от суммарных доз *ОСВ* соответственно уровням известкования на 28–70, 19–71 и 13–70%. В целом по итогам исследования в звене севооборота, его продуктивность увеличивалась пропорционально дозам *ОСВ* на 15–17, 27–30, 42–46 и 64–69%. При этом продуктивность звена севооборота была максимальной при уровне известкования 6 т/га и соответствовала динамике содержания подвижных форм азота в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нетрадиционных источников питания растений в виде осадка сточных вод (*ОСВ*) оказало заметное положительное влияние на азотный режим и биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы. Выявлено положительное последействие повышенных доз *ОСВ* и различных уровней известкования на содержание подвижных форм азота, продуктивность как отдельных культур зернового звена севооборота, так и всего звена в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касатиков В.А., Черников В.А., Раскатов В.А.* Агроэкологические и технологические аспекты использования осадков городских сточных вод в качестве удобрения // Мат-лы Международ. симп. “Экологические и технологические вопросы производства и использования органических и органо-минеральных удобрений на основе осадков городских сточных вод и твердых бытовых отходов”. Владимир, 2004. С. 29–39.
2. *Касатиков В.А., Раскатов В.А., Шабардина Н.П.* Влияние микробиологических деструкторов лигнинсодержащих отходов на агроэкологические свойства компоста на основе осадка сточных вод и опилок // Докл. МСХА. 2010. Вып. 283. С. 806–811.
3. *Еськов А.И.* Ресурсы органических удобрений в сельском хозяйстве России: Информац.-аналит. справ-к. Владимир: РАСХН, ВНИИОУ, 2006. 200 с.
4. *Пахненко Е.П.* Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения. М.: БИНОМ, 2010. 311 с.
5. *Сюняев Н.К., Тютюнькова М.В., Слипец А.А.* Анализ опыта почвенного пути утилизации осадков сточных вод. М.: РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. 108 с.
6. *Чжоу Д.* Агроэкологическая оптимизация применения органо-растительных компостов на основе *ОСВ* на дерново-подзолистой супесчаной почве: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МСХА, 2005. 19 с.
7. *Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.А., Паников Н.С.* Регидратационный метод определения биомассы микроорганизмов в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 71–81.
8. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

Effect of Reclamation Doses of Sludge of Municipal Wastewater on Nitrogen Regime of Sod-Podzolic Soil and Crop Productivity

V. A. Kasatikov

All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – Branch of the Upper Volga Federal Agricultural Research Center
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, p. Vyatkino 601390, Russia
E-mail: kasv47@yandex.ru

The influence of reclamation doses of municipal wastewater sludge on the nitrogen regime and biological properties of sod-podzolic sandy loam soil was studied. The positive effect of high doses of sludge of urban wastewater and different levels of liming on the content of mobile forms of nitrogen, biological activity of soil, productivity of grain crops of a crop rotation was shown.

Key words: reclamation doses of sludge, municipal wastewater, nitrogen regime, sod-podzolic soil, crop productivity.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 69–77

Агроэкология

УДК 631.452:631.445.25:631.46:632.112(470.31)

ВЛИЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ НА АКТИВНОСТЬ МИКРОФЛОРЫ В УСЛОВИЯХ ЗАСУХИ В НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЕ РОССИИ

© 2020 г. Р. Н. Ушаков[1,*], А. В. Ручкина[1]

[1] Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева
390044 Рязань, ул. Костычева, 1, Россия
**E-mail: nasni91@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.
После доработки 20.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Демпфирующий для почвенной засухи эффект на растения выражается в способности гумуса запасать ресурсы (воду, элементы питания, энергию для почвенных процессов), с одной стороны, и влиять на их использование растениями в условиях стресса, с другой стороны. Поэтому цель исследований состояла в оценке почвенной засухи и изучении стимулирующего эффекта почвенного плодородия агросерой почвы (как показателя средообразующего потенциала) на микробиологическую активность. Изучали протеолитическую и целлюлозолитическую активность, а также активность азотобактера, количество основных групп микроорганизмов. На формирование урожайности зерна яровых культур влияние оказывали майские осадки, динамика которых указывала на усиление засушливости, а также гидротермические условия июня. В отсутствии майских и июньских осадков вероятность получения урожайности зерна яровых культур >2.0 т/га составляла всего 11%. Улучшение водообеспеченности в мае повышало вероятность до 70%. Если улучшение проявлялось только в июне, вероятность снижалась до 24%. При величине ГТК мая и июня ≈1.0 вероятность получения рентабельной урожайности зерна была ≥3.0 т/га и составляла 79%. При ГТК июня <0.7, урожайность была наиболее зависимой от гидротермических условий мая. В длительных полевых опытах с удобрениями установлена тесная связь (R = 0.7–0.9) урожайности культурных растений от величины ГТК и доз удобрений. Совместное внесение азотных, фосфорных и калийных удобрений в дозе 60–80 кг д.в./га позволило в засушливых условиях на агросерых почвах получать устойчивую урожайность яровой пшеницы и ячменя ≈3.0 т/га, картофеля – 14.4–16.5 т/га. Увеличение в агросерой почве содержания гумуса стимулировало жизнедеятельность почвенных микроорганизмов в условиях почвенной засухи. Закономерности активности азотобактера были аналогичными.

Ключевые слова: плодородие, агросерая почва, засуха, микробиологическая активность, гумус.
DOI: 10.31857/S0002188120060137

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов, лимитирующих продуктивность сельскохозяйственных растений, является почвенная засуха. В условиях богарного земледелия возникают проблемы минимизации рисков от засухи для получения запрограммированных урожаев. В этом случае необходимо исходить из понимания сложной средообразующей функции почвы. Несмотря на отсутствие взаимозаменяемости земных факторов, стимулирующие эффекты друг на друга исключать нельзя. Они проявляются благодаря почвенному плодородию, его субстантивному началу – органическому веществу, в частности, гумусу. Демпфирующий для почвенной засухи эффект на растения выражается в способности гумуса запасать ресурсы (воду, элементы питания, энергию для почвенных процессов), с одной стороны, и влиять на их использование растениями в условиях стресса, с другой стороны.

Рискованность земледелия в южной части Нечерноземной зоны РФ обусловлена проявлением почвенной засухи. Свыше 50% территории России (в отдельные годы до 75%) страдает от засухи. В целом в России в XII в. было 6 засух, в XVI, XVIII, XIX вв. – 9, 32, 70 соответственно, в XX в. количество увеличилось до 77. В настоящее время свыше 50% территории страны страдает от засухи [1]. В работах [2, 3] сказано об усилении тенденции к засушливости в континентальных районах умеренных широт. Отмечено, что согласно полученным проекциям [4], к концу XXI в. площадь суши, которая может одновременно подвергаться

Таблица 1. Агрохимические свойства агросерой почвы

Вариант	Гумус, %	$C_{ГК} : C_{ФК}$	P_2O_5, мг/кг	K_2O, мг/кг	pH_{KCl}	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$, мг-экв/100 г
ВГП	2.0 ± 0.3	2.2 ± 0.1	110 ± 22	70 ± 10	5.5 ± 0.1	23.0 ± 0.7
НГП	5.4 ± 0.7	2.6 ± 0.1	466 ± 10	407 ± 23	6.0 ± 0.3	46.3 ± 0.6

Примечание. ВГП – высокогумусированная почва, НГП – низкогумусированная почва.

воздействию экстремальной засухи, увеличится в 10–30 раз.

За период с 1891 по 2012 г. в России отмечено 33 сильных засухи в 3–7 крупных зернопроизводящих районах. За указанный выше период повторяемость таких сильных и обширных засух, охватывавших не менее 30% посевных площадей в регионах России, составила в Поволжском регионе 27, в Центрально-Черноземном, Уральском и Северо-Кавказском – 19–22, в Центральном, Волго-Вятском и Западно-Сибирском – 10–13% [5, 6].

По мнению ряда авторов, негативные последствия проявления засух в земледелии можно минимизировать за счет соответствующих мероприятий [7–11]. Эффективным по проявлению и времени способом борьбы с засухой является повышение плодородия почв. Учитывая высокую экологическую уязвимость почвенных обитателей к стрессовым условиям, в частности, к дефициту воды, их можно использовать для изучения гомеостатической функции плодородия почвы. Под ней можно понимать способность плодородия почвы обеспечивать устойчивые проявления представителями почвенной биоты их жизненных функций. На наш взгляд, такое понимание плодородия почвы позволяет более углублено осознать его важную роль.

Анализ литературных данных указывает на наличие скудных сведений в отношении возможности использования почвенных обитателей для определения устойчивости почвы. Гораздо больше информации о растениях [12–15]. Поэтому полагаем, что исследования, направленные на изучение снижения рисков от почвенной засухи за счет улучшения плодородия почвы, как фактора, усиливающего проявление средообразующей функции, в которой важную роль играет органическое вещество, являются актуальными.

Поэтому цель работы – оценка влияния почвенной засухи и изучение стимулирующего эффекта почвенного плодородия (как показателя средообразующего потенциала) на микробиологическую активность агросерой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки почвенной засухи использованы погодные условия мая и июня (критические периоды) южной части Нечерноземной зоны РФ, начиная с 1942 г. Рассчитывали гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). На основе сопоставления ГТК с урожайными данными культурных растений выведены уравнения регрессии. Схема опытов представляла 2 контрастных варианта агросерой тяжелосуглинистой почвы, различавшихся по уровню плодородия – низкогумусированной и высокогумусированной. Данные варианты представлены территориальными участками одной геохимической фации с ровным рельефом.

В опытах с моделированием почвенной засухи использованы почвенные образцы, отличавшиеся по содержанию гумуса: 2.0% (низкогумусированная почва) и 5.4% (высокогумусированная почва) (табл. 1) [16]. Почвенные образцы просеивали через сито 2 мм и подсушивали в течение 3-х сут (естественная сушка) до 14%-ной влажности от сухой почвы (естественное испарение) и поддерживали в таком состоянии в течение 10 сут. В вариантах с постоянным оптимальным условием увлажнения низкогумусированной и высокогумусированной почвы содержание воды на протяжении всего времени экспозиции 30 сут было в пределах 25–30% от сухой почвы. Изучали протеолитическую и целлюлозолитическую активность, а также активность азотобактера, количество основных групп микроорганизмов. Использовали прямое микроскопирование.

Микробиологические исследования проводили общепризнанными методами в Институте биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина (г. Пущино). В качестве основного приема предварительной обработки образцов почв для анализа численности бактерий использовали ультразвуковое диспергирование (22 кГц, 0.44 А, 2 мин) на низкочастотном диспергаторе УЗДН-1.

Грибы определяли на сусло-агаре, целлюлозоразлагающие бактерии – на среде Имшенецкого–Солнцева с карбоксиметилцеллюлозой, актиномицеты – методом посева почвенной суспензии на среду R2A (Difco) с добавлением почвенного экстракта, нистатина и налидиксовой кислоты, аммонифицирующие бактерии – на

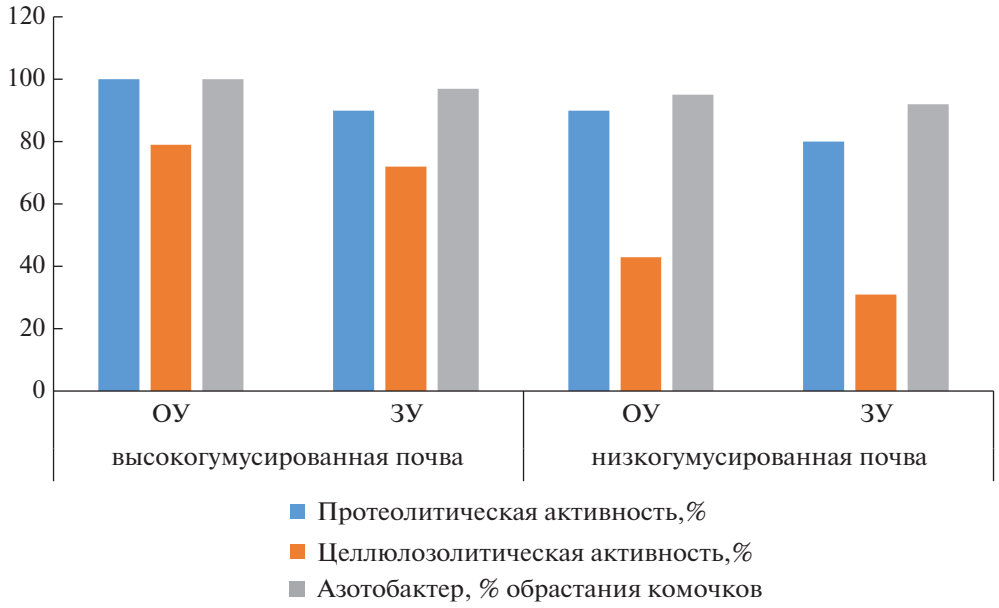

Рис. 1. Некоторые показатели биологической активности агросерой почвы в зависимости от условий увлажнения и гумусированности: ОУ – оптимальные условия, ЗУ – засушливые условия.

органических и синтетических средах. Изучение активной микрофлоры проводили модифицированным методом Холодного на агаризованных стеклах. Содержание азотобактера определяли на среде Эшби методом почвенных комочков, протеолитическую активность – на желатиновом субстрате. Активность определяли по разложению желатина (%).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методами дисперсионного, корреляционного, регрессионного и других видов статистического анализа [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Нечерноземной зоне РФ за 1942–1981 гг. число лет с весенними осадками <43 мм составило 21, за последние 30 лет – 16 лет. Расчет коэффициента соответствия χ^2 показал, что между указанными периодами в отношении осадков существуют достоверные различия: χ^2 составил 4.27 при уровне значимости 0.0389. В 7-ми случаях из 21-го количество весенних осадков составило <20 мм, средний показатель – 34 мм, в то время как за длительный период 1942–1981 гг. это было в 3-х случаях из 40. В среднем более чем за 60 лет наибольшая вероятность осадков (>50%) была в диапазоне величин от 10 до 40 мм. При этом за последние годы вероятность составила уже 76%.

Не менее значимыми, чем майские осадки, являются и июньские, хотя тесная корреляционная зависимость отсутствовала ($r < 0.5$). При некоторых комбинациях влияния майских и июньских ГТК на урожайность яровых зерновых культур получены вероятностные уравнения. В отсутствие майских и июньских осадков вероятность получения урожайности зерна 2.0 т/га составила 11%. Улучшение водообеспеченности в мае повышало ее до 70%. При ГТК мая и июня ≈1.0 получение урожайности зерна 3.0 т/га возможно в 79% случаях.

Была установлена зависимость урожайности яровых зерновых культур от величины ГТК мая в случаях, когда ГТК июня был меньше и больше 0.7. Рассчитано, что при ГТК июня <0.7 урожайность становится наиболее зависимой от гидротермических условий мая, что видно по величине коэффициента регрессии, который составил 6.55, в то время как при ГТК июня >0.7 – 0.164 т/га. По уравнениям рассчитано, что при ГТК мая = = 0.5 и июня <0.7 урожайность зерна, вероятно, не превысит 1.0 т/га, при ГТК июня >0.7 она могла быть 1.7–1.9 т/га. Таким образом, вероятность усиления засушливости климата в южной части Нечерноземной зоны в весеннее время высокая [17, 18].

Биологические показатели почвы отражают потенциал ее средообразующей функции плодородия в условиях почвенной засухи. Установлено, что протеолитическая активность высокогумусной агросерой почвы была на 10% больше по сравнению с низкогумусированной почвой как

(а)

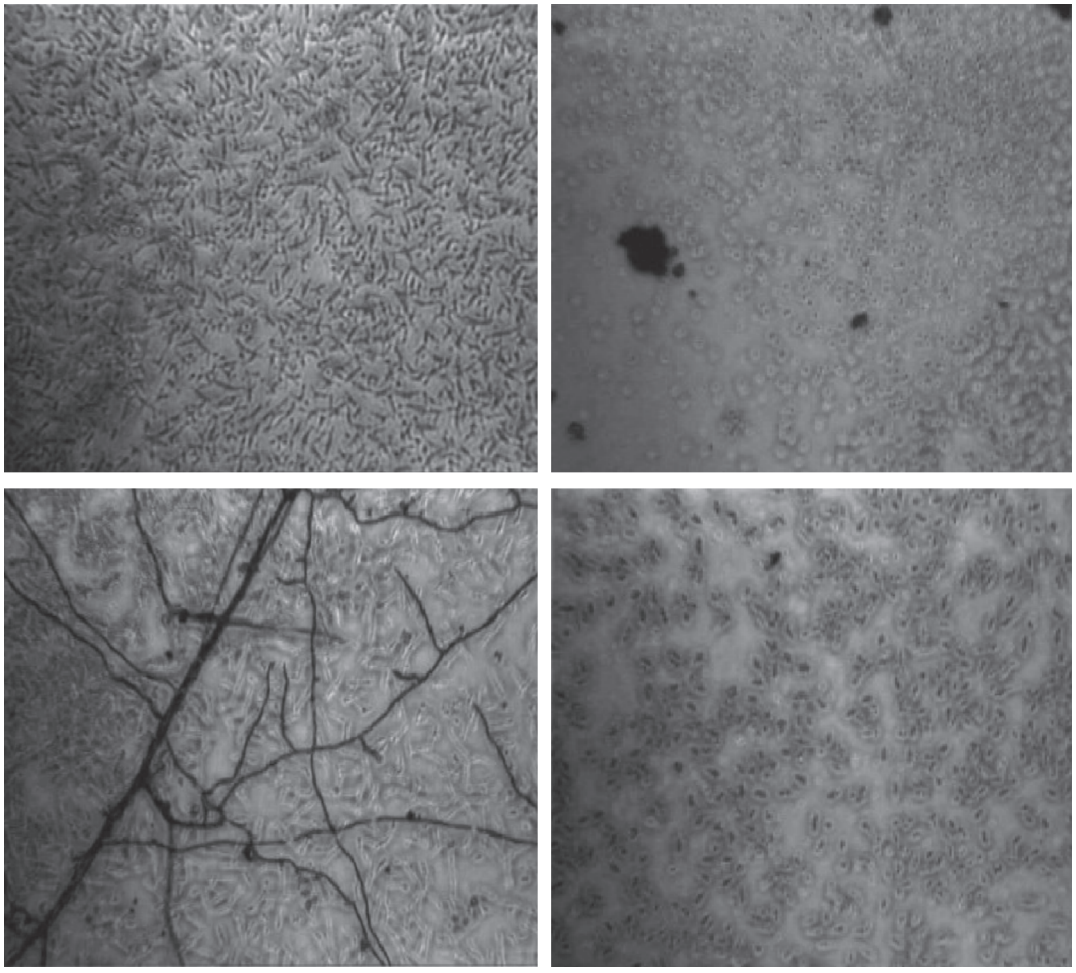

Рис. 2. Микрофлора высокогумусированной почвы: (а) – с нормальным увлажнением, (б) – при засухе.

при оптимальном условии увлажнения, так и при засухе (HCP_{05} = 5.5%) (рис. 1).

Целлюлозолитическая активность в значительной степени зависит от влажности и, таким образом, отражает почвенные условия. При этом целлюлозолитическая активность агросерой высокогумусированной и низкогумусированной почвы при оптимальном увлажнении была достаточно высокой – 79 и 72% соответственно. В условиях засухи целлюлозолитическая активность достоверно снизилась в большей степени в низкогумусированной почве (HCP_{05} = 13%). Аналогичные выводы получены и при изучении активности азотобактера.

Результаты прямого микроскопирования показали, что высокогумусированная почва с оптимальной влажностью отличалась плотным обрастанием с преобладанием бактерий (рис. 2а): показано активное развитие бактериальных палочек различной длины. Микроскопические грибы развивались менее активно и занимали меньшую площадь. В условиях почвенной засухи состав активной микрофлоры высокогумусированной почвы менялся (рис. 2б). Площадь, занимаемая бактериями, уменьшилась за счет развития актиномицетов, которые хорошо развиваются при недостатке влаги. Для микроскопических грибов малое количество влаги также являлось препятствием для активного развития, и их гифы не образовывали полного сплетения, которое обычно бывает во влажных условиях.

При оптимальном увлажнении низкогумусированной почвы преобладали микроскопические грибы, которые образовывали плотное переплетение гиф (рис. 3а). На некоторых участках отмечены покоящиеся формы микроскопических грибов. Встречались скопления почвенных дрожжей.

При засухе в низкогумусированной почве обрастание резко менялось: появились в значительном количестве мелкие бактериальные клетки

(б)

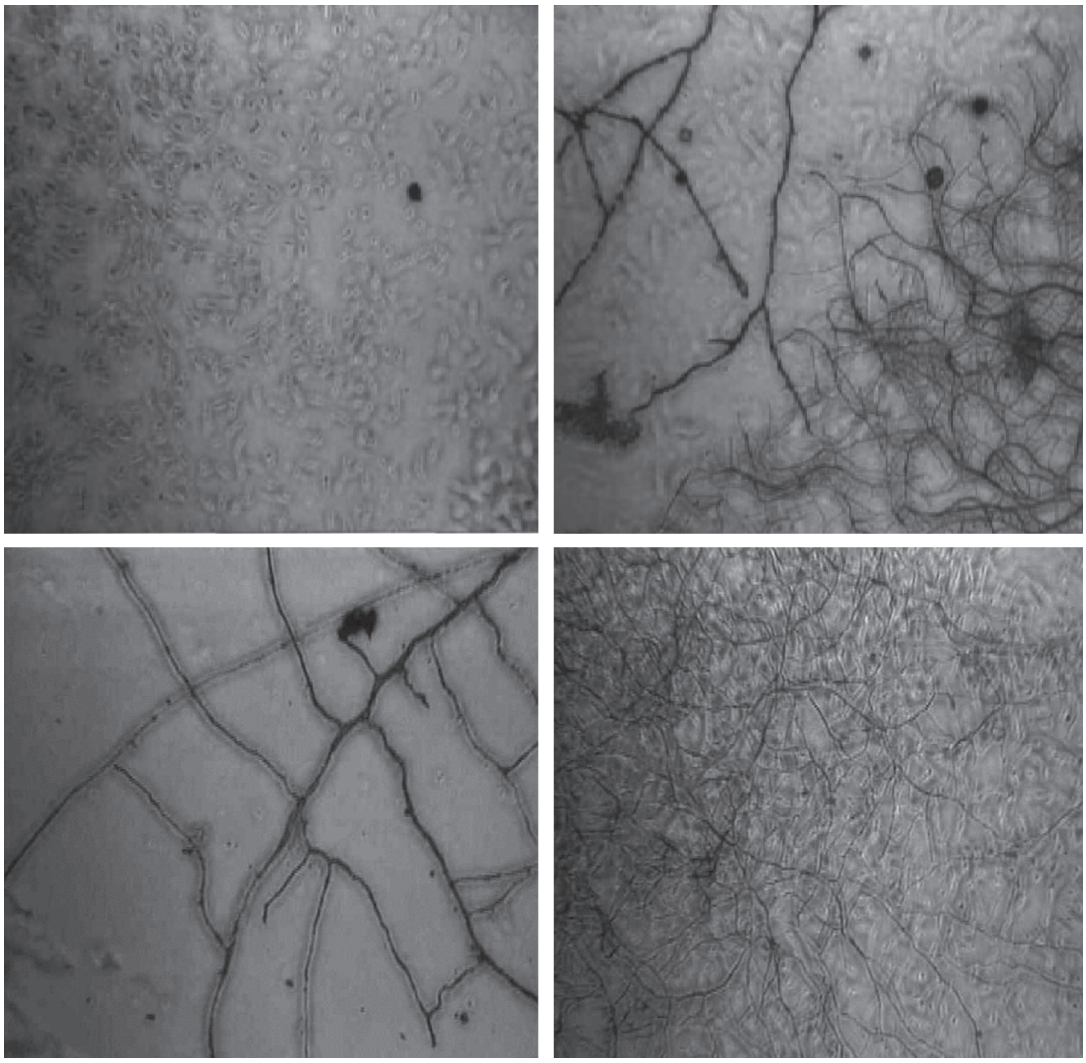

Рис. 2. Окончание.

(рис. 3б). Развитие микроскопических грибов сильно ослабло, доминантными стали актиномицеты, для развития которых пониженное содержание влаги не явилось препятствием.

Микробиологическая устойчивость к засухе во многом зависит и от степени соответствия других экологических факторов физиологическим потребностям почвенных микроорганизмов. Можно предположить, что сдерживаемая неблагоприятным экологическим состоянием микробиологическая жизнедеятельность в большей степени уязвима почвенной засухой [19–21].

Увеличение содержания гумуса в агросерой почве стимулировало жизнедеятельность почвенных микроорганизмов в условиях почвенной засухи (табл. 2). Численность грибов в высокогумусированной почве при содержании воды <15% было больше на 1.5×10^6 КОЕ/г в сравнении с низкогумусированным вариантом (0.2×10^6 КОЕ/г), аммонифицирующих бактерий – на 5.9×10^6 КОЕ/г (4.7×10^6 КОЕ/г), бактерий, ассимилирующих азот минеральных солей, – на 0.5×10^6 КОЕ/г (0.4×10^6 КОЕ/г), нитрифицирующих бактерий – на $15.2 \times \times 10^6$ КОЕ/г (1.6×10^6 КОЕ/г), целлюлозоразлагающий бактерий – на 2.3×10^6 КОЕ/г ($1.6 \times \times 10^6$ КОЕ/г) и актиномицетов – на 31.9×10^6 КОЕ/г (7.8×10^6 КОЕ/г). Отмечено наибольшее количество по сравнению с низкогумусированной почвой грибов, аммонифицирующих и целлюлозоразлагающих бактерий, актиномицетов.

Несмотря на то что в высокогумусированной почве численность грибов достоверно превышала низкогумусированную почву при оптимальных

(а)

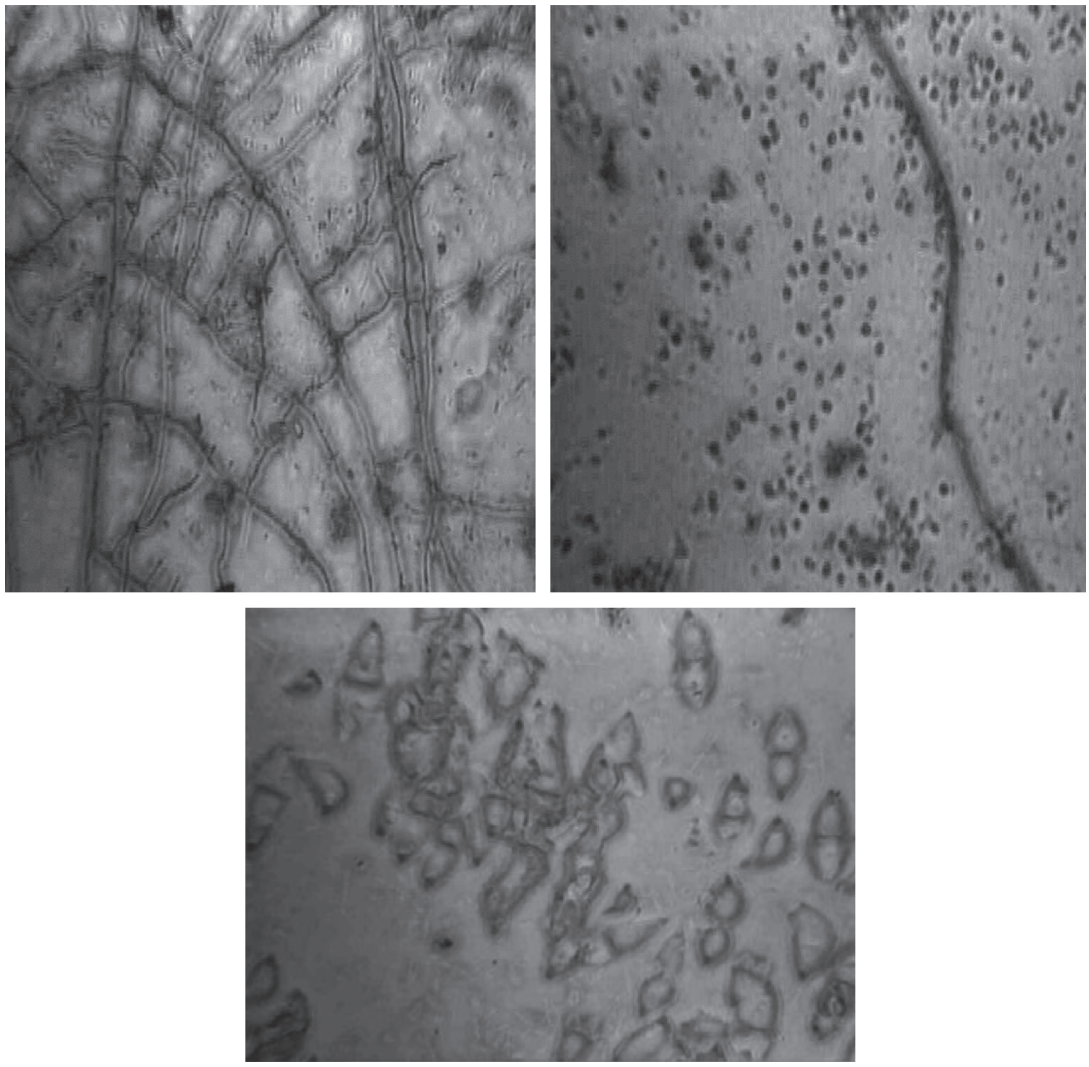

Рис. 3. Микрофлора низкогумусированной почвы: (а) – с нормальным увлажнением, (б) – в условиях засухи.

условиях увлажнения на 0.598×10^6 КОЕ/г почвы, моделированное проявление засухи не оказало влияния на угнетение жизнедеятельности грибов при сравнительном анализе. Более того, в высокогумусированной почве при засухе отмечали увеличение их количества до 1.75×10^6 КОЕ/г, что, на наш взгляд, связано с наличием у грибов более эффективных приспособительных функций к недостатку воды и на этом фоне повышенного конкурентного потенциала в неблагоприятных условиях. Этот же вывод справедлив и для актиномицетов с той лишь разницей, что нами зафиксировано заметное увеличение ее численности с действием неблагоприятного фактора в неплодородной почве до 7.81×10^6 КОЕ/г по сравнению с ее количеством в оптимальных условиях (2.65×10^6 КОЕ/г). Это связано с тем, что актиномицеты и микроскопические грибы обладают высоким конкурентным потенциалом, обусловленным повышенным в сравнении с другими группами микроорганизмов осмотическим давлением в клетке. В опыте снижение водообеспеченности почвы не оказало отрицательного влияния на актиномицеты и грибы, поэтому различий в их численности в вариантах увлажнения не обнаружено [22–24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Риски земледелия в южной части Нечерноземной зоны РФ во многом связаны с проявлением почвенной засухи, в особенности если она во времени совпадает с посевом яровых зерновых культур, начальными периодами их роста и развития.

(б)

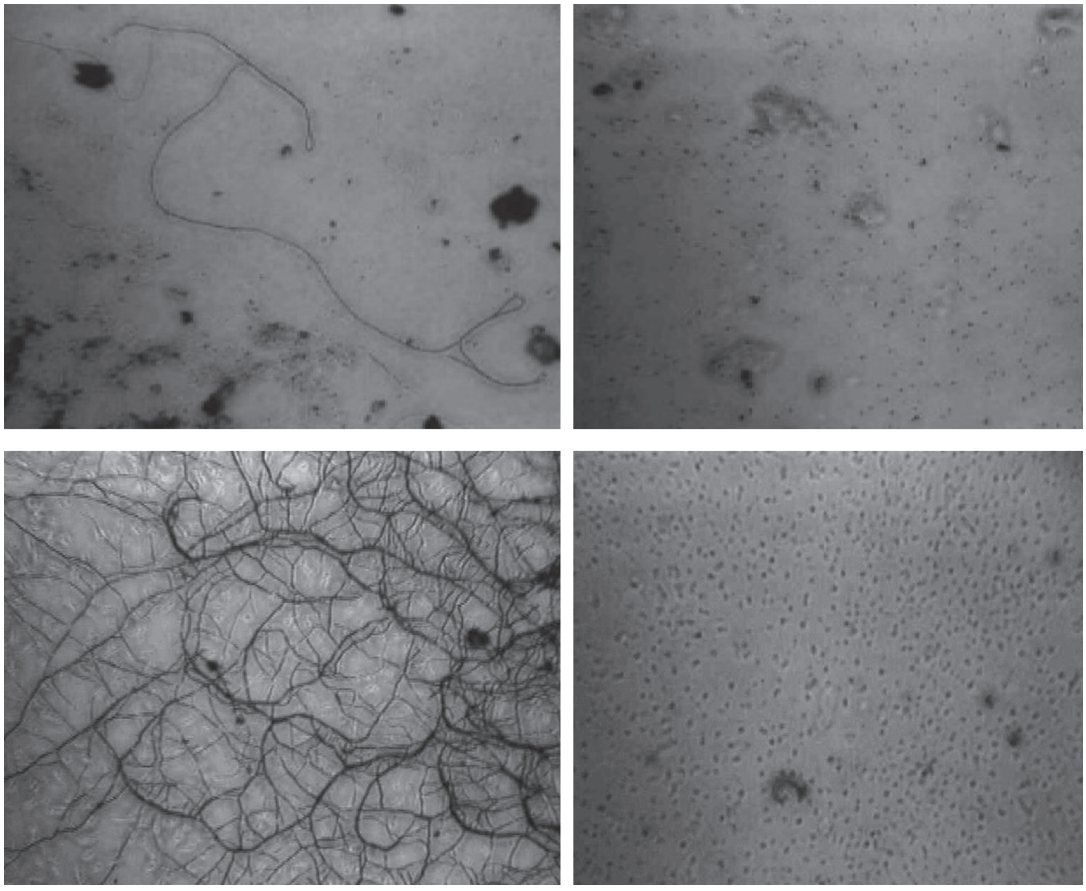

Рис. 3. Окончание.

В последнее время засуха усиливается, на что указывает смещение количества майских осадков в сторону уменьшения их величин в частотном распределении, нисходящий тренд осадков за последние 30 лет, снижение гидротермического коэффициента. Однако возводить отмеченные динамики в ранг закономерностей преждевременно. Для этого необходимо иметь более обширный фактологический материал с проекцией его на более длительный промежуток времени. Тем не менее,

Таблица 2. Влияние засухи и плодородия почвы на численность микроорганизмов, 10^6 КОЕ/г

Почва	Грибы	Бактерии				Актиномицеты
		аммонифицирующие	ассимилирующие азот минеральных солей	нитрифицирующие	целлюлозоразлагающие	
Оптимальные условия увлажнения (контроль)						
Низкогумусированная	0.2	9.5	3.7	5.2	3.9	2.6
Высокогумусированная	0.8	16.7	1.2	16.6	4.3	50.1
Засушливые условия						
Низкогумусированная	0.2	4.7	0.4	1.6	1.6	7.8
Высокогумусированная	1.7	10.6	0.9	16.8	3.9	39.7
$НСР_{05}$	0.3	4.1	0.4	1.9	0.5	6.6

представленные в работе данные являются предупреждением к усилению засушливых явлений в почве. По причине уменьшения осадков, запасов воды в почве происходило снижение продуктивности сельскохозяйственных растений на 20–70%. Климатологические сведения отечественных и зарубежных авторов указывают на увеличение атмосферной и почвенной засух в разных регионах мира, в том числе и в умеренных широтах. Какие бы агроэкосистемы не затрагивала засуха, важным их компонентом является почва, поскольку она выступает одновременно первоначальным рецептором и средообразующим элементом. На примере агросерой почвы установлено, что увеличение в почве элементов питания за счет применения минеральных удобрений способствует ослаблению проявления засухи, на что указывают выведенные уравнения регрессии. Биодиагностический метод оценки проявления почвенной засухи показал, что более плодородная почва, обладающая достаточным потенциалом средообразующей функции, более устойчива. Поэтому предложено дополнить классическое понятие плодородия почвы новым смыслом, что это не только способность обеспечивать растения элементами питания и водой, но и создавать условия для их устойчивого функционирования в стрессовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черников В.А., Милащенко Н.З., Соколов О.А.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Устойчивость почв к антропогенному воздействию. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. Кн. 3. С. 179–181.
2. *Пегов С.А., Хомяков Д.М., Хомяков П.М.* Влияние глобальных изменений на социально-экономическое положение России // Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия. М.: ГЕОС, 2000. С. 60–70.
3. *Ильина Л.В.* Комплексное воспроизводство плодородия серых лесных почв и его эффективность. Рязань: Узоречье, 1997. С. 117–124.
4. *Burke E.J., Brown S.J., Christidis N.* Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre Climate Model // J. Hydrometeorol. 2006. V. 7. P. 1113–1125.
5. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 г. в России по сравнению с засухами прошлых лет // Тр. Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 194–214.
6. *Страшная А.И., Пурина И.Э., Чуб О.В., Задорнова О.И., Чекулаева Т.С.* Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами // Тр. Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 161–175.
7. *Лебедева Л.А., Никитишен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы // Агрохимия. 2001. № 3. С. 55–63.
8. *Емнова Е.Е, Тома С.И., Бызган Я.В., Дарабан О.В.* Уреазная активность в ризосфере растений сои в условиях засухи // Агрохимия. 2014. № 3. С. 75–85.
9. *Верниченко И.В., Осипова Л.В., Быковская И.А., Яковлев П.А.* Влияние селена и цинка на засухоустойчивость растений сортов ячменя и их способность нормализовать азотное питание после перенесенной засухи (опыты с N^{15}) // Агрохимия. 2015. № 3. С. 43–55.
10. *Лебедева Т.Н., Семенов В.М.* Эффективность применения минеральных удобрений под картофель при обычных и экстремальных гидротермических условиях вегетационного периода // Агрохимия. 2016. № 2. С. 51–59.
11. *Серегина И.И., Ниловская Н.Т., Баранов А.Н.* Действие силиката калия при выращивании яровой пшеницы в условиях засухи // Агрохимия. 2018. № 9. С. 56–62.
12. *McDaniel J.P., Barbarick K.A., Stromberger M.E., Cranshaw W.* Survivability of *Aporrectodea caliginosa* in response to drought stress in a Colorado soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2013. P. 1667–1672.
13. *Христенко С.И., Шатохина С.Ф.* Влияние гидротермических факторов на микробный комплекс оподзоленного чернозема // Почвоведение. 2002. № 3. С. 335–339.
14. *Осипова Л.В., Ниловская Н.Е.* Формирование зачаточного колоса и продуктивность сортов яровой пшеницы в условиях нарастающей почвенной засухи // Докл. РАСХН. 2012. № 5. С. 14–15.
15. *Ziyomo C., Albrecht K.A., Baker J.M., Bernardo R.* Corn performance under managed drought stress and in a kura clover living mulch intercropping system // Agron. J. 2013. P. 579–586.
16. *Яковлев П.А., Верниченко И.В., Большакова Л.С.* Влияние обработки семян микроэлементами на урожайность яровых зерновых культур в условиях почвенной засухи // Агрохим. вестн. 2014. № 1. С. 25–27.
17. *Иванов Д.И., Харитонкина А.Е.* Продуктивность яровой пшеницы в зависимости от обработки микроэлементами и воздействия почвенной засухи // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Мат-лы XIII Международ. научн.-практ. конф., посвящ. памяти проф. С.А. Лапшина. Сер. “Лапшинские чтения”. 2017. С. 270–272.
18. *Лиховидова В.А., Газе В.Л., Ионова Е.В., Марченко Д.М.* Влияние почвенной и воздушной засухи на развитие корневой системы сортов и линий озимой мягкой пшеницы // Зерн. хоз-во России. 2018. № 4(58). С. 39–42.
19. *Ray R.L., Fares A., Risch E.* Effects of drought on crop production and cropping areas in Texas // Agric. Environ. Lett. 2013. P. 157–169.

20. *Zhu W., Li H., Qu H., Wang Y., Misselbrook T., Li X., Jiang R.* Water stress in maize production in the drylands of the Loess Plateau // Vadose Zone J. 2018. 17:180117. https://doi.org/10.2136/vzj2018.06.0117
21. *Павлова В.Н., Варчева С.Е.* Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия // Фундамент. и прикл. климатол. 2017. Т. 3. С. 122–132.
22. *Лапушкина А.А., Верниченко И.В., Осипова Л.В.* Влияние селена и кремния на устойчивость растений ячменя к почвенной засухе // Инновационные технологии в АПК: теория и практика. Матлы VI Всерос. научн.-практ. конф. 2018. С. 128–131.
23. *Sherrod L.A., McMaster G.S., Delgado J.A., Schipanski M.E., Fonte S.J., Montenieri R.L., Larson K.* Soil carbon pools in dryland agroecosystems as affected by several years of drought // J. Environ. Qual. 2018. P. 766–773.
24. *Ивойлов А.В.* Анализ данных агрономических исследований методами непараметрической статистики: учеб. пособ. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. С. 43–48.

Influence of Agro-Gray Soil Fertility on Microflora Activity in the Conditions of Drought in the Non-Chernozem Zone of Russia

R. N. Ushakov[a,#] and A. V. Ruchkina[a]

[a] *P.A. Kostychev Ryazan State Agrotechnological University ul. Kostycheva 1, Ryazan 390044, Russia*

[#] *E-mail: nasni91@gmail.com*

The dampening effect for soil drought on plants is expressed in the ability of humus to store resources (water, food elements, energy for soil processes), on the one hand, and to influence their use by plants under stress, on the other hand. Therefore, the purpose of the research was to assess the soil drought and study the stimulating effect of soil fertility of agro-gray soil (as an indicator of environmental potential) on microbiological activity. We studied the proteolytic and cellulolytic activity, as well as the activity of *Azotobacter*, the number of major groups of microorganisms. The formation of grain yield of spring crops was influenced by may precipitation, the dynamics of which indicated an increase in aridity, as well as hydrothermal conditions in June. In the absence of May and June precipitation, the probability of obtaining a grain yield of spring crops >2.0 t/ha was only 11%. Improved water availability in may increased the probability to 70%. If the improvement occurred only in June, the probability dropped to 24%. With the value of the hydrothermal coefficient (*HTC*) in May and June ≈1.0, the probability of obtaining a profitable grain yield was ≥3.0 t / ha and was 79%. With the *HTC* of June <0.7, the yield was most dependent on hydrothermal conditions in May. In long-term field experiments with fertilizers, a close relationship was established ($R = 0.7–0.9$) of crop yields from the value of the *HTC* and doses of fertilizers. The combined application of nitrogen, phosphorous and potash fertilizers at a dose of 60–80 kg active substance/ha allowed to obtain a stable yield of spring wheat and barley ≈3.0 t/ha, potatoes – 14.4–16.5 t/ha in arid conditions on agro-gray soils. The increase in the humus content in the agro-gray soil stimulated the vital activity of soil microorganisms in the conditions of soil drought. The patterns of *Azotobacter* activity were similar.

Key words: fertility, agro-gray soil, drought, microbiological activity, humus.

АГРОХИМИЯ, 2020, № 6, с. 78–96

ОБЗОРЫ

УДК 631.417.1:631.46:631.416.1

ФУНКЦИИ УГЛЕРОДА В МИНЕРАЛИЗАЦИОННО-ИММОБИЛИЗАЦИОННОМ ОБОРОТЕ АЗОТА В ПОЧВЕ[1]

© 2020 г. В. М. Семенов[1,2,*]

[1] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ "Пущинский научный центр биологических исследований РАН" 142290 Пущино, Московская обл., Институтская ул., 2, Россия

[2] Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии 143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

******E-mail: v.m.semenov@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.11.2019 г.
После доработки 10.12.2019 г.
Принята к публикации 10.03.2020 г.

Рассмотрены механизмы процессов минерализации и иммобилизации азота в почве. Подчеркнута особая роль углерода в регулировании минерализационно-иммобилизационного оборота азота. Приведены примеры оценки гросс (общих) и нетто (чистых) размеров минерализации и иммобилизации азота в почве. Отмечено, что скорость выделения $C\text{-}CO_2$ из почвы является объективным и достоверным индикатором азотминерализующего потенциала почвы.

Ключевые слова: углерод, азот, минерализация, иммобилизация, деполимеризация, аммонификация, нитрификация, C : N, $N_{мин}$, $C\text{-}CO_2$.

DOI: 10.31857/S0002188120060101

ВВЕДЕНИЕ

Азот и углерод относятся к числу макробиогенных, жизненно важных первоэлементов-органогенов. Азот содержится в хлорофилле, нуклеиновых кислотах, аминокислотах и белках, играя важную роль в фотосинтезе, белковом обмене и продукционном процессе растений. Чем больше содержание азота в листьях растений, тем активнее происходит фотосинтез. Считается, что до 55% ассимилированного в растительных тканях углерода используется в метаболизме азота. Углерод в составе органических соединений и CO_2 является одним из главных природных регуляторов жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, осуществляющих процессы азотфиксации, аммонификации, нитрификации, анаммокса и денитрификации (рис. 1). На восстановление 1 М молекулярного азота азотфиксирующие микроорганизмы тратят 16 М АТФ, образующейся в результате окисления органических молекул. Свободноживущие микроорганизмы, не имеющие фотосинтетического аппарата, получают эти молекулы от других организмов, а фотосинтезирующие микроорганизмы, такие как цианобактерии, используют сахара, полученные в результате фотосинтеза. Источником энергии для ассоциативных и симбиотических азотфиксаторов являются органические соединения растений-хозяев.

Круговороты азота и углерода тесно связаны между собой, оба цикла не могут осуществляться друг без друга [1]. Круговорот азота в экосистемах включает в себя процессы его поступления и удаления из почвы, преобразования из одной химической формы в другую и переноса между компартментами экосистемы [2–4]. Цикл углерода является одним из самых важных, комплексных и сложных, в котором ведущее положение занимают процессы фотосинтеза, разложения органических остатков, стабилизации в составе почвенного органического вещества и эмиссии диоксида углерода в атмосферу. Биогеохимический цикл углерода объединяет резервуары с длительным пребыванием углерода в них и динамические пулы, через которые осуществляется быстрый обмен элемента [5, 6].

Микробная биомасса является связующим звеном почвенных циклов углерода и азота, сто-

[1] Работа выполнена в соответствии с темами Государственных заданий № 0191-2019-0045.

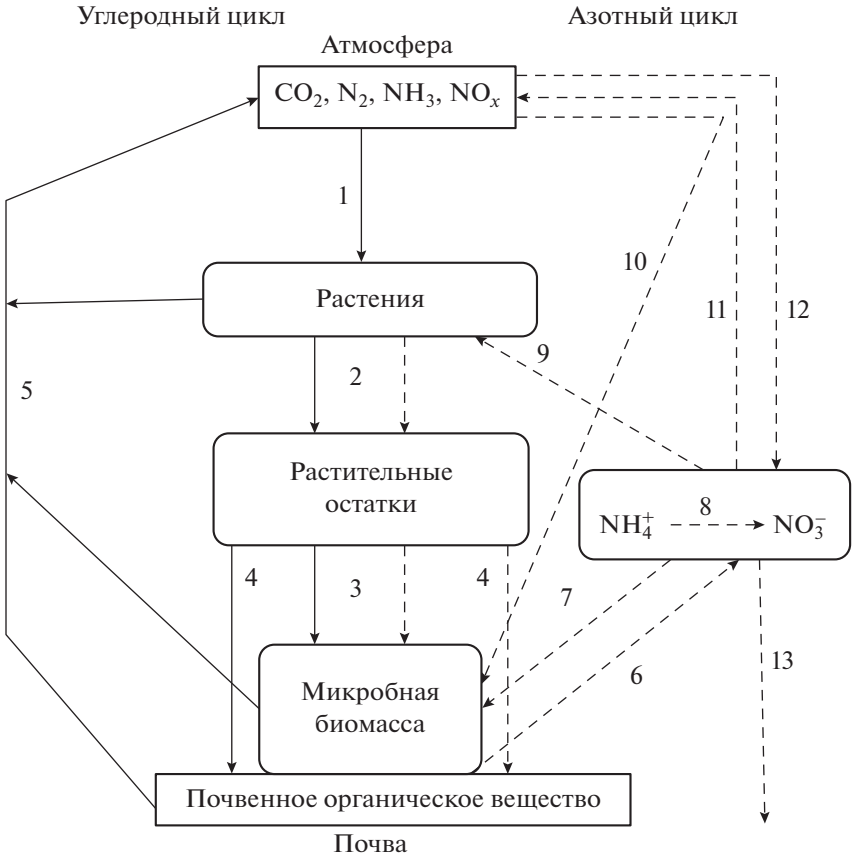

Рис. 1. Взаимодействие циклов углерода и азота в системе почва–растение–атмосфера: 1 – фотосинтез, 2 – опад, эксудаты, 3 – разложение, 4 – стабилизация, 5 – дыхание, 6 – минерализация, 7 – иммобилизация, 8 – нитрификация, 9 – поглощение растениями, 10 – биологическая фиксация, 11 – денитрификация, 12 – атмосферные выпадения, 13 – вымывание.

ком и источником биофильных элементов, продуцентом физиологически активных соединений и "парниковых" газов [7]. В биомассе почвенных микроорганизмов происходит преобразование органических и минеральных соединений, синтезируются присущие только микроорганизмам соединения. Поступление углерода с корневыми выделениями, прижизненным опадом и растительными остатками детерминирует обилие, функциональную активность и разнообразие свободноживущих, симбиотических и ассоциативных групп азотфиксирующих микроорганизмов. По образному выражению Д. Дженкинсона, микробная биомасса является "игольным ушком, через которое должны пройти все органические вещества, поступающие в почву" [8].

Наличие строгих стехиометрических соотношений углерода с азотом в растениях, микробной биомассе, в почвенном органическом веществе и в других природных субстратах и объектах является условием и признаком устойчивого функционирования наземных экосистем [9]. Сдвиги природных соотношений C : N : P в биомассе растений и микроорганизмов могут происходить вследствие обогащения (эвтрофикация) или обеднения (олиготрофикация) наземных и водных экосистем элементами минерального питания [10, 11]. Нарушение соотношений C : N : P в организмах-продуцентах сопровождается изменением качества продукции, дезорганизацией круговорота питательных веществ и их передвижения по трофической сети в экосистеме, вызывая в конечном счете изменение таковых соотношений у организмов-потребителей. В итоге меняется состав и структура экосистемы, в которой виды с низким содержанием минеральных элементов вытесняются видами, богатыми питательными веществами, или наоборот. Изменения в соотношении N : P в организмах и экосистеме отражаются на скорости роста отдельных видов и их конкурентоспособности, приводя к перестройке видового разнообразия экосистемы с риском исчезновения некоторых видов. Соотношение в почве N : K в доступных растениям формах и сте-

пень подвижности почвенного азота являются ключевыми факторами, контролирующими накопление ^{137}Cs растениями [12].

Массивное вовлечение в природный биогеохимический цикл технического азота во второй половине XX века привело к значимым изменениям в количестве и соотношении форм азота в почвах с самыми разнообразными негативными последствиями для окружающей среды [13, 14]. Одной из главных причин нитрогенизации окружающей среды стало нарушение природных углеродно-азотных равновесий и, как следствие, разбалансированность процессов минерализации и иммобилизации азота в почве [15, 16]. Была подчеркнута важность поддержания в почве экологически оптимальных соотношений органического углерода и минерального азота, в том числе путем внесения углерода растительных остатков для закрепления дополнительно минерализующегося азота [17].

Цели работы – рассмотрение механизмов процессов, слагающих минерализационно-иммобилизационный цикл азота в почве, сравнение общих и чистых размеров минерализации и иммобилизации азота, выявление роли органического углерода в минерализационно-иммобилизационных превращениях азота в почве.

МИНЕРАЛИЗАЦИОННО-ИММОБИЛИЗАЦИОННЫЙ ЦИКЛ АЗОТА В ПОЧВЕ

Непрерывное превращение минерализованного азота в органические продукты синтеза, а иммобилизованного азота – в минеральные продукты разложения, сопряженное с ростом и отмиранием микробной биомассы, определяется как минерализационно-иммобилизационная оборачиваемость (Mineralization–Immobilization Turnover) азота в почве (рис. 2). Процессы минерализациии и иммобилизации слагают гетеротрофный субцикл азота, связанный благодаря минерализации с автотрофным и элементным его подциклами: минерализованный N иммобилизуется в гетеротрофном субцикле, поглощается растениями в автотрофном субцикле и денитрифицируется в элементном субцикле [19]. Минерализация азота осуществляется на конечном этапе разложения органических веществ микроорганизмами, представляя собой превращение азота органических соединений в растворимые неорганические (минеральные) формы ($N\text{-}NH_4$ и $N\text{-}NO_3$), которые могут быть доступны растениям. В действительности, минерализация азота – это не отдельный физиологический процесс, а совокупность множества физиологических процессов, осуществляемых микроорганизмами. Конечным процессом в минерализационных превращениях азота является аммонификация – превращение аминокислот до аммиака и аммония, катализируемое внутриклеточными и внеклеточными ферментами [20]. Образующийся в результате аммонификации аммоний подвергается нитрификации – последовательному окислению до нитрита и нитрата. Минерализации органического азота предшествует стадия деполимеризации. При деполимеризации происходит расщепление высокомолекулярных биополимеров, в которых содержится основная часть азота, до мономеров [4, 21].

Агентами деполимеризации и аммонификации выступают гетеротрофные микроорганизмы, а нитрификации аммонийного азота – автотрофные и гетеротрофные микроорганизмы, включая грибы, бактерии и археи [22]. Деполимеризация осуществляется внеклеточными ферментами, включая протеиназы, хитиназы, амидазы и амидогидролазы. Субстратами для деполимеризации выступают белки, нуклеиновые кислоты, компоненты клеточных стенок микробной биомассы (аминосахара и их полимеры, хитин, пептидогликан). Источником азота могут быть также медленно разлагаемые гетероциклические и фенольные соединения, присутствующие в значительных количествах в почвенном органическом веществе. Экзоферменты уменьшают размер и сложность азотсодержащих органических молекул, облегчая их дальнейшее разложение или ассимиляцию. Белки расщепляются различными протеиназами и пептидазами (табл. 1). Протеиназы специфичны к крупным молекулам белков, а пептидазы могут расщеплять ди- или трипептиды или отдельные аминокислоты. Небольшие по размеру пептиды и аминокислоты, образующиеся в результате активности протеиназы, поглощаются микроорганизмами и затем метаболизируются внутриклеточными ферментами с образованием NH_4^+ в качестве побочного продукта. Высвобождение N из непептидных C–N-связей в аминокислотах и мочевине катализируется амидогидролазами, дегидрогеназами и трансаминазами. Пептидогликангидролаза деполимеризует гликопептиды клеточных стенок, играя тем самым ключевую роль в разложении и обороте микробной биомассы. Полимеры аминосахаров, которые являются важными компонентами бактериальных и грибных клеточных стенок, гидролизуются гликозидазами. Хитиназа действует на хитин и хитодекстрины – основные соединения в грибах, а

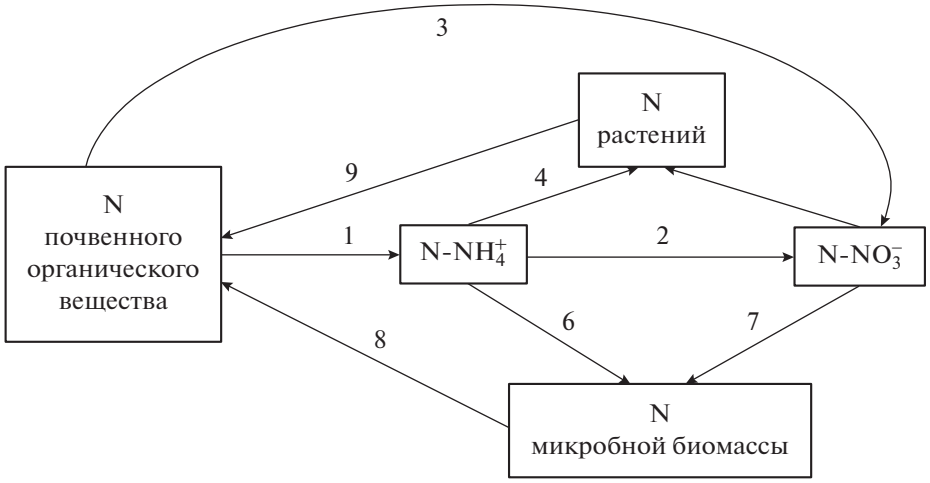

Рис. 2. Схема минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота в почве [18]: 1 – гросс-минерализация, 2 – автотрофная нитрификация, 3 – гетеротрофная нитрификация, 4 – поглощение NH_4^+ растениями, 5 – поглощение NO_3^- растениями, 6 – иммобилизация NH_4^+, 7 – иммобилизация NO_3^-, 8 – поступление с растительными остатками, 9 – поступление с микробной биомассой.

нуклеазы ответственны за разложение нуклеиновых кислот.

В большинстве случаев микробная деградация аминокислот, нуклеотидов и аминосахаров обусловлена потребностью гетеротрофных микробов в энергии и в углероде. В этом случае катаболический метаболизм перевешивает анаболические процессы, что приводит к экскреции ненужного NH_4^+ [24]. Теоретически, аммиак в почве может образоваться путем прямого ферментативного расщепления аминов или амидов ферментами, которые попадают в почву после лизиса клеток. Однако деаминазы и деамидазы активны, как правило, в межклеточном пространстве внутри живых организмов, поэтому образование NH_4^+ зависит от поступления в клетки небольших по размеру органических соединений – продуктов деполимеризации высокомолекулярных соединений внеклеточными ферментами.

По новой парадигме главным процессом минерализации является не аммонификация органических соединений до NH_4^+, а деполимеризация полимеров до мономеров (рис. 3). В одних случаях молекулы органических мономеров обогащенной азотом микрозоны ассимилируются микроорганизмами, поглощаются корнями растений, либо перемещаются с почвенным раствором в обедненные азотом микрозоны, где подвергаются ассимиляции гетеротрофами. В других случаях мономеры в местах их образования преимущественно минерализуются до аммония, который потребляется растениями, частично нитрифицируется или перемещается в обедненные азотом микрозоны. Третий и четвертый случаи, наиболее характерные для агроэкосистем – это преимущественная минерализация мономеров до аммония, частичная или значительная его нитрификация с преобладающим потреблением растениями аммония или нитратов соответственно, без выраженной миграции минеральных форм в обедненные азотом микрозоны почвы. В отличие от традиционного представления, по которому органический азот сначала минерализуется до NH_4^+ и лишь потом поглощается микроорганизмами в почве [25], новая концепция допускает прямое поглощение микроорганизмами небольших органических молекул, например, аминокислот, без предварительной их минерализации [24]. Если в первом случае предполагается наличие строгой конкуренции микроорганизмов с растениями за минеральный азот, то во втором случае, когда микроорганизмы используют органический азот, а растения – минеральный, конкуренция менее выражена. Наличие прямого поглощения микроорганизмами органического азота объясняет трофическую сбалансированность микробно-растительных ассоциаций в естественных экосистемах.

Разложение органического вещества осуществляется по пути приоритетного использования гетеротрофными микроорганизмами углерода и зависит от биохимического качества субстрата, факторов окружающей среды (температуры,

Таблица 1. Типичные ферменты, участвующие в минерализации азота в почве [23]

Фермент	Функция
Протеиназы/пептидазы	**Гидролиз пептидных связей**
Трипсин	Гидролиз до лизина и аргинина
Химотрипсин	Гидролиз до ароматических аминокислот
Субтилизин (микробная щелочная протеиназа)	Щелочная протеиназа из класса сериновых протеиназ
Карбоксильные протеиназы	Кислые протеиназы, похожие на пепсин или ренин
Микробные металлопротеиназы	Нейтральные протеиназы, содержащие Zn
Амидогидролазы	**Гидролиз C–N связей линейных амидов**
L-аспарагиназа	Гидролиз L-аспарагина
L-глутаминаза	Гидролиз L-глутамина
Амидаза	Гидролиз алифатических амидов
Уреаза	Гидролиз мочевины до CO_2 и NH_3
Пептидогликан гидролаза	Гидролиз пептидогликановых связей
Амидиногидролазы	**Гидролиз C–N-связей линейных амидинов (карбоксамидинов)**
Аргиназа	Гидролиз аргинина до орнитина и мочевины
Трансаминазы (аминотрансферазы)	**Перенос аминогрупп от аминокислот на кетокислоты без образования свободного аммиака**
Дегидрогеназы дезаминирующие	**Окислительное дезаминирование аминокислот**
Глутаматдегидрогеназа	Дезаминирование L-глутаминовой кислоты в α-кетоглутаровую
Гликозидазы	**Гидролиз аминосахаров и их полимеров**
Хитиназа	Гидролиз хитиновых связей
Мурамидаза (лизоцим)	Гидролиз пептидогликанов (муреин, мукопептид) или мукополисахарида (гликозаминогликанов)
Нуклеазы	**Гидролиз нуклеиновых кислот (ДНК и РНК)**
ДНКаза (экзодезоксирибонуклеаза)	Катализирует разрушение ДНК
РНКаза (экзорибонуклеаза)	Катализирует разрушение РНК

влажности, аэрации), физико-химических свойств почвы (pH, гранулометрического, агрегатного и минералогического состава) и разнообразия почвенного микробиома. Необходимое для синтетических процессов количество азота микроорганизмы получают непосредственно из разлагаемого материала, либо поглощая минеральные формы из почвы. Преимущественное использование микроорганизмами азота аммония или органических соединений зависит от доступности углерода и азота в почве, а также от концентрации NH_4^+ в почвенном растворе. Если в разлагаемом материале содержится больше азота, чем необходимо для поддержания стандартного отношения C : N в биомассе микроорганизмов, которые разлагают органический субстрат, происходит экскреция аминокислот и аммония в почву (рис. 4). Максимальная эффективность ассимиляции углерода субстрата микроорганизмами оценивается в 0.60 [26]. Соотношение C : N в микробной биомассе варьирует от 3 до 24, а средняя арифметрическая величина соотношения равна 8.6 [27]. Поэтому субстрат с соотношением C : N ≈ 20 ± 4 считается идеальным для почвенных микроорганизмов. Однако в присутствующем в почве органическом веществе, как правило, содержится слишком мало азота, чтобы удовлетворить синтетические потребности микробного сообщества. При высокой обеспеченности доступным углеродом микроорганизмы будут вынуждены поглощать аммоний или нитраты из окружающей почвы. Этот минеральный азот становится иммобилизованным.

В широком смысле под иммобилизацией азота понимается его перевод в связанное состояние посредством включения в микробную биомассу и последующего закрепления в составе почвенного органического вещества. Ассимиляция микроорганизмами азота является биотическим этапом его иммобилизации. Микроорганизмы, демонстрируя фенотипическую пластичность (способность организма формировать разные фенотипы в ответ на различные условия среды), могут

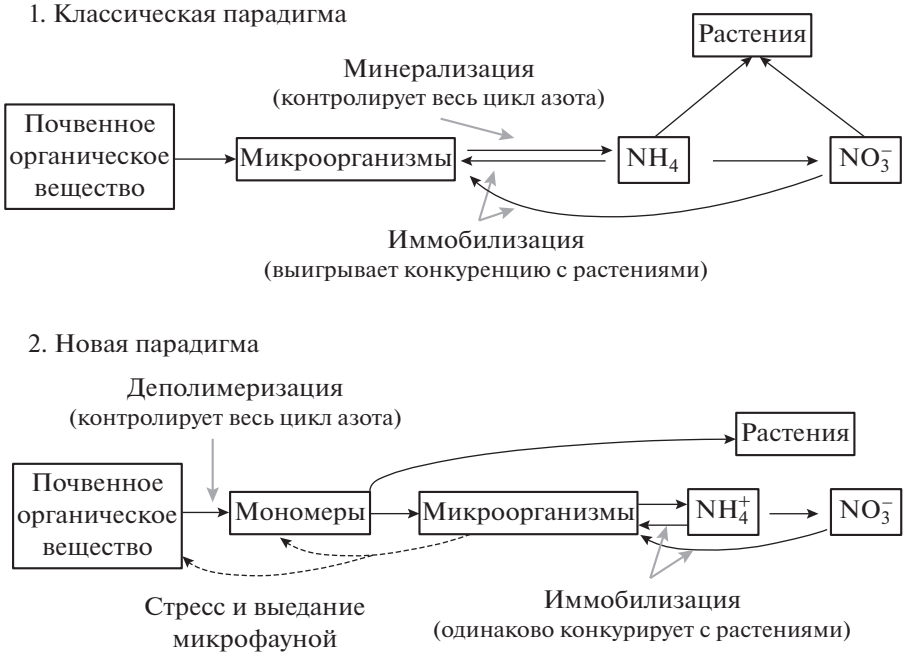

Рис. 3. Классическая и новая парадигмы почвенного цикла азота [21].

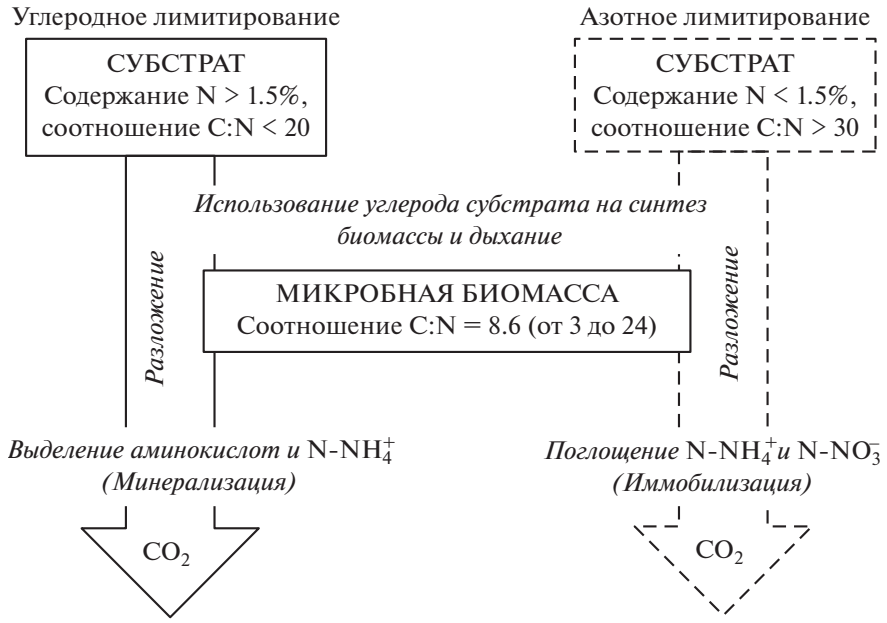

Рис. 4. Влияние качества органического субстрата на минерализационно-иммобилизационные превращения азота в почве.

поглощать и ассимилировать как аммонийную и нитратную формы азота, так и небольшие органические молекулы, например, аминокислоты, сразу используя их для синтеза биомассы [24, 28]. Поступление NH_3 в клетки может осуществляться путем диффузии через цитоплазматические мембраны, а аммония – с помощью транспортных белков. Внутриклеточное усвоение NH_4^+ почвенными микроорганизмами осуществляется преимущественно путем синтеза глутамата и/или глютамина. При низких концентрациях NH_4^+, типичных для большинства почв, функционирует ферментная система глутаминсинтетаза–глутаматсинтаза (**GS–GOGAT**), а при относительно

высоких – глутаматдегидрогеназа (**GDH**). Нитраты могут быть иммобилизованы непосредственно бактериями и грибами, подвергаясь внутриклеточному восстановлению до NH_4^+ в присутствии ассимиляторной нитратредуктазы и ассимиляторной нитритредуктазы. Синтез этих ферментов индуцируется нитратами и подавляется аммонием или глютамином.

В почве естественного сложения в действительности вероятно наличие микрозон как с высоким, так и с низким содержанием доступного углерода, как с преобладанием $N\text{-}NH_4$, так и $N\text{-}NO_3$. Поэтому в одних микрозонах почвы могут преобладать процессы минерализации (мобилизации), а в других – иммобилизации (стабилизации), нитрификации. Подобная разнонаправленность процессов была характерна при очаговом (локальном) размещении аммонийных форм азотных удобрений [29–31]. Поскольку ионы NO_3^- диффундируют в почве быстрее, чем NH_4^+, образующиеся в микрозонах с высокой скоростью минерализации нитраты становятся главным источником азота для гетеротрофных микроорганизмов в микрозонах с преобладанием иммобилизации [32]. Высокая концентрация NH_4^+ в очаге размещения удобрений, занимающим небольшой объем почвы, способствует мобилизации почвенного азота, но временно подавляет нитрификацию, тогда как в смежных с очагом зонах почвы сохраняются благоприятные для нитрификации и иммобилизации азота условия [29–31]. В итоге, в почве увеличивается продолжительность сбалансированного аммонийно-нитратного соотношения, а минеральный азот сохраняется к периоду наибольшей потребности растений в азоте [33].

Минеральные формы и органические соединения, образующиеся в результате минерализации и иммобилизации азота, подвергаются тем же превращениям, что и их предшественники, содержавшиеся в почве. Минерализация азота, ранее иммобилизованного микробной биомассой, называется реминерализацией, а иммобилизация ранее минерализованного азота – реиммобилизацией. Показано, что размеры микробной иммобилизации азота удобрений могут достигать 4/5 от внесенного количества в течение первых 4–7 сут, а основная часть азота удобрений поступает в растения, проходя через стадии иммобилизации и реминерализации [34]. Внесение растительных остатков с широким отношением углерода к азоту не снижает минерализацию азота, как принято считать, а наоборот усиливает, но в еще большей мере стимулирует иммобилизацию и реиммобилизацию азота, вследствие чего в почве обнаруживается низкое содержание минерального азота [35]. Как показано в этой работе, реминерализация иммобилизованного азота удобрений в серой лесной почве без растительных остатков и с пшеничной соломой составляла за 11–13 нед 61 и 27–46% или соответственно 0.26 и 0.20–0.25 мг/кг/сут. Подразделение процессов минерализации–реиммобилизации, иммобилизации–реминерализации, как и количественное измерение реминерализованного и реиммобилизованного азота, возможно только с помощью стабильного изотопа ^{15}N. Наличие этапов реминерализации и реиммобилизации хорошо объясняет динамику минерального азота в почве, связывая ее с естественными циклами роста и отмирания микробной биомассы и со стрессовыми воздействиями факторов внешней среды на микробное сообщество и почвенное органическое вещество [28].

Циклы высушивания–увлажнения и замораживания–оттаивания вызывают частичное отмирание и лизис микробной биомассы, выброс цитоплазматических соединений выжившими клетками, и, как следствие, увеличение минерализации углерода и азота в почве [36, 37]. Реиммобилизации и реминерализации азота в почве способствует выедание простейшими, нематодами и другими микроскопическими животными биомассы бактерий и грибов с относительно низким отношением C : N. Со временем лизировавшиеся и переваренные в пищеварительном тракте клетки бактерий и грибов представляют собой источник минерализуемого азота, который в дальнейшем поступает в почву с экскрементами и отмершими телами [38]. Реминерализация и реиммобилизация обеспечивают рециркуляцию азота в экосистеме для повторного использования другими организмами.

ОБЩИЕ И ЧИСТЫЕ РАЗМЕРЫ МИНЕРАЛИЗАЦИИ, ИММОБИЛИЗАЦИИ И НИТРИФИКАЦИИ АЗОТА В ПОЧВЕ

Содержание минеральных форм азота в почве зависит одновременно от размеров их продукции и потребления. Поэтому следует определять размеры общей (гросс) и чистой (нетто) минерализации, нитрификации и иммобилизации [18, 39, 40]. Под гросс-минерализацией и гросс-нитрификацией азота понимается общая продукция в почве соответственно $N\text{-}NH_4$ и $N\text{-}NO_3$ до их потребления в других процессах. Гросс-минерализация эквивалентна аммонификации. “Потреб-

ление" включает в себя все процессы, которые ведут к расходу аммония и нитрата в почве. К потреблению NH_4^+ относят его иммобилизацию микроорганизмами и нитрификацию, фиксацию минералами, а также улетучивание в виде аммиака. Допускается, что потребление NH_4^+ в почве эквивалентно сумме гросс-иммобилизации N-NH_4 и гросс-нитрификации. Потребление N-NO_3 может включать иммобилизацию микроорганизмами, вымывание, денитрификацию и диссимиляторное восстановление нитратов.

Скорости гросс-минерализации и гросс-нитрификации азота почвенного органического вещества устанавливаются изотопным способом по изменению избытка ^{15}N через 1–3 сут после добавления меченых соединений $^{15}NH_4^+$ и $^{15}NO_3^-$ соответственно [18, 39, 40]. Чем выше скорость минерализации почвенного азота микроорганизмами, тем существеннее снижение доли добавленного $^{15}NH_4^+$ в составе N-NH_4 почвы. Точно так же, чем интенсивнее окисление автотрофными нитрификаторами $^{14}NH_4^+$ до $^{14}NO_3^-$ или органического ^{14}N до $^{14}NO_3^-$ в случае гетеротрофной нитрификации, тем значительнее разбавление $^{15}NO_3^-$ в почве. Парные комбинации солей, содержащих аммоний и нитрат, используют при одновременном расчете гросс-величин процессов минерализации, иммобилизации и нитрификации. Тот же результат достигается при парном применении $^{15}NH_4NO_3$ и $NH_4{}^{15}NO_3$. Размеры гросс-иммобилизации устанавливаются по разнице между гросс-потреблением NH_4^+ и гросс-нитрификацией. Прямое определение гросс-иммобилизации аммонийного или нитратного азота производят по накоплению ^{15}N в микробной биомассе. В почве без растений, где денитрификация считается незначительной, потребление нитрата часто эквивалентно его иммобилизации. Измерение гросс-потоков азота методом изотопного разбавления основано на ряде допущений: 1 – не происходит дискриминация изотопов (изотоп ^{15}N в соединениях не ограничивает участие в процессах соединений, содержащих ^{14}N и наоборот), 2 – ^{15}N равномерно распределяется в почве, 3 – поддерживается естественное соотношение между пулами почвенного азота (добавленное соединение с ^{15}N имеет то же химическое состояние и так же распределено в почве, что и природные соединения в почве, любые процессы трансформации N в почве, которые происходят в течение инкубационного периода, например, диффузия, фиксация, образование газов, иммобилизация, нитрификация в равной степени свойственны добавленному и содержащемуся в почве азоту) [41].

Оценка гросс-потоков азота из растительных остатков и других органических источников производится 3-мя способами. Разностный способ оценки гросс-минерализации азота растительных остатков основывается на добавлении раствора $^{15}NH_4^+$ в почву с растительными остатками и без остатков. По разнице величин устанавливается гросс-минерализация азота собственно растительных остатков. Прямой метод предусматривает равномерное смешивание с почвой гомогенно измельченного органического материала, меченного по ^{15}N и добавление в момент определения гросс-минерализации немеченого раствора N-NH_4. Известен и такой способ определения гросс-потоков азота в почве, когда азотный пул почвенного органического вещества предварительно метится ^{15}N. Для этого в почву заранее вносят меченный по ^{15}N раствор соли и органический субстрат, инициирующий иммобилизацию, например, целлюлозу. Чем продолжительнее период прединкубации, тем больше вероятность того, что соотношение пулов минерального и минерализуемого азота в почве соответствует реальному состоянию и оба пула одинаково обогащены ^{15}N. Более надежный способ получить равномерное распределение ^{15}N по всем пулам почвенного азота – это использовать в исследованиях почву, на которой в предыдущий год выращивали растения с применением высокообогащенных по ^{15}N азотных удобрений [2].

По обобщенным нами литературным данным, величины гросс-минерализации варьируют от 0.17 до 36.5 мг/кг/сут, гросс-нитрификации – от 0.17 до 3.89 мг/кг/сут, а гросс-иммобилизации – от 0.15 до 29 мг/кг/сут. Мета-анализ результатов многих исследований [42] показал, что чем больше содержится в почве общего азота, тем больше величины гросс-минерализации азота. Гросс-минерализация фактически может быть более чем на порядок больше, чем чистая минерализация [40]. Повышенное содержание аммония или нитратов в почве может быть результатом как высокой минерализации и нитрификации, так и незначительного их расходования. Поэтому гросс- и нетто-величины минерализации и нитрификации не всегда коррелируют между собой. Для нитрификации характерна логарифмическая зависимость от минерализации азота, когда при низких темпах минерализации скорость нитрификации высокая, а при высокой минерализации скорость нитрификации низкая [43]. В отличие от

нитрификации, иммобилизация (ассимиляция) NH_4^+ микробной биомассой возрастает почти линейно во всем диапазоне скоростей минерализации. Поэтому при низких размерах минерализации доминирующей статьей превращения аммонийного азота является нитрификация, а при высоких – иммобилизация. Содержание и качество почвенного органического вещества являются ключевыми факторами, определяющими как гросс-минерализацию азота, так и дальнейшую судьбу NH_4^+: будет ли он нитрифицирован или ассимилирован почвенными микроорганизмами [43].

Нетто-минерализация азота – чистое накопление аммония ($N\text{-}NH_4$) и нитрата ($N\text{-}NO_3$) в почве за определенный промежуток времени. Допускается, что другие неорганические формы азота, образующиеся во время минерализации (например, NO_2^-, N_2O и NO_x) либо незначительны по содержанию, либо нестабильны и быстро преобразуются в другую форму, поэтому их потоки не соизмеримы с увеличением пулов азота аммония и нитратов. Величина нетто-минерализации представляет собой баланс между общей минерализацией азота в почве (гросс-минерализация) и его расходом в результате микробной иммобилизации и потерь (табл. 2).

В отсутствии растений и в условиях, исключающих вымывание и значимые газообразные потери азота, чистая минерализация азота определяется по изменению запасов минерального азота. Скорость нетто-минерализации почвенного азота характеризует количество накопленного в почве $N_{мин}$ за время инкубации. Типичные величины скорости нетто-минерализации в необрабатываемых почвах в течение вегетационного периода с достаточной влажностью составляют 0.1–1.0 г $N/м^2$/сут или 0.5–5.0 мг N/кг почвы/сут [44]. В полевых условиях с возделыванием сельскохозяйственных культур и внесением азота минеральных удобрений размеры нетто-минерализации устанавливают по изменению запасов $N_{мин}$ в 1-метровой толще почвы и выносу азота урожаем культур.

Величины нетто-минерализации достаточно корректно отображают азотный режим почвы, доступность почвенного азота растениям, уровень азотных нагрузок в экосистеме и потенциальные величины потерь азота из почвы. Измерение нетто-минерализации осуществляют в полевых или в лабораторных условиях. Инкубация почвенных кернов в полевых условиях позволяет оценить чистую минерализацию азота при температурах, типичных для данного участка, без чрезмерного нарушения структуры почвы. Для сравнения азотминерализующего потенциала почв разных типов, местоположений и землепользований предпочтительнее инкубация в лабораторных условиях при постоянных режимах температуры и влажности [45]. При инкубации образцов в лабораторных условиях исключаются такие источники и процессы, влияющие на размеры пула $N_{мин}$ в почве, как поглощение растениями, вымывание и атмосферные выпадения. Другие процессы, которые могут влиять на пул $N_{мин}$, в частности, денитрификация и улетучивание NH_3, измеряются отдельно. Отрицательные величины в разнице запасов $N_{мин}$ соответствуют чистой иммобилизации азота в почве.

Азотминерализующий потенциал почвы характеризует потенциальные размеры преобразования органического азота в неорганические формы при стандартных условиях температуры и влажности среды. Величина азотминерализующего потенциала почвы зависит от размера потенциально-минерализуемого пула почвенного органического вещества почвы и активности организмов, ответственных за его разложение и минерализацию. При инкубации в течение 2–6 нед основным источником минерализуемого азота выступают легко- и умеренно минерализуемые компоненты почвенного органического вещества с константами скорости минерализации соответственно $k_1 > 0.1$ и $0.1 > k_2 > 0.01$/сут. Азотминерализующий потенциал всего почвенного органического вещества, включая и трудно минерализуемую его фракцию ($k_3 < 0.01$/сут), устанавливается по результатам длительной инкубации на протяжении от полугода до года или более с измерением $N_{мин}$ в почве с интервалами от 7-ми до 30-ти сут [46]. По количеству накопленного в почве $N_{мин}$ устанавливают содержание потенциально-минерализуемого азота в почве на начало инкубации и константу скорости минерализации (табл. 2).

Показано, что в серой лесной почве под лесом и пашней содержалось потенциально-минерализуемого азота 74 и 37 мг/кг, в выщелоченном черноземе под залежью и разноудобренными посевами культур – 75 и 52 ± 1 мг/кг, в целинной и пахотной каштановой почве – 106 и 56 мг/кг [47, 48]. По другим данным, содержание N_0 в разных почвах варьировало от 10–145 до 54–1610 мг/кг, а константы скорости минерализации – от 0.003–0.032 до 0.010–0.054 сут [49]. В работе этих авторов приведен обзор разных моделей, использованных для расчета азотминерализующего потенциала почвы, в том числе и многокомпонентных,

Таблица 2. Способы оценки минерализации и нитрификации азота в почве

Формула	Обозначение
Нетто-минерализация ($N_{н\text{-}м}$, мг/кг)	
$N_{н\text{-}м} = N_{г\text{-}м} - (N_{им} + N_{п})$	$N_{г\text{-}м}$ – гросс-минерализация, $N_{им}$ – иммобилизация азота, $N_{п}$ – потери азота (обычно пренебрегаются)
Нетто-минерализация в лабораторных условиях ($N_{н\text{-}м}$, мг/кг)	
$N_{н\text{-}м} = [N_{минт} - N_{минт0}]$	$N_{минт}$ – содержание $N\text{-}NH_4 + N\text{-}NO_3$ в конце инкубации, $N_{минт0}$ – то же в начале инкубации.
Скорость нетто-минерализации в лабораторных условиях ($N_{н\text{-}м}$, мг/кг/сут или г/м^2/сут)	
$N_{н\text{-}м} = [N_{минт} - N_{минт0}]/\Delta t$	$N_{минт}$ и $N_{минт0}$ – содержание $N\text{-}NH_4 + N\text{-}NO_3$ в конце и в начале инкубации, мг/кг; Δt – время инкубации, сут
Нетто-минерализация в полевых условиях ($N_{н\text{-}м}$, кг/га)	
$N_{н\text{-}м} = \Delta N_{мин} + N_{р} + N_{в} - N_{уд}$	$\Delta N_{мин}$ – разница в запасах $N_{мин}$ в почве (0–100 см) между осенним и весенним измерениями, кг/га; $N_{р}$ – вынос азота растениями, кг/га; $N_{в}$ – инфильтрационные потери азота за пределы 0–100 см почвы, кг/га; $N_{уд}$ – доза азота минеральных удобрений ($N\text{-}NO_3 + N\text{-}NH_4$ в органических удобрениях), кг/га
Азотминерализующий потенциал почвы (N_0)	
$N_t = N_0(1 - \exp(-kt))$	N_t – содержание $N_{мин}$ в почве в течение инкубации, мг/кг; N_0 – содержание потенциально-минерализуемого азота на начало инкубации, мг/кг; k – константа скорости минерализации, сут$^{-1}$; t – время инкубации, сут
Скорость нетто-нитрификации ($N_{н\text{-}н}$, мг/кг/сут или г N /м^2/сут)	
$N_{н\text{-}н} = [(N\text{-}NO_3)_t - (N\text{-}NO_3)_0]/\Delta t$	$(N\text{-}NO_3)_t$ и $(N\text{-}NO_3)_0$ – содержание нитратного азота в конце и в начале инкубации, мг/кг; Δt – время инкубации, сут
Минерализация азота органических материалов	
$P = [1 - S(E/B)]$	P – доля N минерализованного из субстрата, S – отношение C : N в субстрате, B – отношение C : N в микробной биомассе, E – доля углерода субстрата, усвоенного микроорганизмами
Нетто-минерализация (нетто-иммобилизация) в почве с растительными остатками	
$N_{н\text{-}м}$ ($N_{им}$) = $(C_0 - C_t) + (A_t - A_0)$	$N_{н\text{-}м}$ – нетто-минерализация, $N_{им}$ – нетто-иммобилизация, $A_0 - N_{мин}$ в начале инкубирования (контроль), C_0 – то же в вариантах с фитомассой, $A_t - N_{мин}$ в срок отбора (контроль), C_t – то же в вариантах с фитомассой

допускающих подразделение органического пула азота на фракции, отличающиеся по константам скорости минерализации. Для точной оценки потенциально-минерализуемого азота инкубацию образца необходимо продолжать до тех пор, пока прирост содержания $N_{мин}$ снизится до сравнительно небольших величин. При работе с воздушно-сухими образцами почвы необходима их прединкубация в течение 10–14 сут, потому что увлажнение сухих образцов сопровождается иммобилизацией содержащегося в почве минерального азота. В целом, чем продолжительнее инкубация, тем точнее параметры минерализации органического азота. Различия в азотминерализующем потенциале почвы одного и того же варианта могут быть связаны с сезонными изменениями неразложившихся растительных остатков в почве и микробной биомассы.

Определение азотминерализующей способности почвы позволяет оценивать и прогнозировать текущий ход минерализации почвенного азота и его возможные изменения под действием примененных азотных удобрений [50]. Главная особенность этого метода состоит в инкубации при стандартной температуре и влажности 5-ти субобразцов анализируемой почвы с возрастающими количествами азотного удобрения (от 0 до 2.5 или от 0 до 5 мг/мл) в течение 4-х нед. По истечению инкубации в субобразцах почвы определяют сумму минерального азота. Величину азотминерализующей способности почвы устанавливают нахождением первой производной уравнения ре-

грессии, описывающего содержание доступного азота ($N\text{-}NH_{4обм}$ + $N\text{-}NO_3$) в почве (*Y*) в зависимости от доз азотного удобрения (*X*). Сумма исходного $N_{мин}$ и азотминерализующей способности почвы позволяет диагностировать потребность растений в течение всего вегетационного периода [13]. Показана зависимость азотминерализующей способности почвы от обеспеченности разлагаемым органическим веществом, подвижными формами фосфора и калия, вносимыми с органическими и минеральными удобрениями, способа обработки почвы, вида возделываемой культуры и других факторов. Азотминерализующая способность пахотной дерново-подзолистой почвы варьировала от 16 до 124 мг N/кг, серой лесной почвы – от 26 до 94 мг/кг, лугово-пойменной почвы – от 12 до 156 мг/кг. Отмечено, что под действием органических удобрений в дозах от 40 до 100 т/га азотминерализующая способность чернозема и дерново-подзолистой почвы на участках пашни была больше, чем на целине [13].

С целью более полного представления об азотном режиме почвы целесообразно оценивать нитрификационную способность почвы, под которой понимается накопление нитратов в почве при стандартной температуре и влажности за определенный промежуток времени. Величина нитрификационной способности почвы эквивалентна нетто-нитрификации. Нетто-нитрификация – чистая продукция в почве нитратного азота, исключающая то его количество, которое может быть иммобилизовано в микробной биомассе или денитрифицировано до газообразного азота в течение анализа (табл. 2). Так же, как и в случае минерализации, отрицательные величины нетто-нитрификации указывают на преобладание процессов потребления нитратов, которые могут расходоваться на иммобилизацию или теряться из почвы. Существует взаимосвязь между гросс-нитрификацией и потреблением NO_3^-, при этом связь между общей нитрификацией и эмиссией закиси азота из почвы была недостоверной [42]. Следовательно, нитраты в почве больше иммобилизуются, чем используются в денитрификации.

МОБИЛИЗАЦИЯ И СТАБИЛИЗАЦИЯ АЗОТА В ПОЧВЕ

Наряду с биологически опосредованными процессами минерализации и иммобилизации, образование и расходование минерального азота в почве может осуществляться в результате химических реакций и физических явлений. Абиотическое высвобождение азота в почве из недоступного для микроорганизмов и растений состояния в доступное называется мобилизацией, а приобретение минеральными и органическими формами азота недоступного для биоты состояния обозначается стабилизацией [4].

Абиотическая мобилизация азота проявляется в виде растворения, десорбции обменно-поглощенного и дефиксации фиксированного $N\text{-}NH_4$ при увеличении влажности почвы и концентрации одно- и двухвалентных катионов, при наличии условий, способствующих диспергированию глинистых частиц и органо-минеральных коллоидов. Примером физической и химической мобилизации азота является также вытеснение обогащенного нитратами почвенного раствора из микропор, хемодиссимиляция аминокислот, солюбилизация почвенных коллоидов и минералов. Почвенное органическое вещество, дестабилизированное абиотическими путями и утратившее химическую или физическую защищенность под действием природных и агрогенных нарушающих воздействий, становится биотически трансформируемым и источником потенциально-минерализуемого азота.

Процессы адсорбции $N\text{-}NH_4$, аминокислот, амидов поверхностью органических и минеральных частиц, фиксации $N\text{-}NH_4$ глинистыми минералами, “защемления” нитратов в микропорах, консервации простых N-органических соединений в микроагрегатах ведут к частичной или полной, краткосрочной или продолжительной абиотической стабилизации азота в почве [2, 51]. Известны и другие механизмы химической стабилизации азота, как, например, восстановление нитратов ионами Fe^{2+} и Mn^{2+}, реакции нитритов с амидами и аминокислотами, образование гетероциклических соединений в результате взаимодействия аминокислот, $N\text{-}NH_4$ и $N\text{-}NO_3$ с полифенолами, образующимися при разложении растительных остатков [52, 53].

Мобилизационно-стабилизационные превращения в почве осуществляются независимо, так и во взаимосвязи с минерализационно-иммобилизационными. По обобщенным данным [42], гросс-минерализация азота в образцах почвы с нарушенным сложением в среднем в 1.6 раза больше, чем в образцах с естественным сложением (табл. 3). Размеры нетто-минерализации и нетто-нитрификации в перемешанных почвах, как правило, больше, чем в ненарушенных образцах. Скорость потребления NH_4^+ (автотрофная нитрификация и гетеротрофная ассимиляция NH_4^+ микроорганизмами) в нарушенных почвах в 1.7 раза больше, чем в неповрежденных почвах.

Таблица 3. Параметры внутрипочвенного цикла азота в почве с естественным и с нарушенным сложением, мг/кг/сут [42]

Параметр	Сложение почвы	
	Естественное	Нарушенное
Выделение CO_2	18.9	31.7
Выделение N_2O	1.49	4.32
Гросс-минерализация	2.41	3.96
Потребление NH_4^+	2.59	4.29
Нетто-минерализация	–0.52	0.25
Гросс-нитрификация	1.21	0.78
Потребление NO_3^-	1.55	0.88
Нетто-нитрификация	–0.19	0.12

Перемешивание почвы незначительно замедляет гросс-нитрификацию, но в значительной мере усиливает выделение закиси азота. Приведенные данные указывают, что различного рода воздействия на почву оказывают мобилизующее действие на минеральный пул азота, который вовлекается во внутрипочвенные превращения, и одновременно дестабилизируют почвенное органическое вещество. В результате утраты химической и/или физической защищенности почвенного органического вещества многие из его азотсодержащих компонентов становятся доступными для минерализации почвенными микроорганизмами. Абиотические процессы мобилизации-стабилизации характеризуются более высокой скоростью по сравнению с биотическими процессами минерализации и иммобилизации. Есть все основания считать, что роль процессов мобилизации-стабилизации во внутрипочвенном обороте азота значительно выше, чем считалось до сих пор, позволяя объяснить ряд непонятных моментов в поведении азота в почве.

УГЛЕРОДНЫЙ КОНТРОЛЬ МИНЕРАЛИЗАЦИОННО-ИММОБИЛИЗАЦИОННОЙ ОБОРАЧИВАЕМОСТИ АЗОТА В ПОЧВЕ

Минерализационно-иммобилизационные превращения азота в почве сопряжены с жизненным циклом и метаболизмом почвенных микроорганизмов, представляя собой один из эффектов углеродно-азотных взаимодействий. Медиатором углеродно-азотных взаимодействий выступает микробная биомасса, драйверами – количество субстрата, доступность субстрата микроорганизмам, эффективность использования субстрата микроорганизмами и соотношение C : N в субстрате и в микробной биомассе, а результатом – количество и формы образующихся продуктов.

Микробная биомасса занимает центральное место во внутрипочвенном цикле азота, выступая источником минерализуемого азота, продуцентом азотсодержащих органических соединений, в том числе ферментов, участвующих в деполимеризации, аммонификации, нитрификации и ассимиляции и стоком азота при его иммобилизации. В микробной биомассе содержится от 2 до 5% от общего азота почвы, но благодаря непрерывному обороту ее истинный вклад в формирование и обновление почвенного пула азота гораздо существеннее. Непрерывный рост и отмирание микробной биомассы обеспечивает постоянный приток органического азота в почвенное органическое вещество в виде лабильных, быстро минерализуемых внутриклеточных компонентов и прочных, устойчивых к разложению клеточных стенок, которые стабилизируются в гумусе. По данным, полученным для почв разных экосистем, гросс-минерализация N положительно коррелирует с содержанием микробной биомассы, органического углерода и общего азота [43].

На единицу азота микробной биомассы ($\mathbf{N_{мб}}$) приходилось 3 и более единиц потенциально-минерализуемого азота ($\mathbf{N_0}$), тогда как увеличение или снижение содержания в почве общего органического азота не вело к соответствующему изменению количества N_0 [54]. Этими авторами установлено, что содержание углерода и азота микробной биомассы достоверно коррелировало с кумулятивным количеством минерализованного за 24 нед азота, позволяя хорошо диагностировать обеспеченность почвы доступным азотом. Активный пул почвенного азота на 28–36% представлен $N_{мин}$, на долю $N_{мб}$ приходится 29–44%, необменного аммония – 0.3–5%, неидентифицируемых компонентов – ≈30% [55]. По нашим данным, в минеральной, микробной и неидентифицируемой (метаболической) фракциях активного пула содержится в среднем 12, 34 и 54% азота, а при добавлении растительных остатков – 3, 36 и 61% соответственно [56].

Доступность микроорганизмам субстрата является функцией его биохимического качества, которое характеризуют содержание растворимого углерода, общего азота, лигнина, полифенолов, отношения C : N, лигнин : N, полифенол : N, лигнин + полифенол : N [57]. Отношение C : N в ор-

ганическом веществе не дает точного представления о биохимическом качестве разлагаемого материала, но достаточно релевантно отражает минерализационную способность органического вещества. Как правило, разложение субстратов с соотношением C : N < 20 или с содержанием общего азота >1.5% сопровождается нетто-минерализацией, а субстратов с C : N > 30 или с содержанием $N_{общ}$ < 1.5% – иммобилизацией минерального азота, содержащегося в почве. В случае сложных, исходно прочных материалов (например, лигнина) преобладание минерализации может происходить при соотношении C : N до 50 вследствие разной скорости разложения отдельных фракций сложного материала [58]. В уточненной модели минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота [59] доля минерализованного из органического материала азота устанавливается, исходя из соотношений C : N в микробной биомассе и в разлагаемом субстрате (табл. 2).

Периодическое поступление свежего органического вещества в почву (прижизненный растительный опад, корневые выделения, растительные остатки, органические удобрения), образование твердых дискретных частиц (particulate organic matter) из разлагаемого органического материала и их высвобождение из разрушенных агрегатов создает избыток доступного микроорганизмам углерода, смещая углеродно-азотное равновесие, присущее почве, и инициируя иммобилизацию почвенного азота (рис. 5). Поскольку минерализованный углерод практически полностью улетучивается из почвы в виде C-CO_2 в отличие от азота, потери которого составляют только часть от минерализованного количества, соотношение между углеродом разлагаемого субстрата и азотом, содержащимся в почве, сужается. Создаются предпосылки для замедления иммобилизации азота и преобладания минерализационных процессов с накоплением $N_{мин}$. Для сравнения, в почве чистого пара нет значимых источников свежего органического вещества, поступление которого могло бы инициировать иммобилизацию азота, поэтому даже при невысоких темпах минерализации гумифицированных компонентов почвенного органического вещества происходит накопление $N_{мин}$ в почве.

В ранее выполненных нами исследованиях были определены удельные величины нетто-минерализации и иммобилизации азота при внесении в почву разных органических материалов [35]. Разложение в почве бактериальной массы *Rhodobacter* (C : N = 4.7) давало нетто-минерализацию азота в количестве 54–99 мг N/г внесенного углерода в начале разложения и 103–120 мг N/г внесенного углерода по истечению 8-ми нед. На получение 1 мг минерализованного азота расходовалось 10–18 и 8–10 мг углерода бактериальной биомассы. Следовательно, увеличение доли бактериальной массы в составе почвенного органического вещества будет способствовать преобладанию минерализации азота над его иммобилизацией. Разложение растительных остатков в почве давало как нетто-минерализацию азота, так и нетто-иммобилизацию в зависимости от соотношения C : N в их составе. При внесении зеленых листьев овса с C : N = 9 размеры нетто-минерализации азота увеличивались с 6–12.3 мг/г внесенного углерода в начале разложения до 15.5–16.1 мг/г углерода растительных остатков через 8 нед с начала наблюдений. На минерализацию 1 мг азота растительных остатков требовалось 81–167 и 62–64 мг углерода фитомассы, что во много раз превышало затраты бактериальной массы. В других исследованиях удельная нетто-минерализация азота при разложении в почве массы белого клевера с C : N = 9.8 составляла 51.3 мг/г внесенного углерода, а на 1 мг минерализованного азота требовалось 19.5 мг углерода [60]. Можно предположить, что количество азота, высвобождаемого при минерализации органического материала, зависит не столько от содержания азота в разлагаемом материале, сколько от эффективности использования микроорганизмами углерода из осваиваемого субстрата, которая уменьшалась в ряду: бактериальная биомасса > фитомасса клевера > зеленые листья овса.

Критическое соотношение C : N в растительных остатках, при котором начинается преобладание иммобилизации азота в почве, по-видимому, >18. Именно такое соотношение C : N имели зеленые листья кукурузы, добавление которых в почву вызывало краткосрочную нетто-иммобилизацию азота [35, 61]. Внесение других видов или более зрелых растительных остатков с C : N = = 26–34 сопровождалось умеренно продолжительной иммобилизацией, а с C : N = от 55 до 99 – долговременной. Судя по литературным данным, критическое соотношение C : N величина не постоянная и может меняться от 19 до 44 [57]. Поэтому применительно к минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота в почве следует говорить не о точном критическом соотношении C : N в растительных остатках, а об интервале таковых. В отличие от строгой зависимости минерализации–иммобилизации азота от соотношения C : N в свежих органических материалах, добавленных в почву [58], соотношение

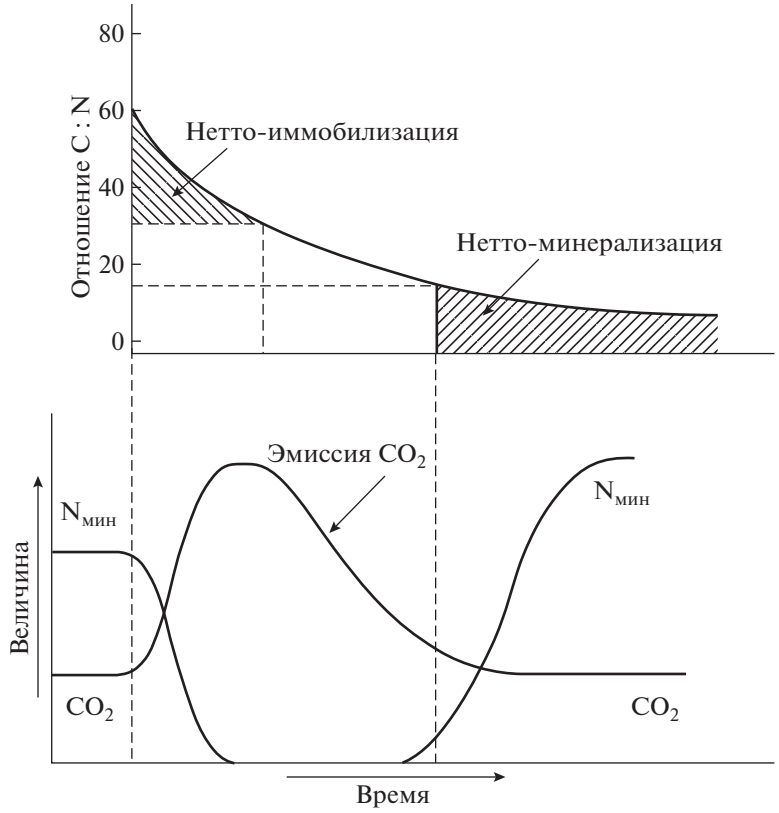

Рис. 5. Эмиссия CO_2 как индикатор минерализационно-иммобилизационных превращений азота в почве.

валовых содержаний C : N в почве дает слабое представление о направленности и активности процессов превращения азота [43].

Определение удельной величины иммобилизации позволяет предсказывать вероятность временно́й недоступности растениям внесенного азота удобрений и эффективность предотвращения потерь азота из почвы, устанавливать размеры компенсации минерализованного азота почвы внесенным азотом удобрения, устанавливать дозу свежего органического вещества, необходимого для связывания минерального азота в почве, оставшегося неиспользованным после вегетации растений. Было рассчитано, что для связывания 1 кг остаточного нитратного азота в слое 0–20 см серой лесной почвы необходимо 39–100 кг углерода соломы, а в целом сбалансированное соотношение минерализационно-иммобилизационных процессов достигается при компенсации единицы минерального азота в почве 30–50 единицами доступного микроорганизмам органического углерода [15]. В нашем опыте на серой лесной почве удельная величина нетто-иммобилизации в начале разложения меченной по ^{15}N фитомассы овса (C : N = 26) составляла 2.1–10.1 мг N/г углерода внесенного с фитомассой [35]. При таких величинах удельной иммобилизации для связывания одной единицы азота требовалось от 99 до 476 единиц углерода свежего органического вещества. В литературе на 1 г углерода, внесенного в почву с разными видами растительных остатков (соломы пшеницы, ячменя, гороха, стеблей кукурузы, рисовой шелухи, листьев рапса и др.) иммобилизовалось в среднем 27 мг N (от 10 до 53 мг N/г C), а на иммобилизацию единицы азота расходовалось 48 единиц углерода (от 19 до 100 мг C/мг N) [57]. При внесении в почву пшеничной соломы (C : N = 61) нетто-иммобилизация только азота аммиачной селитры составила в среднем за весь период наблюдений 23.8 мг N/г углерода соломы, а азота почвы и удобрений – 29.2 мг/г C соломы [35]. Было отмечено, что размеры иммобилизации азота могут лимитироваться не только наличием доступного углерода, но и обеспеченностью минеральным азотом, поэтому при низкой обеспеченности $N_{мин}$ потенциальная азотиммобилизующая емкость почвы может быть больше актуальной. В других исследованиях при низком содержании $N_{мин}$ в почве нетто-иммобилизация азота составляла 13 мг/г углерода пшеничной соломы, тогда как при высоком – 32 мг/г углерода [62].

Конечным продуктом минерализации органического вещества, наряду с $N\text{-}NH_4$ и $N\text{-}NO_3$, является диоксид углерода. Если минеральные формы в значительном количестве реутилизируются, а при определенных условиях накапливаются в почве, диоксид углерода, за исключением небольшого количества, потребляемого автотрофными микроорганизмами и поглощаемого почвенным раствором, преимущество выделяется из почвы. Современные способы газохроматографического измерения позволяют получить количественно точные величины количества $C\text{-}CO_2$, на основании которых можно составить представления о размерах минерализации азота почвы. Однако на начальных этапах разложения свежего растительного опада растущие микроорганизмы больше иммобилизуют азот из разлагаемого материала и из окружающей массы почвы, чем минерализуют (рис. 5). Со временем, вследствие насыщения иммобилизованным азотом смеси опада и микробной биомассы устанавливается динамическое равновесие между наличием доступного углерода и потребностью в азоте, при котором количество высвобождаемого при минерализации азота будет равняться количеству углерода, окисленного до CO_2. Микроорганизмы используют на ассимиляцию и дыхание разное количество углерода растительных остатков в зависимости от их качества и количества доступного углерода. Поэтому скорость эмиссии $C\text{-}CO_2$ одновременно характеризует и минерализационную и иммобилизационную стадии оборачиваемости азота в почве, а удельную эффективность минерализации и иммобилизации азота следует соотносить не только к количеству субстрата, но и к количеству углерода, израсходованного на дыхание [63–66]. Если в начальные 17–20 сут с начала опыта выделение $C\text{-}CO_2$ положительно коррелировало с иммобилизацией минерального азота ($r = 0.643$, $n = 12$), то начиная с 40–60-х сут, связь была отрицательной ($r = -0.634$, $n = 12$), свидетельствуя о преобладании в почве минерализации азота [66]. Величины гросс-минерализации и гросс-иммобилизации азота, как правило, строго коррелируют с выделением $C\text{-}CO_2$ из почвы (соответственно $R^2 = 0.974$, $P < 0.001$ и $R^2 = 0.980$, $P < 0.001$), тогда как связь нетто-минерализации азота с выделением $C\text{-}CO_2$ менее отчетливая или не проявляется вовсе [40]. В опыте с внесением в почву 8-ми видов растительных остатков скорость выделения $C\text{-}CO_2$ теснее коррелировала с гросс-иммобилизацией азота ($R^2 = 0.74$), чем с гросс-минерализацией ($R^2 = 0.41$) [67]. Тесная связь иммобилизации азота с выделением $C\text{-}CO_2$ ($R^2 = 0.984$) обнаружена также в опытах с внесением в почву остатков древесного волокна [68].

Удельная эффективность минерализации азота бактериальной массы *Rhodobacter* (C : N = 4.7) на начальной стадии и в конце ее разложения в почве составляла 96–204 и 140–164 мг N/г $C\text{-}CO_2$, соответствуя соотношению C : N, равному 5–10 и 6–7 [35]. Чтобы получить соотношение $C\text{-}CO_2$ к азоту, минерализованному из растительных остатков, необходимо учитывать сопутствующую иммобилизацию азота, размеры которой будут превышать минерализацию. Разделить минерализационный и иммобилизационный вклад в эмиссию $C\text{-}CO_2$ можно путем “перекрестной метки”, когда меченную по ^{15}N фитомассу вносят в немеченую почву, а немеченную фитомассу – в меченную по ^{15}N почву. Удельная величина нетто-иммобилизации в начале разложения фитомассы овса (C : N = 26) и через 8 нед составляла 10.4–37.8 мг и 5.4 мг N/г $C\text{-}CO_2$, что соответствовало соотношениям C : N = 26–96 и 185 [35]. В других исследованиях с разными видами растительных остатков удельная иммобилизация азота составляла от 5.7 до 110 мг N/г $C\text{-}CO_2$, показывая очень широкий диапазон соотношений минерализованного углерода к иммобилизованному азоту – от 9 до 176 [68–70].

К приведенному выше материалу необходимы следующие пояснения. Во-первых, в присутствии растений в полевых условиях дыхание корней может видоизменять динамику и размеры выделения $C\text{-}CO_2$, продуцируемого микроорганизмами в течение минерализационно-иммобилизационных превращений азота. Во-вторых, скорость и кумулятивная величина эмиссии $C\text{-}CO_2$ характеризует гросс- и нетто-потоки почвенного азота лишь в отсутствии свежих растительных остатков, видоизменяющих соотношение процессов минерализации и иммобилизации. В-третьих, свежий органический материал – предпочтительный источник углерода для микроорганизмов по сравнению с почвенным органическим веществом, большинство компонентов которого находится в стабилизированном состоянии и защищено от разложения. Поэтому количественные характеристики минерализации и иммобилизации азота, полученные для растительных остатков, могут отличаться от таковых для азота почвенного органического вещества. Соблюдение перечисленных условий позволяет оценивать азотминерализующий потенциал почвы по количеству потенциально-минерализуемого органического вещества, устанавливаемого по кумулятивному количеству $C\text{-}CO_2$, выделившегося за время ин-

кубации, соизмеримое вегетационному периоду [9]. Содержание углерода потенциально минерализуемого органического вещества (C_0) [71] достоверно коррелировало с азотминерализующим потенциалом (N_0) и нетто-минерализацией ($N_{н\text{-}м}$) азота [47] в серой лесной почве и в выщелоченном черноземе ($r = 0.686$, $P = 0.007$ и $r = 0.822$, $P < 0.001$ соответственно). Согласно полученным уравнениям регрессии, увеличение в этих почвах потенциально-минерализуемого углерода на 100 мг/кг позволит увеличить содержание потенциально-минерализуемого азота как минимум на 1.25 мг/кг, а нетто-минерализуемого азота – на 1.44 мг/кг. Соотношения $C_0 : N_0$ и $C_0 : N_{н\text{-}м}$ в необрабатываемых почвах составляли 31 ± 9 и 46 ± 9, а под пашней – 15 ± 5 и 28 ± 10 соответственно. В анализируемую выборку вошли варианты без удобрений и с внесением минеральных и органических удобрений, поэтому полученные соотношения $C_0 : N_0$ и $C_0 : N_{н\text{-}м}$ можно считать стандартными, отражающими текущее углеродно-азотное соотношение в серой лесной почве и выщелоченном черноземе. В необрабатываемых и пахотных почвах на чистую минерализацию азота приходилось в среднем 65 и 54% от потенциально-минерализуемого азота соответственно. Это могло быть обусловлено разным качеством минерализуемого пула органического вещества в целинных и пахотных почвах, так и дефицитом доступного углерода в пахотных почвах. Если азотминерализующий потенциал и размеры нетто-минерализации азота в пахотных почвах были соответственно в 1.5 и 1.8 раза меньше, чем в необрабатываемых участках, то обедненность углеродом потенциально-минерализуемого органического вещества достигала 3.1 раза. Убыль потенциально-минерализуемого органического вещества является характерным признаком агрогенной деградации пахотных почв. По сравнению с целинными и залежными угодьями пахотная дерново-подзолистая почва обеднена активным органическим веществом в среднем в 1.6 раза, серая лесная – в 1.9 раза, подтипы чернозема – в 2.4 раза, каштановые – в 1.2 раза, бурая лесная кислая – в 1.3 раза [72]. Недостаток доступного углерода – главная причина замедленного минерализационно-иммобилизационного оборота азота в почве и биологической инертности применяемых азотных удобрений.

ВЫВОДЫ

1. Количественная параметризация минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота в почве и поддержание на этой основе природоподобного соотношения между потенциально-минерализуемыми пулами углерода и азота в почве является одним из приоритетных условий экологически сбалансированного круговорота азота в агроэкосистемах, сохранения и воспроизводства плодородия почвы, повышения эффективности удобрений и предотвращения нарушений в окружающей среде.

2. Использование высоких доз минеральных азотных удобрений в земледелии должно предусматривать комплекс мер по увеличению обеспеченности почвы потенциально-минерализуемым органическим веществом, которое является источником минерализуемого азота, обеспечивая одновременно пролонгированную иммобилизацию азота в почве. Чтобы синхронизировать этапы превращения азота в почве и его потребления растениями, важно не столько ограничить иммобилизацию, сколько обеспечить быструю и эффективную реминерализацию ранее иммобилизованного азота.

3. Меченные по ^{15}N соединения остаются самым объективным и точным индикатором процессов превращения азота в почве и его потребления растениями. Программы исследований круговорота азота в агроэкосистемах должны включать определения азотминерализующего потенциала и нетто-минерализации азота, запасов углерода и азота микробной биомассы, скорости эмиссии $C\text{-}CO_2$, а также потенциально-минерализуемого органического вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nieder R., Benbi D.K.* Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Dordrecht: Springer, 2008. 430 p.
2. *Кудеяров В.Н.* Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.
3. *Завалин А.А., Соколов О.А.* Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
4. *Семенов В.М.* Современные проблемы и перспективы агрохимии азота // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 1. С. 55–63.
5. *Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла. СПб.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.
6. *Кудеяров В.Н.* Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060.
7. *Horwath W.R.* The Role of the soil microbial biomass in cycling nutrients // Microbial biomass: A Paradigm shift in terrestrial biogeochemistry / Ed. Tate K.R. London: World Scientific, 2017. P. 41–66.
8. *Stockdale E.A., Murphy D.V.* Managing soil microbial biomass for sustainable agroecosystems // Там же. P. 67–101.

9. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н.* Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
10. *Craine J., Elmore A.J., Wang L., Aranibar J., Bauters M., Boeckx P.* Isotopic evidence for oligotrophication of terrestrial ecosystems // Nat. Ecol. Evolut. 2018. V. 2. P. 1735–1744.
11. *Sardans J., Rivas-Ubach A., Peñuelas J.* The C : N : P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives // Perspect. .Plant Ecol. Evolut. Systemat. 2012. V. 14 (1). P. 33–47.
12. *Тулина А.С., Ставрова Н.Г., Семенов В.М.* Закономерности поступления ^{137}Cs в растения из дерново-подзолистой песчаной почвы при внесении азотных удобрений // Агрохимия. 2007. № 11. С. 61–70.
13. *Башкин В.Н.* Агрогеохимия азота. Пущино: ОНТИ НЦБИ, 1987. 270 с.
14. *Кудеяров В.Н., Биелек П., Соколов О.А., Кноп К., Пругар Я., Семенов В.М., Башкин В.Н., Моцик Ф., Скоржепова И., Шабаев В.П., Никитишен В.И.* Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. 160 с.
15. *Кудеяров В.Н.* Азотно-углеродный баланс в почве // Почвоведение. 1999. № 1. С. 73–82.
16. *Кудеяров В.Н., Семенов В.М.* Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // Агрохимия. 2014. № 10. С. 3–17.
17. *Кудеяров В.Н., Благодатский С.А., Ларионова А.А.* Изменение внутрипочвенных потоков азота при внесении азотных удобрений // Агрохимия. 1990. № 11. С. 47–53.
18. *Hart S.C., Stark J.M., Davidson E.A., Firestone M.K.* Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification // Methods of soil analysis. P. 2. Microbiological and biochemical properties / Eds. Bottomley P.S., Angle J.S., Weaver R.W. Madison: SSSA, 1994. P. 985–1018.
19. *Jansson S.L., Persson J.* Mineralization and immobilization of soil nitrogen // Nitrogen in agricultural soils / Ed. Stevenson F.J. Madison: SSSA, 1982. P. 229–252.
20. *Semenov A.M., Khvatov I.L., Olenin A.V.* Determination of the number of ammonification bacteria and activity of the ammonification process in soils and their relevance for the development of the of soil health parameter // Curr. Investigat. Agricult. Curr. Res. 2019. V. 6 (2). P. 715–722.
21. *Schimel J.P., Bennett J.* Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm // Ecology. 2004. V. 85 (3). P. 591–602.
22. *Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В.* Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Тов-во научн. изд. КМК, 2016. 243 с.
23. *Anand R., Germon J.C., Groffman P.M., Norton J.M., Philippot L., Prosser J.I., Schimel J.P.* Nitrogen transformations // Handbook of soil sciences: Properties and processes. 2nd edit. / Eds. Huang P.M., Li Y., Sumner M.E. Boca Raton: CRC Press, 2012. P. 27.1–27.53.
24. *Geisseler D., Horwath W.R., Joergensen R.G., Ludwig B.* Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review // Soil Biol. Biochem. 2010. V. 42. P. 2058–2067.
25. *Jansson S.L.* Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralization-immobilization relationships // Annal. Royal Agricult. College (Sweden). 1958. V. 24. P. 101–362.
26. *Sinsabaugh R.L., Manzoni S., Moorhead D.L., Richter A.* Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modeling // Ecol. Lett. 2013. V. 16. P. 930–939.
27. *Cleveland C.C., Liptzin D.* C : N : P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? // Biogeochemistry. 2007. V. 85 (3). P. 235–252.
28. *Bengtson P., Bengtsson G.* Bacterial immobilization and remineralization of N at different growth rates and N concentrations // FEMS Microbiol. Ecol. 2005. V. 54. P. 13–19.
29. *Семенов В.М., Мергель А.А.* Мобилизующее действие очага азотных удобрений на азотсодержащие соединения почвы // Почвоведение. 1989. № 4. С. 46–54.
30. *Семенов В.М., Соколов О.А.* Превращение азотных удобрений в серой лесной почве при внесении их разными способами // Агрохимия. 1984. № 9. С. 3–10.
31. *Соколов О.А., Семенов В.М., Силкина Н.П., Щербаков А.П.* Поведение азота в очаге при локализации азотных удобрений // Почвоведение. 1983. № 12. С. 25–35.
32. *Chen J., Stark J.M.* Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush-crested wheatgrass soil // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32 (1). P. 47–57.
33. *Семенов В.М., Агаев В.А., Тимченко А.В., Соколов О.А.* Методы регуляции аммонийно-нитратного питания растений при применении азотных удобрений // Агрохимия. 1987. № 4. С. 14–21.
34. *Евдокимов И.В., Благодатский С.А., Кудеяров В.Н.* Микробиологическая иммобилизация, реминерализация и поступление в растения азота удобрений // Почвоведение. 1993. № 4. С. 57–64.
35. *Кузнецова Т.В., Ходжаева А.К., Семенова Н.А., Иванникова Л.А., Семенов В.М.* Минерализационно-иммобилизационная оборачиваемость азота в почве при разной обеспеченности разлагаемым органическим веществом // Агрохимия. 2006. № 6. С. 5–12.
36. *Bottner P.* Response of microbial biomass to alternate moist and dry conditions in a soil incubated with ^{14}C- and ^{15}N-labelled plant material // Soil Biol. Biochem. 1985. V. 17. P. 329–337.
37. *Семенов В.М., Когут Б.М., Лукин С.М.* Влияние повторяющихся циклов высушивания–увлажнения–замораживания–оттаивания на активный пул органического вещества почвы // Почвоведение. 2014. № 4. С. 443–454.
38. *Семенов В.М., Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К., Феррис Х., Кузнецова Т.В.* Трансформация азота почвы и растительных остатков сообществом микроорганизмов и микроскопических животных // Агрохимия. 2002. № 1. С. 5–11.

39. *Davidson E.A., Hart S.C., Shanks C.A., Firestone M.K.* Measuring gross mineralization, immobilization, and nitrification by ^{15}N isotopic pool dilution in intact cores // J. Soil Sci. 1991. V. 42. P. 335–349.

40. *Hart S.C., Nason G.E., Myrold D.D., Perry D.A.* Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest: The Carbon connection // Ecology. 1994. V. 75. P. 880–891.

41. *Murphy D.V., Recous S., Stockdale E.A., Fillery I.R.P., Jensen L.S., Hatch D.J., Goulding K.W.T.* Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ^{15}N pool dilution techniques // Advan. Agron. 2003. V. 79. P. 69–118.

42. *Booth M.S., Stark J.M., Hart S.C.* Soil-mixing effects on inorganic nitrogen production and consumption in forest and shrubland soils // Plant and Soil. 2006. V. 289. P. 5–15.

43. *Booth M.S., Stark J.M., Rastetter E.* Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data // Ecol. Monographs. 2005. V. 75(2). P. 139–157.

44. *Robertson G.P., Wedin D., Groffman P.M., Blair J.M., Holland E.A., Nadelhoffer K.J., Harris D.* Soil carbon and nitrogen availability. Nitrogen mineralization, nitrification, and soil respiration potentials // Standard soil methods for long-term ecological research / Ed. Robertson G.P.). N.Y., Oxford: University Press, 1999. P. 258–271.

45. *Тулина А.С.* Влияние температуры, влажности и внесения соломы на динамику минерализации органического вещества и почвенные пулы углерода и азота // Агрохимия. 2019. № 3. С. 3–18.

46. *Stanford G., Smith S.J.* Nitrogen mineralization potentials of soils // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1972. V. 36. P. 465–472.

47. *Кузнецова Т.В., Кузнецов А.М., Тулина А.С., Семенова Н.А., Надежкина Е.В.* Азотминерализующая способность серой лесной почвы и выщелоченного чернозема // Роль почв в сохранении устойчивости ландшафтов и ресурсосберегающее земледелие. Пенза: РИО ПГСХА, 2005. С. 333–335.

48. *Кузнецова Т.В., Удальцов С.Н.* Азотминерализующий потенциал чернозема выщелоченного и каштановой почвы // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Воронеж: Изд.-полиграф. центр "Научная книга", 2017. С. 285–289.

49. *Benbi D.K., Richter J.* A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization // Biol. Fertil. Soils. 2002. V. 35. P. 168–183.

50. *Башкин В.Н., Кудеяров В.Н.* Определение азотминерализующей способности почв // Земледелие. 1986. № 11. С. 58–59.

51. *Braun J., Mooshammer M., Wanek W., Prommer J., Walker T.W.N., Rütting T., Richter A.* Full ^{15}N tracer accounting to revisit major assumptions of ^{15}N isotope pool dilution approaches for gross nitrogen mineralization // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 117. P. 16–26.

52. *Berntson G.M., Aber J.D.* Fast nitrate immobilization in N saturated temperate forest soils // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. P. 151–156.

53. *Davidson E.A., Chorover J., Dailj D.B.* A mechanism of abiotic immobilization of nitrate in forest ecosystems: the ferrous wheel hypothesis // Global Change Biol. 2003. V. 9. P. 228–236.

54. *Deng S.P., Moore J.M., Tabatabai M.A.* Characterization of active nitrogen pools in soils under different cropping systems // Biol. Fertil. Soils. 2000. V. 32. № 4. P. 302–309.

55. *Liang B.C., Mackenzie A.F., Gregorich E.G.* Changes in ^{15}N abundance and amounts of biologically active soil nitrogen // Biol. Fertil. Soils. 1999. V. 30. P. 69–74.

56. *Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Иванникова Л.А., Семенова Н.А., Лисова Е.П.* Участие растительной биомассы в формировании активной фазы почвенного азота // Агрохимия. 2001. № 7. С. 5–12.

57. *Семенов В.М., Ходжаева А.К.* Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. № 7. С. 63–81.

58. *Myrold D.D., Bottomley P.J.* Nitrogen mineralization and immobilization // Nitrogen in agricultural soils / Eds. Raun W., Schepers J.S. Madison: WI., ASA, 2008. P. 157–172.

59. *Barraclough D.* The direct or MIT route for nitrogen immobilization: a ^{15}N mirror image study with leucine and glycine // Soil Biol. Biochem. 1997. V. 29 (1). P. 101–108.

60. *Henriksen T.M., Breland T.A.* Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31. P. 1135–1149.

61. *Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К., Иванникова Л.А., Семенов В.М.* Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // Агрохимия. 2003. № 10. С. 3–12.

62. *Mary B., Recous S., Robin D.* A model for calculating N fluxes in soil using ^{15}N tracing // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30. P. 1963–1968.

63. *Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н.* Продуцирование почвой CO_2 и его эмиссия при минерализации азотсодержащих компонентов // Почвоведение. 1994. № 10. С. 79–85.

64. *Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Кудеяров В.Н.* Иммобилизационно-мобилизационные превращения азота в серой лесной почве // Почвоведение. 1995. № 4. С. 472–479.

65. *Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Кудеяров В.Н.* Высвобождение доступного для растений азота при минерализации активной фазы органического вещества почвы // Почвоведение. 1995. № 6. С. 732–739.

66. *Кузнецова Т.В., Тулина А.С., Розанова Л.Н., Семенов В.М., Кудеяров В.Н.* О сопряженности процессов метаболизма углерода и азота в почве // Почвоведение. 1998. № 7. С. 832–839.

67. *Luxhøi J., Bruun S., Stenberg B., Breland T.A., Jensen L.S.* Prediction of gross and net nitrogen mineralization-immobilization-turnover from respiration // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. V. 70. P. 1121–1128.

68. *Hamnér K., Kirchmann H.* Net nitrogen immobilization in soil induced by small additions of energy sources // Acta Agricult. Scand. 2005. V. 55. P. 177–185.

69. *Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. P. 255–266.

70. *Recous S., Robin D., Darwis D., Mary B.* Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition // Soil Biol. Biochem. 1995. V. 27. № 12. P. 1529–1538.

71. *Кузнецов А.М., Иванникова Л.А., Семин В.Ю., Надежкин С.М., Семенов В.М.* Влияние длительного применения удобрений на биологическое качество органического вещества выщелоченного чернозема // Агрохимия. 2007. № 11. С. 21–31.

72. *Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах Европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472.

Functions of Carbon in the Mineralization–Immobilization Turnover of Nitrogen in Soil

V. M. Semenov[a,b,#]

[a] *Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[b] *All-Russian Research Institute of Phytopathology ul. Institute 5, Moscow Region, Odintsovo district, p/o Bolshiye Vyazemy 143050, Russia*

[#] *E-mail: v.m.semenov@mail.ru*

The mechanisms of nitrogen mineralization and immobilization processes in the soil were considered. The key role of carbon in the regulation of nitrogen mineralization-immobilization turnover was emphasized. Methods for estimating the gross and net nitrogen mineralization and immobilization in the soil were discussed. It was noted that the rate of $C\text{-}CO_2$ release from soil is an objective and reliable indicator of the nitrogen mineralization potential of the soil.

Key words: nitrogen, carbon, mineralization, immobilization, depolymerization, ammonification, nitrification, C : N, N_{min}, $C\text{-}CO_2$.