

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 11, 2021

Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России

В. Н. Кудеяров

3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Распределение форм калия в почвенном профиле эродированных лугово-черноземных почв и их трансформация в агроценозах

В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина

16

Содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при внесении в нее биоугля

Л. В. Бойцова, Е. Я. Рижия, М. А. Москвин

25

Удобрения

Эффективность применения азотного удобрения в смешанных посевах гороха и пшеницы в севообороте

М. А. Алёшин, А. А. Завалин

33

Значение точной системы удобрения в управлении качеством овощной продукции

А. И. Иванов, Ж. А. Иванова, А. А. Конашенков

49

Пестициды

Системы защиты с микроудобрениями и современными многокомпонентными пестицидами для экологически безопасного производства винограда

Т. С. Астарханова, С. С. Ладан, А. В. Березнов, И. Р. Астарханов

59

Агроэкология

Азотфиксация клевера лугового при применении удобрений и известковании

А. Н. Налиухин, А. А. Рыжакова

65

Экотоксикология

Миграция ¹³⁷Cs в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа

В. Г. Граковский, А. С. Фрид

72

Влияние стимулирующих рост растений ризосферных бактерий на устойчивость яровой пшеницы к токсическому действию никеля при загрязнении агросерой почвы

В. П. Шабает, В. Е. Остроумов

87

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

Ю.М. Логинов, Е.В. Газов, С.М. Кривенков. Определение агрохимических и химических показателей почв, растений и водных сред с использованием поточно-декадной технологии анализа / Под ред. Р.Ф. Байбекова. М., 2021 г. 350 с.

95

ХРОНИКА

Памяти Монастырского Олега Александровича (1936–2021)

96

Contents

No. 11, 2021

Nitrous Oxide Emission Factor from Russian Arable Soils at the Fertilizers Application

V. N. Kuderyarov

3

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Distribution of Potassium forms in the Soil Profile of Eroded Meadow-Chernozem Soils and Their Transformation in Agroecosystems

V. M. Nazariuk, F. R. Kalimullina

16

Mineral Nitrogen Content in Sod-Podzolic Sandy Soils of Different Fertility after Application of Biochar

L. V. Boitsova, E. Ya. Rizhiya, M. A. Moskvina

25

Fertilizers

Efficiency of Application of Nitrogen Fertilizer in Mixed Crops of Peas and Wheat in Crop Rotation

M. A. Aleshin, A. A. Zavalin

33

Importance of Precise Fertilizer System in Management Vegetable Quality

A. I. Ivanov, Zh. A. Ivanova, A. A. Konashenkov

49

Pesticides

Protection Systems with Micro-Fertilizers and Modern Multicomponent Pesticides for Environmentally Safe Grape Production

T. S. Astarkhanova, S. S. Ladan, A. V. Bereznov, I. R. Astarkhanov

59

Agroecology

Symbiotic Nitrogen Fixation of Meadow Clover on Application of Fertilizers and Liming

A. N. Naliukhin, A. A. Ryzhakova

65

Ecotoxicology

Migration of ¹³⁷Cs in the Soils of the East-Ural Radioactive Trace

V. G. Grakovskiy, A. S. Frid

72

Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Resistance of Spring Wheat to Ni Toxicity of Heavy Metal Contaminated Soil

V. P. Shabayev, V. E. Ostroumov

87

CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY

Yu. M. Loginov, E. V. Gazov, S. M. Krivenkov. Determination of agrochemical and chemical parameters of soils, plants and aquatic environments using flow-decade analysis technology / Ed. R.F. Baibekov. M., 2021. 350 p.

R. F. Baibekov

95

CHRONICLE

In memory of Oleg Alexandrovich Monastyrsky (1936–2021)

96

ЭМИССИОННЫЙ ФАКТОР ЗАКИСИ АЗОТА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ РОССИИ¹

© 2021 г. В. Н. Кудеяров^{1, 2, *}

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская ул., 2, Россия

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

*E-mail: vnikolaevich2001@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2021 г.

После доработки 20.06.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Баланс азота в земледелии РФ за последние 25 лет оценивается как остродефицитный. Это означает, что значительная доля урожая формируется за счет минерализованного азота почвы, который практически не накапливается в свободном состоянии, а быстро ассимилируется растениями и микроорганизмами. При оценке величины эмиссии N_2O из почвы используют эмиссионный фактор (Φ_{N_2O}), который меняется в зависимости от почвенно-климатических условий, внесения в почву разных форм удобрений, растительных остатков и азотсодержащих отходов. Сведения по прямому измерению эмиссии N_2O из почв РФ весьма ограничены, и оценки эмиссии N_2O для формирования “Кадастра парниковых газов РФ” строятся на расчетных данных с использованием международных коэффициентов по методике МГЭИК. В течение 2000–2018 гг. в РФ по нашим расчетам при внесении азота удобрений под посевы зерновых культур (площадь 22–27 млн га) Φ_{N_2O} удобрений оценен в пределах 0.66–0.70, под пропашные в среднем: сахарная свекла – 0.93, картофель – 1.96, овоще-бахчевые – 0.77, что гораздо ниже оценок, приведенных в Кадастрах парниковых газов РФ для тех же культур.

Ключевые слова: биогеохимический цикл азота, парниковые газы, потенциал глобального потепления, азотные удобрения, закись азота, нитрификация, денитрификация, эмиссионный фактор.

DOI: 10.31857/S0002188121110089

ВВЕДЕНИЕ

Соотношение продуктов денитрификации может варьировать в зависимости от концентрации нитрата в почве, наличия легко минерализуемых органических соединений углерода и влажности почвы. Например, в работе [1], в условиях инкубационных экспериментов с почвами, взятыми с полей, имевшими длительную и разную “удобрительную” историю (применение одних минеральных удобрений или постоянное внесение навоза), показали, что отношение $N_2O : (N_2O + N_2)$ в варианте с постоянным внесением навоза было меньше, чем в варианте с минеральными удобрениями. При этом авторы выявили, что концентрация нитратов в почве также влияла на отношение $N_2O : (N_2O + N_2)$. Снижение концентрации $N-NO_3 < 20$ мг/кг сухой почвы вызывало уменьше-

ние эмиссии N_2O вплоть до 0. При концентрации $NO_3^- \leq 2$ мМ в почве в варианте с постоянным внесением навоза наблюдали более низкое отношение $N_2O : (N_2O + N_2)$ по сравнению с внесением только минерального N-удобрения. При концентрации нитратов в почве ≥ 10 мМ отношение $N_2O : (N_2O + N_2)$ было значительно больше и не зависело от вида предшествующей удобрённости. Сделано заключение, что в почвах с предшествующим удобрением минеральным азотом последующее внесение органических материалов с высоким содержанием лабильного углерода является триггером усиления денитрификации и эмиссии N_2O . В почвах с низким содержанием нитратов такое внесение органики может существенно понизить отношение $N_2O : (N_2O + N_2)$ и соответственно снизить эмиссию N_2O .

¹ Работа выполнена в рамках Госзадания 121040800126-5.

Таблица 1. Посевная площадь сельскохозяйственных культур, население Мира и применение азотных удобрений

	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2050 г. (прогноз)
Посевная площадь, млн га*	1502	1505	1550	1555	1561	1425?
Население, млн чел. **	6541	6956	7379	7464	7547	9725
Удельная площадь, га/чел.***	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.15
Применение $N_{удоб}$ * кг/га посевов	60.3	67.0	68.6	69.3	69.9	98.2***
	90.5	100.8	106.4	107.8	109.1	140***
Применение $N_{удоб}$, в расчете кг/чел., среднее***	13.8	14.5	14.4	14.4	14.4	14.4

*FAO Stat (2019 г.).

** United Nations: World Population Prospects (2019 г.).

***Наши расчеты.

По данным ФАО, потребление азотных удобрений достигло в 2017 г. 109.2 млн т [2]. Увеличивается и поступление в почвы биологического азота (в основном симбиотически связанного). По данным ФАО, в почвы сельскохозяйственных угодий Мира поступает ≈ 44 млн т биологического азота ежегодно [3].

Самые высокие дозы азотных удобрений на единицу площади посевов в настоящее время применяют в азиатских странах, среди которых лидирует Китай. В Европе по данному показателю первенство удерживают страны Западной Европы. Из постсоветских республик наибольшие количества азота на 1 га посевов применяют в Белоруссии, наименьшие – в Российской Федерации [4].

Растущее население Земли требует все большего количества продовольствия. Ежегодный прирост населения за 2010–2017 гг. составил 591 млн человек. По оценкам ООН, в конце первой половины текущего столетия население в Море увеличится на 1/3, достигнув 9.7 млрд, а к 2100 г. составит 11.2 млрд человек [5]. Это означает, что при почти не увеличивающейся общей площади пахотных угодий удельная площадь пашни на 1-го человека в Море сократится (табл. 1). Несмотря на ограниченность земельных ресурсов, мировое земледелие должно ежегодно наращивать производство продуктов питания для удовлетворения потребностей в продовольствии растущего населения Земного шара. Это означает, что и применение промышленных удобрений, а азотных в особенности, будет только наращиваться. Это в свою очередь приведет к усилению эмиссии закиси азота в атмосферу. Если принять нормы применения азотных удобрений (N, кг/га посевной площади или кг/человека) на среднемировом уровне 2017 г., то к середине текущего века применение азотных удобрений на посевах сельскохозяйственных культур в Море должно увели-

читься более чем на 1/3. Поэтому эмиссия N_2O в атмосферу из сельскохозяйственных почв также усилится.

Биогеохимический дисбаланс азота в биосфере только нарастает, поскольку высокопродуктивное товарное сельскохозяйственное производство представляет собой в значительной степени разомкнутую биогеохимическую систему. На входе в нее стоят искусственные азотные удобрения, биологическая азотфиксация и атмосферные выпадения промышленных выбросов окислов азота и аммиака, на выходе – товарная сельскохозяйственная продукция, перемещающаяся с полей на урбанизированные территории, с которых отчужденные урожаи из почв большие объемы биофильных элементов уже никогда не возвращаются обратно в почвы, а уносятся, в конечном счете, в океан, а в случае азота (преимущественно N_2) – и в атмосферу. Сопоставляя концентрацию N_2O в атмосфере с количеством применяемых азотных удобрений, можно прогнозировать, насколько может вырасти концентрация закиси азота в атмосфере к середине текущего столетия. По оценкам ФАО [2], мировая эмиссия N_2O из почв от применения азотных удобрений увеличилась с 1682 тыс. т в 2000 г. до 2272 тыс. т в 2017 г., т.е. на 35% за 17 лет. Применение азотных удобрений за тот же период выросло на 26%. Разумеется, рост эмиссии N_2O в атмосферу происходит и за счет других источников (минерализации почвенного органического вещества, сжигания биомассы, промышленных выбросов и других факторов).

ЭМИССИОННЫЙ ФАКТОР N_2O (Φ_{N_2O})

В глобальном масштабе за счет антропогенной деятельности примерно от 50 до 60% эмиссии закиси азота в атмосферу приходится на сельскохозяйственное производство, в котором главной со-

ставляющей является прямая эмиссия N_2O из почв за счет внесения минеральных и органических удобрений.

Органические и минеральные азотсодержащие соединения в почвах в разной степени подвергаются минерализации и дальнейшей нитрификации и денитрификации. Шпеер и др. [6], используя метку ^{15}N при изучении превращений NH_4^+ и NO_3^- в почве, сделали вывод о том, что денитрификация и нитрификация могут проходить одновременно с продукцией N_2O и N_2 , и что продукция N_2O из NO_3^- превосходит таковую из NH_4^+ даже в аэробных условиях и в условиях пониженной влажности.

При оценке эмиссии N_2O из почвы важную роль отводят эмиссионному фактору (Φ_{N_2O}), величина которого меняется в довольно широком интервале в зависимости от почвенно-климатических условий, содержания в почвах органических и минеральных форм азота, органического углерода, внесения в почву разных форм и доз азотных и органических удобрений, растительных остатков и азотсодержащих отходов [1, 8–32]. В приведенных ниже работах можно увидеть, как величины Φ_{N_2O} соотносятся с эмиссией N_2O из различных источников органических и минеральных соединений азота.

В обзоре Чарлес и др. [17] показано, что при обобщении 846 наблюдений кумулятивной эмиссии N_2O в опытах с внесением в почву органических и минеральных удобрений была получена средняя величина $\Phi_{N_2O} = 0.8\%$, которая меньше стандартной величины, предложенной Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC или МГЭИК) – 1%, применяемой в расчетах глобальных величин радиационного эффекта парниковых газов. Авторы [17] провели мета-анализ эмиссионных факторов N_2O на основе базы данных, содержащих 422 измерения эмиссии N_2O в 38 исследованиях, проведенных в 12-ти странах. Из европейских стран было использовано 201 наблюдение, из Северной Америки – 137, из азиатских стран – 55, из Южной Америки – 24 и из Австралии – 5. Большинство данных (393) были получены в регионах с умеренным климатом, в том числе 198 в условиях прохладного умеренного климата. Данные были сгруппированы по видам внесенных в почвы органических материалов и комбинаций этих материалов с минеральными азотными удобрениями. Анализ и обработка данных были выполнены с помощью REML-модели.

Φ_{N_2O} рассчитывали согласно следующему уравнению:

$$\Phi_{N_2O} = \frac{N_2O-N_{уд} - N_2O-N_0}{N_{уд}},$$

где $(N_2O-N_{уд} - N_2O-N_0)$ – разность между кумулятивной эмиссией N_2O из удобренных и контрольных (без удобрений) вариантов, $N_{уд}$ – количество внесенного в почву N-удобрения.

Полученные величины Φ_{N_2O} были сгруппированы, по так называемым “фертиклассам” (FertiClasses), разделенным на 3 группы: с высоким, средним и низким риском эмиссии N_2O . В группу с высоким риском эмиссии N_2O вошли такие приемы применения удобрений: навозная жижа в комбинации с минеральными азотными удобрениями ($N_{мин}$), сточные воды, жидкий навоз, сухой навоз плюс $N_{мин}$, отходы производства биогаза. Средневзвешенный Φ_{N_2O} этой группы оценили как 1.2%, с интервалом от 0.78 до 2.44%. В группу со средним риском были включены приемы внесения в почву сухого навоза, компоста и поуборочных остатков совместно с минеральными удобрениями. Средневзвешенная величина Φ_{N_2O} для этой группы вариантов была равна 0.75% с интервалом от 0.23 до 0.97%. В группу пониженного риска входило внесение в почву бумажной пульпы совместно с растительными остатками, компоста, поуборочных остатков, жидкого навоза совместно с поуборочными остатками. Средний Φ_{N_2O} этой группы был равен 0.23 с интервалом 0.07–0.28%. Авторы отмечали, что Φ_{N_2O} довольно тесно связан с такими факторами как отношение C : N в органических материалах, используемых на удобрение, физические и химические свойства почв (текстура, водопроницаемость, содержание органических азота и углерода) и климатические факторы (метеосадки).

Величина эмиссии N_2O негативно коррелирует с величиной C : N, будучи наиболее низкой при C : N ≥ 30 и наиболее высокой при C : N = 11 (типичное отношение в пахотных почвах). В комбинации с засухой и низкой величиной pH эмиссия N_2O значительно ингибируется при C : N ≤ 20 [26].

В работах китайских исследователей [19, 34] подробно рассмотрена связь между содержанием органического углерода в почвах и эмиссией N_2O при внесении органических и минеральных азотных удобрений. Например, в работе [34] в 25-летнем полевом эксперименте было показано, что средний Φ_{N_2O} во всех удобрительных вариантах

составлял 0.48 и 0.63% для сезонов выращивания кукурузы (лето) и озимой пшеницы (октябрь–май) соответственно. При обработке данных за все годы и во всех вариантах оказалось, что между эмиссией N_2O и накоплением органического углерода в почве существовала высокая корреляция ($r^2 = 0.9$, $n = 28$, $p \leq 0.001$) для кукурузы и ($r^2 = 0.77$, $n = 11$, $p \leq 0.001$) для озимой пшеницы. Более высокая продукция N_2O при повышении содержания легкоусвояемого органического углерода в почве объясняется общим повышением микробной активности и, вследствие этого, увеличением использования кислорода из почвенного воздуха, что приводило к установлению анаэробнозиса и более благоприятным условиям для денитрификации. В другой работе китайских авторов [19] показано, что 18-летнее применение компоста не только увеличило содержание органического углерода в почве на 152%, но и усилило эмиссию N_2O на 106%. Принимая во внимание, что потенциал глобального потепления (ПГП) закиси азота в 298 раз больше CO_2 , то оказывается, что эффект от секвестирования углерода с целью снижения ПГП почти полностью нивелируется дополнительными выбросами из почвы N_2O . В работе Сенбайрама и др. [1] также высказана мысль, что обогащение почвы легкодоступным органическим углеродом усиливает микробное дыхание и, как следствие, происходит усиление денитрификации и эмиссии N_2O . Таким образом, обогащение почвы органическим углеродом не всегда благоприятствует целям сокращения выбросов парниковых газов в земледелии.

В обзоре Лесчен и др. [23] величины Φ_{N_2O} сгруппированы в зависимости от вида землепользования, свойств почв и применения органических и минеральных азотных удобрений. Авторы отмечали, что в минеральных почвах содержание органического азота – достаточно постоянная величина в течение ряда лет, и чистая минерализация оценивается величиной, близкой к нулю. Отмечено также, что на пастбищах в целом Φ_{N_2O} гораздо больше, чем на пахотных почвах. В целом при одном и том же количестве внесенных аммонийных и нитратных удобрений Φ_{N_2O} на пашне был соответственно в 0.5 и 0.8 раза меньше, чем на пастбищах.

На эмиссию N_2O из почвы оказывает влияние рН среды. Автотрофная нитрификация весьма чувствительна к величине рН почвенной среды. Показано [21], что при рН < 4.0–4.5 в естественных почвах автотрофная нитрификация практически отсутствует. Поэтому при незначительной

продукции нитратов в почве, что происходит в результате низкой активности нитрификации, денитрификация также характеризуется низкой активностью.

Почвенные влажность и температура могут объяснить 74 и 86% вариаций эмиссии N_2O соответственно [26]. Повышение почвенной температуры ведет к увеличению почвенного дыхания, как позитивный ответ усиления микробного метаболизма. Эмиссия N_2O усиливается вслед за повышением почвенного дыхания, и это ведет к снижению содержания кислорода в почвенном воздухе. Но позитивный отклик на температуру может быть сглажен за счет водного стресса, поскольку вода – один из важных факторов, определяющих активность микроорганизмов. Эмиссия N_2O из почвы возрастает вплоть до 37°C, затем интенсивность продукции N_2O снижается. Величины Q_{10} для N_2O варьируют в пределах 1.7–9.3. Температура является важным фактором на границе замерзания–оттаивания почвы и может быть ответственной за 50% от годовой эмиссии N_2O [26].

Физические свойства почв также влияют на величину Φ_{N_2O} . В целом при прочих равных условиях эмиссия N_2O возрастает с утяжелением гранулометрического состава почв. В качестве примера приведем данные по эмиссии N_2O в полевом опыте с применением азотных удобрений в посевах многолетних трав в Шотландии [18]. Почва – тяжелый плохо дренированный суглинок, с содержанием органического углерода 5%. Различные формы азотных удобрений (сульфат аммония, мочевины, аммиачную селитру, кальциевую селитру и жидкий навоз) вносили в 3 приема в течение вегетации и в общей дозе N_{360} . Опыт проводили в течение 2-х лет. Эмиссию N_2O из почвы измеряли еженедельно. В среднем за 2 года потери азота к общей дозе внесенного азота в виде N_2O соответствовали 0.3–0.8%. Эмиссия N_2O на делянках без внесения удобрений (контроль) в среднем составляла всего лишь 0.15 кг/га/год. Если отнести эту величину к минерализованному органическому веществу с $C : N = 12$ и средней величиной гетеротрофного дыхания ≈ 3000 кг С/га, тогда количество минерализованного азота почвы (горизонт 0–20 см) составило бы 250 кг N/га и Φ_{N_2O} мог составить всего лишь 0.06%.

На песчаных почвах [18] Φ_{N_2O} в среднем был равен 0.08, 0.51 и 0.26% от дозы N, соответственно для кальций-аммоний-нитратного удобрения, жидкого навоза и комбинации из этих двух ком-

понентов. А на тяжелой суглинистой почве эти величины были соответственно равны 1.18, 1.21 и 1.69%. В итоге авторы предлагают более гибкую систему оценки территориальной суммарной эмиссии парниковых газов, учитывающей региональные особенности землепользования и гранулометрический состав почв. Это позволит с большей объективностью использовать Φ_{N_2O} в практических рекомендациях по снижению отрицательных последствий эмиссии парниковых газов.

Приемы обработки почв – один из факторов, влияющих на величину эмиссии закиси азота. Вид обработки может быть отнесен к тем факторам, которые оказывают косвенное воздействие на размеры денитрификации в целом и на эмиссию закиси азота в частности. Например, минимальная обработка почвы (*NT*) способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большого количества растительных остатков и формирования горизонта A0. Это в свою очередь снижает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также снижает температуру почвы. Показано, что минимальная обработка почвы вызывает увеличение численности денитрифицирующих микроорганизмов [20]. Комбинация минимальной обработки почвы и применения азотных удобрений приводит к усилению потерь газообразного азота. Например, Пальма и др. [27] обнаружили в 2 раза большие потери азота удобрений за счет денитрификации при минимальной обработке почвы по сравнению с нормальной пахотой за 90-суточный период. При этом была установлена весьма тесная положительная связь между количеством денитрифицирующих микроорганизмов и газообразными потерями азота.

В работе Крауса и др. [22] на глинистой богатой почве (Швейцария) было показано, что при внесении жидкого навоза в условиях травяно-клеверного пара и минимальной обработки почвы эмиссия N_2O была меньше по сравнению с традиционной пахотой, и Φ_{N_2O} при пахотной системе составил 0.71%, в условиях минимальной обработки – 0.65%. В случае озимой пшеницы не было различий в эмиссии N_2O как при обычной пахоте, так и при *NT*.

В приведенном выше обзоре использованы англоязычные источники, география которых включает, прежде всего, западно-европейские, северо-американские и китайские данные. В мета-анализе данных эмиссии не только приведенных авторов, но и в обзорах других исследователей практически отсутствуют ссылки на работы российских исследователей. Причина – очень

малое количество подобных работ в России. Исключение составляют работы Агрофизического института (С.-Петербург) [9–12, 15, 30, 35, 36].

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ ПАХОТНЫХ ПОЧВ РОССИИ

В работах сотрудников Агрофизического института РАН (С.-Петербург) [9, 12, 30, 36, 37] приведены результаты исследований влияния минеральных и органических удобрений на эмиссию N_2O из почвы. Наблюдения проведены в многолетнем полевом опыте на легкой супесчаной окультуренной почве с содержанием органического углерода 1.8% и на той же унавоженной почве (внесение навоза 700 т/га в течение 10 лет) с $C_{орг} = 2.3\%$. Кумулятивные потоки N_2O за вегетационный период (120 сут) из почвы в контроле без удобрений составляли 247.7 ± 56.7 г N- N_2O /га и 519.7 ± 37.2 г N- N_2O /га, а при внесении минерального удобрения в дозе N90 – 299.9 ± 26.6 г и 583.7 ± 71.2 г N- N_2O /га соответственно [10]. Следовательно, эмиссия N- N_2O за счет внесения одного минерального N-удобрения была всего лишь 52.2 г и 64 г N/га ($299.0 - 247.7 = 52.2$ г N/га и $583.7 - 519.7 = 64$ г N/га) соответственно для почвы без внесения навоза и унавоженной. Тогда Φ_{N_2O} внесенного $N_{мин}$ в дозе 90 кг/га будет в пределах 0.058–0.071%, что гораздо меньше стандарта IPCC, равного 1%. Авторы показали, что эмиссия N_2O из агроземов в различных системах земледелия за все время исследований не превышала 5 мг N_2O -N/га/сут, если почва содержала <10 мг $N_{мин}$ /кг почвы. При внесении зеленых или органических удобрений показатель Φ_{N_2O} не превышал 0.62–0.75% [11]. В другой работе [15], проведенной на той же почве, обогащенной 2-мя дозами навоза (160 и 80 т/га) и в контроле (без навоза) проводили опыты с картофелем и капустой при внесении дополнительно 70–120 кг $N_{мин}$ /га и измеряли кумулятивную эмиссию N_2O за вегетационный период. Авторы установили, что кумулятивный поток N_2O как при внесении дополнительного количества $N_{мин}$ в дозах 70–110 кг/га, так и без его внесения, был практически во всех вариантах одинаковым (N- N_2O , кг/га): без внесения $N_{мин}$ – 0.37 ± 0.08 , 0.45 ± 0.11 , 0.43 ± 0.06 , 0.53 ± 0.07 , 0.34 ± 0.09 , 0.37 ± 0.10 и при внесении $N_{мин}$ в дозах 70–110 кг/га – 0.36 ± 0.05 , 0.42 ± 0.08 , 0.45 ± 0.07 , 0.56 ± 0.08 , 0.36 ± 0.11 , 0.60 ± 0.12 . Приведенные данные свидетельствуют, что различия в эмиссии N_2O не наблюдали между вариантами как с внесением минерального азотного удобрения, так и без него. Объяснение такого яв-

ления кроется, по-видимому, в продолжающемся довольно высоком последствии больших доз внесенного навоза, который, возможно, определял и перекрывал в значительной степени эмиссию N_2O из минеральных азотных удобрений. Следует добавить, опыт проводили с пропашными культурами при достаточном увлажнении, что способствовало более высокой минерализации легкоразлагаемых азотсодержащих органических соединений оставшегося в почве навоза.

Как было показано выше, основным вкладом в эмиссию закиси азота из почв является применение всех видов азотсодержащих минеральных и органических удобрений, а также различных отходов органического происхождения. Весьма интересным является факт, что по усредненным мировым показателям для всех видов удобрений ЭФ_{N_2O} приближается к 1% от количества, внесенного в почву азота. Этот коэффициент принят ИРСС за стандарт в 2006 г. и в последнем обновлении методики расчетов эмиссии парниковых газов в 2019 г. подтвержден ИРСС на прежнем уровне [38]. В новом стандарте допускается корректировка этого коэффициента в зависимости от климатических условий. Для условий влажного климата умеренного и бореального поясов (коэффициент увлажнения >1) за стандарт принимают $\text{ЭФ}_{N_2O} = 1.6\%$ от внесенного в почву количества N минеральных удобрений. Для других источников азота принимают $\text{ЭФ}_{N_2O} = 0.6\%$. В условиях недостаточного увлажнения (коэффициент увлажнения <1) для всех источников азота принимают $\text{ЭФ}_{N_2O} = 0.5\%$. Судя по проанализированному литературному материалу, следует отметить, что для предлагаемой ИРСС градации недостаточно оснований.

Кадастровая оценка эмиссий парниковых газов для пахотных угодий в РФ использует постоянно меняющиеся посевные площади сельскохозяйственных культур. За последние 25 лет произошло перераспределение пахотных угодий страны. По определению Люри и сотр. [39–41], для современного земледелия характерно динамическое изменение рядов площадей аграрных угодий в регионах России. Авторами [40] для анализа был выбран параметр “площадь посевов”, т.к. параметры “площадь сельскохозяйственных угодий” и “площадь пашен” являются элементами земельной статистики, инвентаризация которых происходит редко. В то время как данные о посевных площадях — это ежегодные отчеты сельскохозяйственных предприятий, отражающие фактическую ситуацию. Кроме того, следует принимать во внимание гидротермические усло-

вия расположения пахотных угодий. Сочетание достаточной теплообеспеченности (сумма температур $>10^\circ = >2500^\circ$) с удовлетворительным увлажнением (коэффициент увлажнения >0.75) наблюдается только на 1% территории земельных угодий России [42].

Еще один показатель, который должны принимать во внимание — это доля удобряемой площади. Площадь пашни, на которой вносили минеральные азотные удобрения за последние 18 лет, составляла 21 600–47 200 тыс. га [43]. Внесение минеральных азотных удобрений в среднем на 1 га удобряемой пашни за период 2000–2018 гг. находилось на уровне 26.5–32.4 кг $N/га$ [43]. Внесение органических удобрений за этот же период осуществлялось лишь на 3–9% от общей площади посевов и составляло в пересчете на общий азот 35.0–206.0 кг $N/га/год$. Величина 206 кг $N/га$ относится к 2000 г., значительно выделяется из общего ряда доз органического азота, внесенного в период 2000–2018 гг. и никак не объясняется. При этом, следует отметить, что имелись существенные различия в дозах внесения как минеральных, так и органических удобрений в зависимости от возделываемых культур. Например, сахарную свеклу, овощные и картофель удобряли значительно больше, чем другие культуры [43].

Пример расчета эмиссии N_2O из пахотных почв РФ при внесении азотных удобрений. В обзорах [17, 19, 23, 26, 32, 44] показаны основные факторы, влияющие на эмиссию N_2O из почв. В число этих факторов входят формы, виды и дозы минеральных и органических удобрений, технологии земледелия, почвенно-климатические условия и др. Среди перечисленных одним из главных факторов, определяющих величину ЭФ_{N_2O} , который необходимо учитывать при составлении региональных кадастров эмиссии парниковых газов, является учет зависимости ЭФ_{N_2O} от количества вносимого в почву азота. В качестве примера может служить работа Щербака и др. [32], четко показавшая эту зависимость. Авторами выполнен мета-анализ данных, полученных на основе полевых исследований, включивших 84 местности, 233 опыто-лет, с не менее чем 3-мя уровнями применения N -удобрений и сделанных более 1000 измерений эмиссии N_2O . В условиях данного исследования усредненный ЭФ_{N_2O} определен в среднем в размере $\approx 0.9\%$. Эта величина являлась средней для всех видов удобрений, среди которых при внесении синтетических (минеральных) азотных удобрений ЭФ_{N_2O} равен 1.0%, органических (навоз) — 0.8% [32]. Авторы установили, что

Таблица 2. Основные показатели состояния баланса азота в земледелии России за период 1992–2016 гг.

В среднем в год за период	Вынос азота урожаями основных сельскохозяй- ственных культур	Внесение азота со всеми видами удобрений на всех посевных площадях	Баланс азота	Возмещение выноса азота урожаями внесе- нием удобрений, %
	млн т			
1992–1995	3.40	1.72	–1.68	50.6
1996–2000	3.10	0.94	–2.16	30.3
2001–2005	3.39	0.70	–2.70	20.6
2006–2010	3.57	1.06	–2.69	29.7
2011–2015	4.00	1.28	–2.72	32.0
2016	7.51	1.40	–6.11	18.6
На 1 га посевов (всего N, кг/га за 25 лет)	1145	352	–792	30.7
N, кг/га/год	45.8	14.1	–31.7	30.7

для большинства культур ответ эмиссии N_2O на увеличение дозы минерального N-удобрения рос значительно быстрее, чем линейное повышение дозы N. Было также замечено, что прибавка $\Delta\Phi_{N_2O}$ ($\Delta\Phi_{N_2O}$) с дозой N была более выраженной для почв с содержанием $C_{орг} > 1.5\%$ и $pH < 7.0$, и если удобрения применяли в один прием. Общий тренд экспоненциального увеличения $\Delta\Phi_{N_2O}$ совпадал с применением N-удобрения в количестве, явно превышающем потребность растений в азоте. В интервале доз азота 150–200 кг/га Φ_{N_2O} был равен 1% и совпадал со стандартом IPCC. Но если дозы азота возрастали до 300 кг/га, то Φ_{N_2O} возрастал на 25% по сравнению со стандартом IPCC. Для культур, не получавших достаточного количества азота, т.е. ≤ 50 кг N/га $\Delta\Phi_{N_2O}$ снижался на 25%. Это значит, что, если используют стандарт IPCC для вычисления эмиссионного фактора в условиях применения небольших доз (до 100 кг N/га), расчеты эмиссии N_2O будут значительно завышены, а при внесении 200–300 кг N/га – значительно занижены. На основе большого объема систематизированного экспериментального материала авторы работы [32] разработали модель расчета $\Delta\Phi_{N_2O}$ для установления эмиссии N_2O в зависимости от дозы минерального N-удобрения:

$$\Delta\Phi_{N_2O} = (0.001N[6.49 + 0.0187N]),$$

где $\Delta\Phi_{N_2O}$ – приращение эмиссии N- N_2O (кг/га), N – доза удобрения (кг/га).

Модель [32], предложенная для расчетов Φ_{N_2O} , является более гибкой в смысле учета вносимых доз азота, а отсюда и более объективной, чем стандарт IPCC [38, 45], который построен на

“прямолинейном отношении эмиссия N_2O : доза N”. Кроме того, коэффициент IPCC одинаков для всех источников азота, будь то азот самой почвы, азот растительных остатков или различные азотосодержащие удобрения. Объективность модели Щербака и др. [32] подтверждена аналогичными исследованиями [36]. Кроме того, в обзорах [17, 23, 44] стандарт IPCC [37, 39] подвергается критике.

В наших расчетах эмиссии N_2O и $\Delta\Phi_{N_2O}$ на пахотных угодьях РФ были взяты данные Росстата [43] по посевным площадям сельскохозяйственных культур и применению удобрений за последние 25 лет. Земледелие в эти годы характеризовалось остродефицитным балансом азота, т.е. в пересчете на 1 га посевов вынос азота урожаями в течение 25 лет превышал его внесение более чем на 30% (табл. 2) [4]. Это означает, что значительная доля урожая формировалась за счет минерализованного азота почвы. При такой ситуации, очевидно, остаточные количества подвижного азота удобрения в почве и его дальнейшие потери как за счет денитрификации, так и вымывания нитратов, должны быть ничтожно малы.

Если посмотреть дозы азота, которые вносили под посевы сельскохозяйственных культур за рассматриваемый период на пахотных угодьях России (табл. 3), то они находятся на нижнем пределе величины Φ_{N_2O} , который отмечен в различных обзорах эмиссии N_2O , включая и стандарты IPCC. При дефицитном балансе азота эмиссионный фактор зависит, прежде всего, от условий увлажнения. В документе IPCC от 2019 г. [38] допускается дифференциация стандартных величин Φ_{N_2O} в зависимости от климатических условий: умеренного и бореального поясов (при ко-

Таблица 3. Расчетные данные эмиссии N₂O в посевах зерновых культур (кроме кукурузы и риса), удобренных азотом* (за период 2000–2018 гг.)

Годы	Удобряемая азотом площадь**, тыс. га	N, кг/га/год	Внесено N _{удобр.} под посевы зерновых культур, тыс. т	Эмиссия N-N ₂ O***, кг/га/год	ЭФ _{N₂O}	Эмиссия N-N ₂ O, т/год
2000	12 307	10.0	123.1	0.066	0.66	812
2005	13 949	15.0	209.2	0.101	0.67	1409
2010	18 145	20.0	362.9	0.137	0.68	2486
2015	22 372	22.0	492.2	0.151	0.68	3378
2018	27 340	30.0	820.2	0.212	0.70	5796

*Сумма минерального и органического азота.

** Данные Росстата (2019 г.).

***Вычислено по модели Щербака (пояснения в тексте).

эффиценте увлажнения >1) за стандарт принимается $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}} = 1.6\%$ от внесенного в почву количества N минеральных удобрений. Для других источников азота (пожнивные остатки, почвенный органический азот) принимается $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}} = 0.6\%$. В условиях недостаточного увлажнения (коэффициент увлажнения <1) для всех источников азота принимается $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}} = 0.5\%$.

Модель Щербака и др. [32] была построена на данных эмиссии N₂O из почв под посевами суходольных зерновых культур с применением азотных удобрений в интервале доз 0–300 кг N/га. Как видно из табл. 3, дозы N, которые вносили под посевы зерновых РФ изменялись в интервале 10.0–30.0 кг/га. Расчет эмиссии N-N₂O по модели [32] дает результат 0.066–0.212 кг/га. Эмиссионный фактор за счет применения минеральных азотных удобрений под зерновые культуры оказался при этом в среднем за почти 20-летний период в интервале 0.66–0.70 и значительно более низким, чем тот, который использовали для расчетов кадастра парниковых газов по методике МГЭИК [46, 47].

Зерновые культуры занимают максимальную посевную площадь страны, составляя за последние 25 лет 54–59% от общей площади посевов всех культур [43], а применение минеральных удобрений происходило лишь на 27–59% площади от общих посевов зерновых [43]. Правда, в последние годы в РФ происходит расширение удобряемых площадей сельскохозяйственных культур, включая и зерновые.

Другими культурами по суммарному размеру посевных площадей с применением удобрений являются картофель, сахарная свекла и овощные культуры. Эти же культуры возделывают при гораздо более высоком, чем зерновые, применении азотных и органических удобрений (табл. 4). Од-

нако доля органических удобрений в составе применяемых удобрений очень неравномерна в зависимости от культуры. Например, под сахарную свеклу вносят $<10\%$ азота в виде навоза. Применение органики под эту культуру остается крайне низким и продолжает снижаться по сравнению с началом 2000-х годов. Более высокие дозы органического азота вносят под картофель, составляя в среднем за последние годы $\approx 30\%$. Под овощные культуры доля органического азота составляет в среднем по годам $\approx 22\%$. В этих условиях определяющим фактором эмиссии закиси азота из почв будут минеральные азотные удобрения, поскольку N_{мин} сразу после внесения в почву “готов” к использованию нитрифицирующими и денитрифицирующими организмами. Внесенный органический азот должен пройти стадию минерализации, а затем уже подвергнуться нитрификации и денитрификации. В данном случае можем допустить, что величина $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ в почве при таком соотношении внесенного минерального и органического азота будет зависеть в большей степени от суммарного количества внесенного азота. Поэтому мы сочли возможным для расчета $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ с определенной долей условности и для пропашных культур использовать модель Щербака и др. [32].

Как видно, в отличие от зерновых культур, получающих гораздо меньше азота, в случае с пропашными культурами эмиссионный фактор гораздо больше. В табл. 4 сгруппированы данные по величине эмиссионного фактора и общей эмиссии N₂O при возделывании основных пропашных культур. Наиболее высокий $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ показан для картофеля, но и внесение азота под эту культуру больше, чем под другие. В посевах сахарной свеклы и овощных культур $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ довольно близок. В целом $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ гораздо больше зависит от дозы

Таблица 4. Пропашные культуры, удобряемые минеральными и органическими удобрениями в земледелии РФ за период 2000–2018 гг.* и расчетный эмиссионный фактор**

Годы	Показатель	Свекла сахарная	Картофель	Овоще-бахчевые
2000	Площадь, тыс. га	805	2834	744
	N _{мин} , кг/га	60	78.0	42.0
	N _{орг} , кг/га	9	135	35
	Всего N _{мин+орг} , кг/га	69	213	77
	ЭФ _{N₂O}	0.54	2.26	0.61
2005	Площадь, тыс. га	799	2277	641
	N _{мин} , кг/га	126	90.0	57.0
	N _{орг} , кг/га	11.5	80	25
	Всего N _{мин+орг} , кг/га	137.5	170	82
	ЭФ _{N₂O}	1.24	1.64	0.65
2010	Площадь, тыс. га	1159	1948	603
	N _{мин} , кг/га	138	132.0	90.0
	N _{орг} , кг/га	10	45	15
	Всего N _{мин+орг} , кг/га	148	177	105
	ЭФ _{N₂O}	1.37	1.73	0.88
2015	Площадь, тыс. га	1021	1562	563
	N _{мин} , кг/га	137	164	83.0
	N _{орг} , кг/га	11	30	20
	Всего N _{мин+орг} , кг/га	147	194	103
	ЭФ _{N₂O}	1.36	1.96	0.86
2018	Площадь, тыс. га	1127	1325	526
	N _{мин} , кг/га	152	187.0	94.0
	N _{орг} , кг/га	11	25	10
	Всего N _{мин+орг} , кг/га	162	212	104
	ЭФ _{N₂O}	1.54	2.20	0.87
ЭФ _{N₂O} (средние за 2000–2018 гг.)		0.93	1.96	0.77

*Данные Росстата (2019 г.).

** Рассчитан по модели Шербака (2014 г.).

применяемых азотсодержащих удобрений, чем от вида возделываемой культуры.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитический обзор ключевой литературы по глобальной проблеме эмиссии закиси азота показал следующее. Если усиление концентрации углекислого газа и метана связано с развитием энергетики, и выброс этих газов можно контролировать за счет перехода на другие виды энергии (атомную энергию, гидроэнергию, ветровую и др.), а высококонцентрированные промышленные выбросы CO₂ могут утилизироваться

химическим путем в устойчивые, малоактивные формы или, в конечном итоге, захораниваться на океанскую глубину, то ограничение выбросов закиси азота – безусловно более сложная задача. Применение ингибиторов нитрификации или уреазной активности – это всего лишь откладывание на сравнительно небольшое время мобилизации оставшегося в почве азота удобрений. Через какое-то время этот азот будет вновь вовлечен в процессы нитрификации и денитрификации – таков общий закон круговорота азота.

Уменьшение эмиссии N₂O путем сдерживания роста применения азотных удобрений скажется на ограничении производства продуктов пита-

ния. Сейчас и в обозримом будущем именно сельскохозяйственное производство является и будет являться незаменимым производителем продуктов питания для человека. Ограничение применения азотных удобрений в сельскохозяйственном производстве при одновременном естественном сокращении удобных для возделывания земель будет грозить человечеству нарастанием дефицита продовольствия. Отсюда разумное регулирование применения синтетического и биологического азота является лишь паллиативом, и радикальное решение проблемы пока не просматривается.

Следует внимательнее присмотреться к предлагаемым приемам секвестирования атмосферной углекислоты. С одной стороны, связывание CO_2 в органическое вещество почвы на какой-то срок (десятилетия или даже на столетия) выводит CO_2 из атмосферы, но, с другой, обогащение почвы органическим углеродом активизирует дыхание почвенной биоты и понижает концентрацию кислорода в почвенном воздухе. Снижение кислорода в почве провоцирует усиление процесса денитрификации. Работами китайских исследователей показано [34], что многолетнее применение компоста не только увеличило содержание органического углерода в почве на 152%, но и увеличило эмиссию N_2O на 106%. Принимая во внимание, что ППП закиси азота в 298 раз больше, чем CO_2 , то оказывается, что эффект от секвестирования углерода с целью снижения ППП почти полностью нивелируется дополнительными выбросами из почвы N_2O . Таким образом, обогащение почвы органическим углеродом не всегда благоприятствует целям сокращения выбросов парниковых газов в земледелии.

Проблема точной оценки выбросов закиси азота в атмосферу еще далека до своего разрешения. Причина – недостаточное количество экспериментальных исследований *in situ*, дороговизна аналитического оборудования. Многие регионы Земли практически не охвачены мониторингом эмиссии закиси азота, включая обширные территории России. Наиболее продвинутыми в решении проблемы закиси азота являются европейские и северо-американские страны. Широким охватом идут исследования в Китае.

Сбором информации о парниковых газах и ее обработкой в мировом масштабе занимается МГЭИК, данные которой представляют собой совокупность национальных кадастров инвентаризации парниковых газов, которые выполнены по единой методике.

В соответствие с обязательствами по выполнению Рамочной конвенции ООН об изменении

климата, Киотского протокола и Парижского соглашения по климату Российская Федерация регулярно представляет в МГЭИК “Национальные доклады о кадастре антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов” [47]. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов разработаны МГЭИК по поручению Рамочной конвенции ООН об изменении климата [46]. Однако оценки эмиссий парниковых газов, получаемые МГЭИК и ФАО, в значительной степени генерализованы. Причина – крайняя недостаточность экспериментальных данных в большинстве регионов. Представляемые Россией в МГЭИК национальные кадастры парниковых газов, включая данные эмиссии N_2O , основываются исключительно на данных, полученных расчетным путем с использованием статистической информации и пересчетных коэффициентов эмиссионных факторов, которые рекомендует МГЭИК. Поскольку по территории России имеются весьма ограниченные данные эмиссии N_2O , то МГЭИК предлагает в расчетах использовать по умолчанию коэффициенты, полученные в основном для условий Западно-европейских стран с умеренным климатом.

Сбором данных эмиссии парниковых газов в сельскохозяйственном производстве занимается также ФАО. Но данные ФАО эмиссий газов также являются весьма ориентировочными [2]. Например, согласно этим данным, за 2005–2017 гг. эмиссию N_2O при применении азотных удобрений рассчитывали, исходя из единой величины эмиссионного фактора, равного 1.33% (допускается, что из каждого кг азота, внесенного с минеральными и органическими удобрениями в почву, выделяется в атмосферу 0.0133 кг $\text{N-N}_2\text{O}$ или 1.33% от количества внесенного азота). Это означает, что для стран, находящихся в весьма контрастных природно-климатических условиях (например, Индия, Китай, Франция, Германия, Финляндия, РФ и другие страны), принимается одинаковое допущение, что трансформация всех видов удобрений совершенно одинакова во всех типах почв. Однако, как показано выше в обзоре, существует большая вариация эмиссии N_2O и величины $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ в зависимости от доз и форм азотных и органических удобрений, почвенно-климатических условий, приемов земледелия, выращиваемых культур и многих других факторов. Экстраполяция данных, полученных в странах Западной Европы, для условий России не всегда приемлема, поскольку почвенно-климатические условия страны весьма разнообразны [1, 2, 9, 10, 13, 15, 19–28, 31, 32, 34, 36, 44, 48–50].

Значительные площади почвенного покрова в северо-, средне- и южно-таежной зонах имеют невысокое плодородие, характеризуются кислой реакцией среды. В целом $\approx 75\%$ земельных ресурсов страны находится в пределах холодного пояса и малообеспеченных теплом горных областей. В степной и сухостепной зонах с недостаточным увлажнением площади пахотных угодий России составляют $\approx 15\%$ [42]. Для большинства регионов, в которых ведется сельскохозяйственное производство, продолжительность безморозного периода гораздо короче, и как следствие продуктивность всех микробиологических процессов азотного цикла в почвах в абсолютных величинах меньше, чем в почвах Западной Европы.

С конца 1990-х–начала 2000-х гг. IPCC приняла стандартную величину для $\Phi_{N_2O} = 1\%$. Эта величина применяется не только для расчетов эмиссии N_2O из почвы при внесении в нее всех видов и доз азотосодержащих удобрений, но и различных растительных остатков, других азотосодержащих материалов, минерализованного азота самой почвы независимо от почвенно-климатических условий и типов земледелия [45]. В пересмотренном варианте 2019 г. [38] руководящих указаний IPCC величина $\Phi_{N_2O} = 1\%$ была подтверждена для дальнейшего использования несмотря на то что эта величина подвергается критике со стороны многих исследователей. Мы уже рассматривали более гибкий подход к расчету Φ_{N_2O} с учетом интервала доз азотных удобрений [32]. Однако в руководствах IPCC в глобальном масштабе принята более высокая величина $\Phi_{N_2O} = 1.25\%$ [46].

Из приведенного обзора работ по эмиссии N_2O можно сделать заключение, что стандартные величины Φ_{N_2O} (IPCC, МГЭИК и ФАО), используемые для глобальных расчетов ППП, заведомо больше по сравнению с фактически получаемыми многочисленными данными в различных регионах мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senbayrama M., Chenc R., Budaid A., Bakkend L., Ditterb K.* N_2O emission and the $N_2O/(N_2O + N_2)$ product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2012. V. 147. P. 4–12.
2. FAO Stat. 2019. http://faostat.fao.org/stat-ic/syb/syb_5000.pdf
3. World fertilizer trends and outlook to 2018. Rome: FAO, 2015. 66 p.
4. *Кудеяров В.Н.* Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 3–14.
5. United Nations: World Population Prospects 2019: Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics.
6. *Speir T.W., Kettles H.A., More R.D.* Aerobic emissions of N_2O and N_2 from soil cores: measurement procedures using ^{13}N -labelled NO_3^- and NH_4^+ // *Soil Biol. Biochem.* 1995. V. 27. P. 1289–1298.
7. *Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П.* Влияние биоугля на индикаторы качества дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Мат-лы Международ. научн.-техн. конф. Минск: Изд-во Беларуская навука, 2019. С. 150–154.
8. *Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П.* Влияние биоугля на индикаторы качества дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Перспективы и технологии развития естественных и математических наук*. Н. Новгород, 2019. Вып. IV. С. 24–25.
9. *Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В.* Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // *Почвоведение*. 2015. № 2. С. 211–220.
10. *Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балашов Е.В.* Многолетний мониторинг прямой эмиссии закиси азота из дерново-подзолистых почв // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Мат-лы II Международ. научн. конф., посвящ. памяти акад. Е.И. Ермакова. СПб.: АФИ РАН, 2019. С. 117–122.
11. *Рижия Е.Я., Мухина И.М., Бучкина Н.П., Балашов Е.В.* Управление прямой эмиссией закиси азота в системах земледелия // Реализация методологических и методических идей профессора Б.А. Доспехова в совершенствовании адаптивно-ландшафтных систем земледелия. М.: РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017. С. 190–194.
12. *Buchkina N.P., Balashov E.V., Rizhiya E.Y., Smith K.A.* Nitrous oxide emissions from a light-textured arable soil of North-Western Russia: Effects of crops, fertilizers, manures and climate parameters // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2010. V. 87. № 3. P. 429–442. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9349-5>
13. *Baresel C., Andersson S., Yang J., Andersen M.H.* Comparison of nitrous oxide (N_2O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations // *Adv. Climat. Change Res.* 2016. V. 7. P. 185–191.
14. *Bin-feng S., Hong Z., Yi-zhong L., Fei L., Xiao-ke W.* The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands // *J. Integrat. Agricult.* 2016. V. 15 (2). P. 440–450.
15. *Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V.* Soil physical properties and nitrous oxide emission from agricultural soils // *Adv. Agrophys. Res.* 2013. P. 193–220.

16. CAST (Council for Agricultural Science and Technology), "Effect of Increased Nitrogen Fixation on Stratospheric Ozone," Iowa, 1976. Rep. № 53.
17. Charles A., Rochette P., Whalen J.K., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2017. V. 236. P. 88–98.
18. Clayton H., McTaggart I.P., Parker J., Swan L., Smith K.A. Nitrous oxide emissions from fertilized grassland: A 2-year study of the effects of N fertilizer form and environmental conditions // *Biol. Fertil. Soils.* 1997. V. 25. P. 252–260.
19. Ding W., Luo J., Li J., Yu H., Fan J., Liu D. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N₂O and fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 465. P. 115–124.
20. Doran J.W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. V. 44. P. 765–771.
21. Duggin J.A. Autotrophic and heterotrophic nitrification in response to clearcutting northern hardwood forest // *Soil Biol. Biochem.* 1991. V. 23. P. 779–787.
22. Krauss M., Ruser R., Müller T., Hansen S., Mäder P., Gattinger A. Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley winter wheat cropping sequence // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2017. V. 239. P. 324–333.
23. Lesschen J.P., Velthof G.L., Wim de Vries, Kros J. Differentiation of nitrous oxide emission factors for agricultural soils // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159. P. 3215–3222.
24. Marco A., Esposito F., Berg B., Giordano M., Virzo A. De Santo. Soil C and N sequestration in organic and mineral layers of two coeval forest stands implanted on pyroclastic material (Mount Vesuvius, South Italy) // *Geoderma.* 2013. V. 209–210. P. 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.011>
25. Miao Y., Stewart B.A., Zhang F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review // *Agron. Sustain. Develop.* Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. 2011. V. 31. P. 397–414. <https://doi.org/10.1051/agro/2010034>
26. Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmí S. Greenhouse gas emissions from soils – A review // *Chemie der Erde.* 2016. V. 76. P. 327–352.
27. Palma R.M., Rímolo M., Saubidet M.I., Conti M.E. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils // *Biol. Fertil. Soils.* 1997. V. 25. P. 142–146.
28. Rapson T.D., Dacres H. Analytical techniques for measuring nitrous oxide (Review) // *Trends Analyt. Chem.* 2014. V. 54. P. 65–74.
29. Rashti M.R., Wang W.J., Chen C.R., Reeves S.H., Scheer C. Assessment of N₂O emissions from a fertilized vegetable cropping soil under different plant residue management strategies using ¹⁵N tracing techniques // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 598. P. 479–487.
30. Rizhiya E.Y., Mukhina I.M., Balashov E.V., Šimansky V., Buchkina N.P. Effect of biochar on N₂O emission, crop yield and properties of Stagnic Luvisol in a field experiment // *Zemdirbyste-Agriculture.* 2019. V. 106. № 4. P. 297–306.
31. Shan J., Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils // *Atmospher. Environ.* 2013. V. 71. P. 170–175.
32. Shcherbak I., Millar N., Robertson G.P. Global meta-analysis of nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen // *PNAS.* 2014. June 24. V. 111. № 25. P. 9199–9204.
33. Klemetsson L., Klemetsson A.K., Moldan F. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. // *Biol. Fertil. Soils.* 1997. V. 25. P. 290–295.
34. Gu J., Yuan M., Liu J., Hao Y., Zhou Y., Qu D., Yang X. Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implication of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 595. P. 371–379.
35. Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П. Влияние биоугля на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности // Научно-технический прогресс в сельскохозйственном производстве. Мат-лы Международ. научн.-техн. конф. Минск: Изд-во Беларуская навука, 2019. С. 150–154.
36. Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Бучкина Н.П., Панова Г.Г. Влияние пожнивных остатков с различным отношением С/Н на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Почвоведение.* 2011. № 10. С. 1251–1259.
37. Зинченко С.И., Зинченко М.К., Бучкина Н.П., Рижия А.Я. Экологическая оценка влияния приемов основной обработки в агроэкосистемах на биологические свойства серой лесной почвы // Сб. докл. Всерос. научн.-практ. конф. ГНУ ВНИИЗиЗПЭ, 10–12 сентября 2014 г. Курск, 2014. С. 127–133.
38. IPCC 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eds. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. Published: Switzerland: IPCC, 2019.
39. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
40. Люри Д.И., Некрич А.С., Карелин Д.В. Изменение пахотных площадей в России в 1990–2015 гг. и почвенная эмиссия диоксида углерода // *Вестн. МГУ. Сер. 5, географ.* 2018. № 3. С. 70–76.
41. Некрич А.С., Люри Д.И. Изменения динамики аграрных угодий России в 1990–2014 гг. // *Изв. РАН. Сер. географ.* 2019. № 3. С. 64–77.
42. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России // Верс. 1.0. Коллект. монограф. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
43. Россия в цифрах. 2019. Кратк. статист. сб. // М.: Росстат, 2019. 549 с.
44. H'enault C., Grosse A., Mary B., Roussel M. and L'eonard J. Nitrous oxide emission by agricultural soils: A

- Review of spatial and temporal variability for mitigation // *Pedosphere*. 2012. V. 22 (4). P. 426–433.
45. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland, Geneva: IPCC, 2014.
46. МГЭИК, Межправительственная группа экспертов по изменению климата // Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства // Ред. Д. Пенман, М. Гитарский, Т. Хираиши, Т. Крюг, Д. Крюгер, Р. Пипатти, Л. Бундиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе, Ф. Вагнер. Опубл. Всемирной Метеорологической Организацией для МГЭИК. Отпечатано в Швейцарии. 2006. 649 с.
47. Национальный доклад “О Кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2009 гг.”. Ч. 1. М., 2011.
48. Forster P.V., Ramaswamy P., Artaxo T., Bernsten R., Betts D.W., Fahey J., Haywood J., Lean D.C., Lowe G., Myhre J., Nganga R., Prinn G., Raga M., Schulz, Van Dorland R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing // *Climate change: The Physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* // Cambridge, United Kingdom and N.Y., USA: Cambridge University Press, 2007.
49. Han Z., Walter M.T., Drinkwater L.E. Impact of cover cropping and landscape positions on nitrous oxide emissions in northeastern US agroecosystems // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2017. V. 245. P. 124–134.
50. Hoben J.P., Gehl R.J., Millar N., Grace P.R., Robertson G.P. Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest // *Glob. Change Biol.* 2011. V. 17. № 2. P. 1140–1152.

Nitrous Oxide Emission Factor from Russian Arable Soils at the Fertilizers Application

V. N. Kudeyarov^{a, b, #}

^a *Institute of Physical-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b *All-Russian Scientific Research Institute of Phytopathology
Institute ul., vlad. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia*

[#] *E-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

Nitrogen of the mineral fertilizers and organic amendments are being applied on the fields easily includes in the soil nitrogen biogeochemical cycle and contribute to the N₂O emission to the atmosphere. To evaluate the regional agricultural soils contributions to the total Word emissions of greenhouse gasses the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recommend to use emission factors (EF_{N₂O}) for calculations of national N₂O inventories. The EF_{N₂O} value depends on many factors: soil-climatic conditions, mineral fertilizer type, organic amendments, agricultural crop systems, and others. Nevertheless, default IPCC EF_{N₂O} do not take into account differences between various N inputs to the soils and environmental conditions. The data on N₂O emissions in the field conditions of Russia are very much restricted, and national N₂O inventories are calculated accordingly IPCC Guidelines. IPCC EF_{N₂O} are not good appropriate because very wide range of soil-climatic and environmental conditions in the Russia. We shall attempt to calculate EF_{N₂O} at the fertilization of cereal and till crops on the base of literature and statistical data. Average EF_{N₂O} for cereals was in range 0.66–0.70% and for till crops – 0.77–1.96.

Key words: nitrous oxide, greenhouse gasses, nitrogen fertilizers, emission factor, nitrification, denitrification.

УДК 631.416.4:631.445.4:574.4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ КАЛИЯ В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИЯ В АГРОЦЕНОЗАХ

© 2021 г. В. М. Назарюк¹, Ф. Р. Калимуллина^{1,*}

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: flura.kalimullina@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 20.01.2021 г.

После доработки 24.05.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

В микрополевых опытах на эродированных лугово-черноземных почвах изучена динамика доступных для растений основных форм калия в почвенных горизонтах. Наибольшие изменения в формах калия происходили в гумусово-аккумулятивном (А – неэродированная почва) и переходном горизонтах (А + АВ – эродированная почва). На неэродированных почвах при благоприятном увлажнении и внесении К₉₀ на фоне N₉₀P₉₀ урожайность картофеля возросла на 0.9 кг/м². На эродированных почвах существенный рост урожайности 0.7 кг/м² отмечали только в условиях засухи и внесении калийных удобрений.

Ключевые слова: эродированная почва, почвенный профиль, пищевой режим, формы калия, картофель, урожай.

DOI: 10.31857/S0002188121110107

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация продукционного процесса требует устойчивого и сбалансированного минерального питания растений, в котором калий, несомненно, играет важную роль [1–3]. Удовлетворение потребности агроценоза в этом элементе зависит в первую очередь от специфики форм калия в почве и биологических особенностей культуры [4–6]. Показано, что уровень калийного питания на разных типах почв тесно связан с их гранулометрическим и минералогическим составом, обеспеченностью растений азотом и фосфором, специфику которых следует учитывать при разработке систем удобрения [7]. Установлено, что при оценке калийного фонда пахотных почв недостаточно обращать внимание только на обменную форму калия, важно оценить и необменную, легкообменную, а также фиксирующую и десорбционную способность и другие показатели [8–10]. Нередко фиксацию калия в автоморфных почвах связывают с активностью гумусово-аккумулятивных процессов [11, 12]. Например, по данным [13], черноземы выщелоченные фиксировали 47% от внесенного калия, серые лесные почвы – 32–35, дерново-подзолистые – 23–26%. В умеренно засушливой и колочной степи легкосуглинистый чернозем обыкновенный содержал в водорастворимой форме 25–30% от внесенного калия, при этом 40–45% фиксировалось обменно

[14]. Показано [15], что при удалении органических веществ, например, пероксидом водорода, фиксирующая способность черноземной почвы резко снижалась, а подзолистой тяжелосуглинистой почвы, напротив, изменялась мало. Выявлено [16], что величина емкости катионного обмена для черноземов и каштановых почв Забайкалья обусловлены на 2/3 илистой фракцией на 1/3 – гумусом; кроме этого, эти почвы очень бедны легкообменной, обменной и необменной формами калия.

Актуальность исследования калийной проблемы обычно связывают с отзывчивостью растений на внесение калия. Обобщение многолетних экспериментов показало, что доступность почвенного калия не стабильна, она зависит от многих природных и антропогенных факторов [17–20], на которые в исследованиях следует обращать внимание. Отметим также, что в этой проблеме наиболее исследованными оказались автоморфные почвы, в то время как полугидроморфные лугово-черноземные – крайне недостаточно. В связи с малой изученностью данной проблемы и ее актуальностью в прикладном аспекте требуется проведение дальнейших исследований.

Цель работы – изучение динамики содержания форм калия в эродированной лугово-черноземной почве и обоснование эффективности применения калийных удобрений в различных погодных условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Приобье Новосибирской обл. в Тогучинском р-не (территория Присалаирья, юго-восток Западно-Сибирской равнины). Объекты исследования — лугово-черноземные тяжелосуглинистые почвы (склон северо-восточной экспозиции) различной степени эродированности (неэродированные и среднеэродированные).

Микрополевые опыты с картофелем (*Solanum tuberosum*) сорта Луговской проводили в четырехкратной повторности на делянках общей площадью 1 м², обернутых полиэтиленовой пленкой, и учетной — 0,25 м². Минеральные удобрения вносили в виде N_м, P_{сг} и K_х, исходя из расчета N90P90K90 под картофель.

Лугово-черноземные почвы формируются в условиях лесостепной зоны при периодически промывном водном режиме, что сказывается как на пищевом режиме, так и продуктивности растений. В условиях лесостепной зоны сумма положительных температур за период май—август изменялась в пределах 1497–1993°C, количество осадков — 112–364 мм. За время проведения исследования (2004–2013 гг.) сумма положительных температур (t > 0°C) за период май—август составляла в среднем 1645°C, количество осадков — 212 мм. Особенно значительные изменения произошли в 2008 г. В течение августа и до середины сентября не выпало осадков вообще, что сказало на продуктивности растений.

Аналитическую работу выполняли в трехкратной повторности следующими методами, определяли: гумус — по Тюрину, общий азот в растительных образцах — по Кьельдалю с предварительным озолением образцов в смеси серной и хлорной кислот, в почвенных образцах — с восстановителем Кудеярова. Зольные питательные элементы в почве определяли следующими методами: легкообменный калий — в вытяжке 0,005 н. CaCl₂, обменный — в 1 н. CH₃COONH₄ (по Масловой), необменный — в 2 н. HCl (по Пчелкину) на атомно-адсорбционном спектрофотометре, нитраты — потенциометрическим способом с использованием ион-селективного электрода. Запасы почвенного калия рассчитывали, исходя из содержания элемента (данные получены нами) и плотности сложения для лугово-черноземной почвы [21]. Усвояемый калийный пул в почве определяли как суммарную величину водорастворимой, легкообменной, обменной и необменной форм. Полагали, что структурный и матричный калий при применении минеральных удобрений вряд ли могут иметь существенное значение в калийном питании растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование калийного состояния почвы показало, что соотношение форм калия зависело от степени ее эродированности и распределения по почвенному профилю (табл. 1). Содержание легкообменного калия изменялось по генетическим горизонтам в значительных пределах. Следует отметить, что данные содержания легкообменной формы калия (вытяжка 0,005 н. CaCl₂) и калия почвенного раствора (вытяжка H₂O) в лугово-черноземной почве были близки между собой. В первом случае содержание калия составляло 0,5–0,7 мг, во втором — 0,6 мг/100 г. В неэродированной лугово-черноземной почве содержание наиболее доступной формы калия варьировало довольно широко в гумусово-аккумулятивном горизонте. Меньше всего содержание легкообменного калия было в слое 0–10 см, что, вероятно, связано с его различным поглощением корневыми системами растений. В переходном горизонте АВ, а также иллювиальных горизонтах В1 и В2 отмечено значительное снижение содержания легкообменного калия. В эродированной почве максимальное накопление легкообменного калия выявлено в горизонтах А + АВ, в более глубоких почвенных слоях различия были менее значительными.

Другой доступной для растений формой питательного элемента является обменный калий. Содержание его в неэродированной почве не очень четко различалось в генетических горизонтах. Больше всего различия были заметны в гумусово-аккумулятивном горизонте А (слой 20–30 см), в других почвенных слоях различия в содержании обменного калия были менее заметными. В эродированной почве в отличие от неэродированной различия в содержании обменного калия были существенными в горизонтах А+АВ и переходном горизонте АВ. Водная эрозия оказала значительное влияние на содержание этой формы калия особенно в слоях 0–10 и 20–30 см, различия достигали двукратной разницы. Это связано, прежде всего, с усвоением калия корневой системой растений и постоянным обновлением верхних почвенных слоев при систематической водной эрозии в весенний период во время снеготаяния и летом в результате выпадения обильных осадков. В иллювиальных горизонтах В1 и В2, а также в материнской породе С значительных изменений в содержании обменного калия не наблюдали.

Несколько иначе происходило распределение в почвенном профиле содержания необменной формы калия. В гумусово-аккумулятивном и переходном горизонтах неэродированной почвы наблюдали равномерное распределение этого

Таблица 1. Профильное распределение форм калия и его валовое содержание в горизонтах лугово-черноземных почв при паровании без удобрений

Глубина, см	Горизонт	Легкообменный	Обменный	Необменный	Валовой*, %
		мг/100 г			
Неэродированная почва					
0–10	Апах	1.27	14.7	60.0	2.19
10–20		1.83	16.8	63.1	2.19
20–30	А	2.19	18.3	64.0	1.83
30–40		1.45	15.3	62.7	1.92
40–50	АВ	1.00	14.2	61.8	2.11
50–60		0.92	14.0	57.4	2.55
60–70	В1	0.80	13.5	50.5	2.55
70–80		0.74	13.8	52.3	1.96
80–90	В2	0.75	14.6	47.8	–
90–100		0.80	15.7	35.4	–
Среднеэродированная почва					
0–10	А + АВ	2.00	20.3	70.0	–
10–20		1.75	18.7	67.9	–
20–30	АВ	0.80	10.0	58.0	–
30–40		0.96	12.8	70.4	–
40–50	В1	1.34	14.2	74.8	–
50–60		1.15	15.5	72.5	–
60–70	В2	0.80	16.0	73.0	–
70–80		0.77	17.8	65.9	–
80–90		0.92	16.5	58.0	–
90–100	С	1.00	18.0	61.3	–
<i>НСП</i> ₀₅		0.39	2.02	9.0	–

*По данным В.М. Попова [22].

элемента, что свидетельствовало о невысокой калийной нагрузке на агроценоз. С глубиной содержание необменного калия в почве снижалось и достигло минимальной величины в горизонте В2. Водная эрозия почвы отражалась на содержании необменного калия по всему почвенному профилю. Его повышенное количество отмечали в горизонтах А + АВ, а также иллювиальном горизонте В1 и частично – В2. И только в нижней части горизонта В2 и материнской породе С отмечали существенное снижение содержания необменного калия в эродированной почве.

Самой значительной формой в калийном питании растений является валовое содержание элемента, которое при определенных условиях может существенно влиять на обеспеченность культуры калием. По данным [22], в неэродированных лугово-черноземных почвах Приобья в пахотном слое отмечено повышенное содержание валового калия. С глубиной оно заметно уменьшалось и достигало минимума в подпахотном горизонте А и частично в верхнем переходном горизонте АВ. В нижней части этого горизонта и иллювиального В1 отмечено повышенное

содержание валового калия. Из представленных данных видно, что генезис почвы существенно сказывался на содержании форм калия, что могло отразиться на продуктивности растений. Для выяснения связи растительного организма с эндогенным (почвенным) и экзогенным минеральным питанием калием исследовали содержание форм калия в слоях почвы через каждые 20 см в динамике при выращивании калийлюбивой культуры картофеля и внесении повышенной дозы КС1.

Показано, что в неэродированной почве содержание легкообменного калия в слое 0–20 см постепенно снижалось и достигло минимума к периоду интенсивного клубнеобразования, а затем вновь стало повышаться (табл. 2). Это объясняется различной интенсивностью потребления элемента растениями в разные периоды их развития. В слое 20–40 см содержание этой формы калия снизилось в 1.5–2.0 раза, а затем в более глубоких слоях постепенно стабилизировалось. Внесение азота и фосфора мало повлияло на содержание легкообменного калия во всех слоях почвы и только внесение К90 стабилизировало содержание этой формы к фазе бутонизации и

Таблица 2. Содержание легкообменного калия в почве при вегетации растений картофеля при различных уровнях калийного питания, мг/кг

Глубина, см	Фаза развития картофеля							
	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Контроль без удобрений								
0–20	1.70	2.22	1.19	2.03	1.11	1.29	1.84	1.35
20–40	0.61	0.95	0.77	0.61	0.43	0.46	0.44	0.57
40–60	0.47	0.84	0.80	0.63	0.62	0.49	0.47	0.37
N90P90								
0–20	1.16	2.00	0.91	1.73	0.59	0.90	1.12	0.71
20–40	0.77	0.56	0.49	0.64	0.55	0.43	0.60	0.47
40–60	0.41	0.53	0.60	0.62	0.37	0.63	0.48	0.37
N90P90K90								
0–20	1.87	2.73	1.26	1.69	0.77	0.89	0.47	0.87
20–40	0.89	0.57	0.49	0.70	0.63	0.44	1.32	0.39
40–60	0.46	0.55	0.59	0.64	0.71	0.47	1.11	0.31
HCP _{0.5}	0.39		0.32		0.29		0.35	

Примечания. 1. A – бутонизация, B – цветение, C – клубнеобразование, D – уборка. 2. Графа 1 – незероэродированная почва, 2 – эродированная почва. То же в табл. 3, 4.

цветения картофеля. По мере усиления темпов усвоения калия картофелем в период клубнеобразования содержание легкообменной формы заметно снижалось даже при внесении калийного удобрения. Развитие растений в период клубнеобразования уже не сказалось на содержании легкообменного калия в почве.

Процессы водной эрозии по-разному влияли на калийный режим лугово-черноземной почвы. В контрольном варианте в слоях 0–20 см и особенно 40–60 см к фазе бутонизации содержание легкообменного калия в среднеэродированной почве по сравнению с незероэродированной существенно возросло, тогда как в последующих фазах развития картофеля значительных отклонений в его содержании водная эрозия не вызвала. Внесение азота и фосфора мало влияло на изменение содержания легкообменного калия в почве, и только под влиянием внесения калийных удобрений на фоне N90P90 в отдельных случаях наблюдали существенную разницу. Например, в слое 0–20 см в период бутонизации картофеля содержание легкообменного калия на эродированной почве возросло примерно в 1.5 раза, к периоду уборки увеличилось еще значительно – в 1.8 раза. В более глубоких слоях 20–40 и 40–60 см изменения содержания этой формы были гораздо больше; соотношение содержания между эродированной и незероэродированной почвой составили

Таблица 3. Динамика содержания и запасов обменного калия в эродированных почвах при применении удобрений

Глубина, см	Фаза развития картофеля							
	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Контроль без удобрений								
0–20	18.0	20.4	15.9	19.2	13.5	17.5	19.8	15.9
	450	510	397	480	337	437	495	397
20–40	11.8	15.8	10.9	11.5	9.2	10.6	10.9	12.1
	330	442	305	322	258	297	272	302
40–60	10.2	17.9	12.3	14.5	9.0	13.9	14.1	8.6
	304	533	366	432	268	414	420	256
N90P90								
0–20	15.1	21.1	11.5	15.3	11.5	15.4	17.4	13.9
	377	527	287	382	287	385	435	347
20–40	11.7	13.4	8.6	12.0	9.8	11.3	11.0	9.8
	292	335	215	300	245	282	275	245
40–60	10.1	15.5	9.6	10.9	9.4	12.2	15.5	9.2
	328	462	286	325	280	363	462	274
N90P90K90								
0–20	16.9	22.7	15.7	22.8	14.0	14.2	18.8	15.6
	422	567	392	570	359	355	470	390
20–40	10.5	12.6	8.0	12.0	11.6	11.0	15.0	9.1
	262	315	200	300	290	275	375	227
40–60	10.6	14.9	10.0	15.6	11.5	12.9	15.7	8.9
	316	444	258	465	343	384	468	265
HCP _{0.5}	2.7		1.7		2.8		1.6	
	23		29		31		28	

Примечание. Над чертой – содержание (мг/100 г), под чертой – запасы (кг/га).

3.4 и 3.6 раза. Существенное снижение содержания легкообменного калия в почве было обусловлено повышенной потребностью растений в калийном питании при формировании клубней [23].

Содержание обменного калия в отличие от легкообменного подвержено изменениям в меньшей степени, однако эти изменения проявляются довольно отчетливо. В незероэродированной почве содержание обменного калия в слое 0–20 см снижалось до начала клубнеобразования, а затем оно снова повысилось (табл. 3). В более глубоких слоях 20–40 и 40–60 см изменения были заметны лишь в периоды клубнеобразования и уборки. Водная эрозия оказала существенное влияние на содержание обменного калия в почве. Оно постепенно снижалось и достигло минимума в конце вегетационного периода. С глубиной содержание обменного калия существенно снижалось, что свидетельствовало об интенсивном усвоении эле-

Таблица 4. Содержание необменного калия в эродированной почве и его доля в усвояемом растениями калийном пуле

Глубина, см	Фаза развития картофеля							
	А		В		С		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Контроль без удобрений								
0–20	73.0	68.9	95.4	84.8	36.1	51.2	68.9	65.1
	79	75	85	80	71	73	76	80
20–40	59.8	67.6	88.4	78.8	28.1	43.7	60.1	55.9
	83	80	88	87	74	80	84	81
40–60	69.1	68.4	87.1	82.9	26.3	50.7	60.2	56.7
	87	78	87	85	73	78	80	86
N90P90								
0–20	56.3	69.9	87.1	96.0	35.2	47.2	68.6	59.5
	74	76	84	82	75	71	76	77
20–40	65.6	71.0	81.8	77.4	36.8	49.4	66.7	55.2
	84	83	89	81	78	81	85	84
40–60	57.9	63.1	79.7	81.1	33.9	48.5	65.8	53.5
	84	83	89	81	78	81	85	84
N90P90K90								
0–20	69.8	60.0	75.3	88.5	30.4	44.8	67.2	50.5
	79	70	81	78	67	75	82	75
20–40	59.5	67.4	74.7	90.0	42.4	37.3	65.3	55.6
	84	74	89	88	78	77	80	85
40–60	51.1	58.5	82.0	84.4	27.9	41.0	63.6	51.4
	82	80	88	84	69	75	79	85
HCP ₀₅	3.9		3.2		2.9		3.5	

Примечание. Над чертой – мг/100 г, под чертой – %.

мента растениями в этот период и более низкой емкости поглощения гумусово-аккумулятивного горизонта А и переходного горизонта АВ. Внесение азота и фосфора способствовало снижению содержания обменного калия в почве, особенно в периоды его максимального усвоения растениями. Применение калийного удобрения улучшило калийное питание, в результате чего повысилось содержание этой формы, особенно в фазах бутонизации и цветения. Показано [24], что при длительном возделывании зерновых культур на серой лесной почве снижение содержания обменного калия проявилось даже в слое 0–60 см.

Эрозионные процессы в лугово-черноземной почве затронули запасы обменного калия, которые изменялись в значительных пределах. Больше всего содержание этой формы было в подпахотном (переходном горизонте АВ) и пахотном слоях эродированной почвы, что связано, вероятно, с постоянным обновлением верхнего слоя

почвы при снеготаянии и бурных ливневых осадках. В слое 40–60 см повышенное содержание обменного калия связано с особенностями поглощения калия корневой системой в начале роста и развития картофеля, который менее развит на таких почвах по сравнению с неэродированными почвами. Внесение азотно-фосфорных удобрений способствовало уменьшению содержания обменного калия, хотя иногда наблюдали противоположную зависимость. Например, в период уборки в переходном горизонте АВ неэродированной почвы запасы обменного калия были существенно больше, чем в других почвенных горизонтах. Внесение калийного удобрения на фоне N90P90 способствовало стабилизации запасов этой формы, хотя иногда наблюдали некоторое отклонение от выявленной закономерности. В эродированных почвах в период уборки отмечали снижение запасов обменного калия, что связано с его интенсивным потреблением растениями при формировании клубней.

Важное значение в калийном питании растений имеет необменный калий, количество которого во многом зависит от природных и антропогенных факторов. В начальный период вегетации растений, в фазах бутонизации и цветения содержание обменного калия в почве изменялось мало (табл. 4). Однако в период клубнеобразования потребность растений в калии резко возрастала, и это отражалось на его содержании в пахотном и подпахотном слоях, а также в переходном горизонте АВ. В целом эрозионные процессы мало влияли на содержание обменного калия. Исключение составлял лишь период клубнеобразования картофеля, в котором происходили изменения содержания обменного калия во всех изученных почвенных слоях. Внесение азота и фосфора усилило потребление почвенного калия, что отразилось на его содержании особенно в пахотном горизонте. Добавление к питательной смеси калия повысило его содержание в обменной форме в период вегетации растений, исключение составила лишь фаза клубнеобразования. В этот период при внесении калийных удобрений не удалось сохранить первоначальный уровень содержания обменного калия в почве.

Изучение динамики его содержания показало, что все исследованные формы находились в усвояемом для растений состоянии и это отражалось на поведении форм калия в почве. Показано, что доля обменного калия изменялась в небольших пределах в большинстве случаев от 70 до 80%.

Изменение калийного питания при внесении минеральных удобрений по-разному влияло на урожай картофеля (табл. 5). В контрольном варианте величина этого показателя изменялась зна-

Таблица 5. Урожай клубней картофеля (кг сырой массы/м²) в связи с эродированностью почвы и применением удобрений

Вариант	Год исследования			Среднее за 3 года
	2006 г.	2007 г.	2008 г.	
Неэродированная почва				
Контроль	<u>3.48</u>	<u>3.20</u>	<u>2.40</u>	<u>3.03</u>
без удобрений	0	0	0	0
N90P90	<u>4.38</u>	<u>3.85</u>	<u>2.75</u>	<u>3.66</u>
	0.90	0.65	0.35	0.63
N90P90K90	<u>5.28</u>	<u>4.70</u>	<u>3.30</u>	<u>4.43</u>
	1.80	1.50	0.90	1.40
Эродированная почва				
Контроль	<u>2.47</u>	<u>2.10</u>	<u>2.17</u>	<u>2.25</u>
	0	0	0	0
N90P90	<u>3.48</u>	<u>3.07</u>	<u>3.16</u>	<u>3.24</u>
	1.01	0.97	0.99	0.99
N90P90K90	<u>3.37</u>	<u>3.13</u>	<u>3.87</u>	<u>3.46</u>
	90	1.03	1.70	1.21
HCP ₀₅	<u>0.63</u>	<u>0.51</u>	<u>0.38</u>	
	0.35	0.19	0.17	

Примечание. Над чертой – урожай, под чертой – прибавка к контролю.

чительно, что было связано в первую очередь с количеством осадков, выпавших в течение вегетационного периода. Значительное снижение урожая картофеля также наблюдали на эродированной почве: от 0.2 до 1.0 кг/м². Эродированность почвы сильнее всего сказалась на урожае клубней в относительно благоприятные годы, различия в контрольном варианте составили всего 0.37 кг/м². Величина надземной биомассы также зависела от погодных условий, особенно сильное снижение произошло в 2008 г. Внесение азотно-фосфорных удобрений повысило накопление органических веществ как в клубнях, так и в надземной биомассе. Особенно сильное снижение величины вегетативной массы наблюдали на эродированной почве. В условиях засухи очень важно добиваться экономного расходования запасов почвенной влаги.

На неэродированной почве прибавка урожая от внесения калия составила 0.55 кг/м², в то время как на эродированной она достигла 0.71 кг/м². Разницы в биомассе ботвы, сформированной на почве без нарушений в пахотном горизонте, не было обнаружено, тогда как на эродированной отмечали существенные различия.

Влияние калийного удобрения отразилось не только на формировании надземной биомассы,

но и ее распределении по органам как при благоприятной водообеспеченности, так и почвенной засухе (рис. 1). На неэродированной почве при внесении азота, фосфора и калия накопление биомассы ботвы было несколько больше, чем при внесении N90P90. Доля клубней и ботвы в вариантах отличалась мало, о чем свидетельствовала невысокая отзывчивость растений на добавочное калийное питание. На эродированной почве при благоприятном водном режиме накопление надземной биомассы картофеля снижалось, в этом случае доля клубней от общей биомассы составила 66%. В условиях засухи накопление надземной биомассы при внесении калийных удобрений существенно повысилось, доля клубней достигла 74%. Стимулирование накопления биомассы картофеля в случае внесения калийных удобрений на эродированной почве было связано с более экономным расходованием влаги в течение вегетационного периода.

Большие различия в накоплении биомассы происходили при различном поступлении влаги в почву и в зависимости от состояния растений в посеве. На фоне относительно благоприятного водного режима почвы накопление надземной биомассы повышалось при внесении калийных удобрений, тогда как на эродированных соответствующего отклика растений на калийное питание не подтвердилось. И только в условиях засухи на эродированной почве существенно повысилось накопление биомассы картофеля, что можно объяснить рядом причин (рис. 2). Прежде всего, к ним можно отнести повышение осмотического давления в клетке, изменение транспирации в листьях и снижение процессов дыхания в растениях при усилении уровня калийного питания [25]. Отмеченные причины могут способствовать более экономному расходанию влаги и снижению расходов углеводов на дыхание. О возможности повышения устойчивости зерновых культур при внесении калийных удобрений к условиям засухи отмечено ранее [26]. В целом за вегетационный период картофеля потребность растений в калийном питании удовлетворялась преимущественно за счет легкообменной, обменной и не-обменной форм. По мере того как корневая система усваивала ионы калия, одновременно они восстанавливались за счет непрерывных процессов фиксации↔десорбции, содержание и скорость которых стремятся сохранить существующее природное равновесие. При этом, чем меньше энергии требуется затратить на поглощение калия растениями, тем быстрее он усваивается корневой системой растений и при благоприятных условиях его содержание восстанавливает-

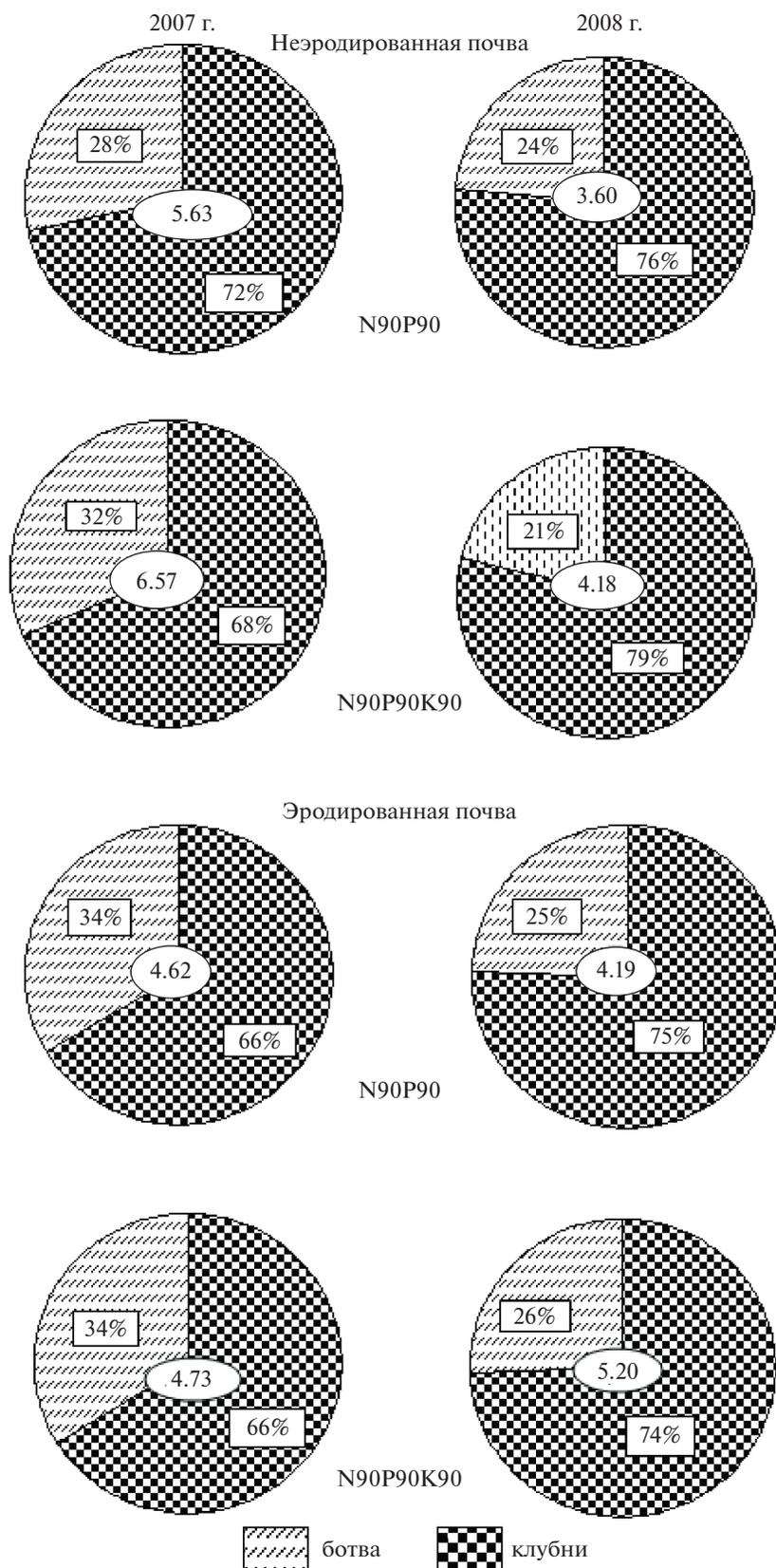


Рис. 1. Влияние эродированности почв и калийных удобрений на накопление биомассы картофеля и ее распределение между органами растения.

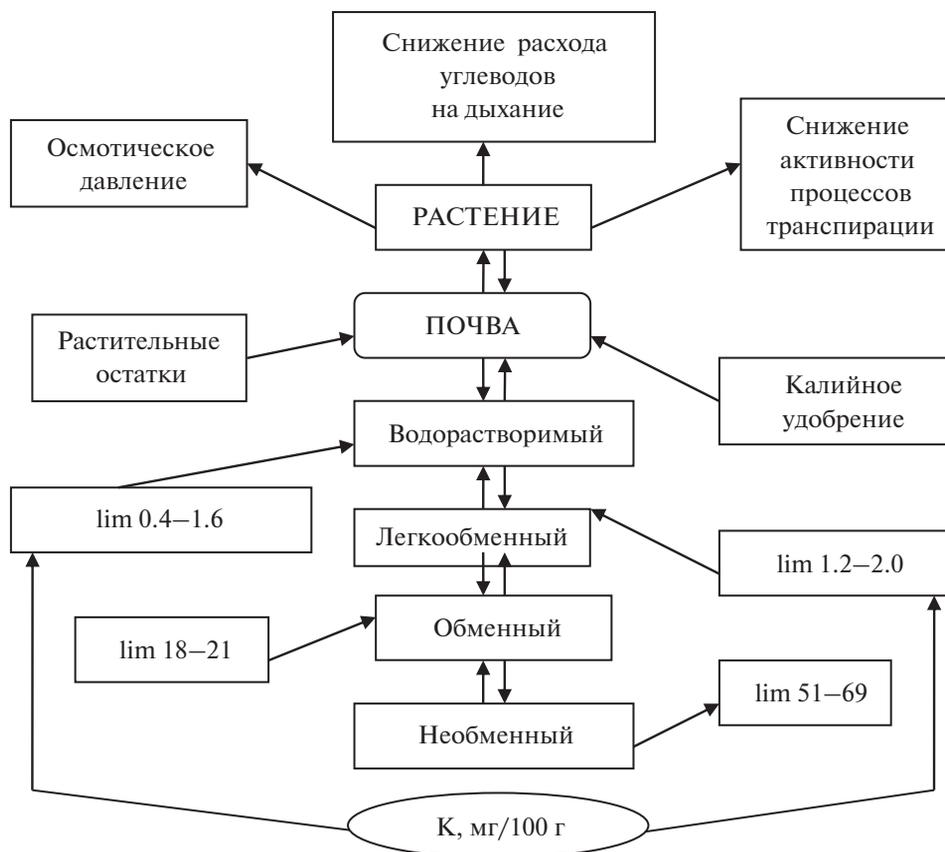


Рис. 2. Схема взаимодействия основных потоков калийного питания растений картофеля на эродированной почве при засухе.

ся до природного равновесного состояния. В лугово-черноземной почве активное участие в почвенном калийном питании принимали участие все изученные формы калия, от функционирования которых во многом зависели плодородие почвы и продуктивность растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что распределение форм калия в почвенном профиле во многом зависело от генезиса почвы, ее эродированности и состояния агроценоза. Содержание легкообменного калия изменялось по генетическим горизонтам, варьировало в значительных пределах, особенно в гумусово-аккумулятивном горизонте как эродированных, так и неэродированных почв. Значительно меньше были изменения его содержания в других горизонтах, что, вероятно, связано с его различным поглощением корневой системой растений. Содержание обменного калия в неэродированной почве изменялось в генетических горизонтах по-разному. Больше всего различия содержания этой формы калия были заметны в гумусово-аккумулятивном горизонте А (слой

20–30 см), в других почвенных горизонтах различия в содержании обменного калия были в основном несущественными. В эродированной почве различия были значительными лишь в горизонтах А + АВ и переходном горизонте АВ. В иллювиальных горизонтах В1 и В2, а также в материнской породе С значительных изменений содержания обменного калия и его запасов не наблюдали. Необменный калий среди других форм был наиболее равномерно распределен в почвенном профиле, что свидетельствовало о невысокой калийной нагрузке на агроценоз. Однако в период клубнеобразования потребность растений картофеля в калии резко возрастала независимо от эродированности почв, что отразилось на его содержании в пахотном и подпахотном слоях, затрагивая более глубокий переходный горизонт АВ.

Внесение калийных удобрений в неэродированные почвы повышало урожай картофеля при благоприятном режиме увлажнения, при внесении в эродированные почвы он не изменялся. В условиях засухи применение калийных удобрений увеличивало урожай клубней только на эродированных почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Агрохимические и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
2. *Heming S.D.* Potassium balances for arable soils in southern England 1986–1999 // *Soil Use Manag.* 2004. V. 20. № 4. P. 417.
3. *Кудеяров В.Н., Семенов В.М.* Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // *Почвоведение.* 2004. № 12. С. 1440–1446.
4. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
5. *McKenzie A.F., Phillip L.E., Kirby P.S.* Effect added urea and potassium chloride on yields of corn over four years and on soil potassium // *Agronomy.* 1988. V. 80. № 5. P. 773–777.
6. *Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Будаев Б.Х.* Влияние возрастающих доз калийных удобрений на урожайность, качество, сохранность картофеля и динамику обменного калия в орошаемых каштановых почвах Забайкалья // *Агрохимия.* 2005. № 3. С. 44–54.
7. *Шаймухаметов М.Ш., Травникова Л.С.* Калийное состояние пахотных почв европейской территории России // *Почвоведение.* 2000. № 3. С. 329–339.
8. *Важенин И.Г., Карасева Г.И.* О формах калия в почве и калийном питании растений // *Почвоведение.* 1959. № 3. С. 11–21.
9. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 227 с.
10. *Медведева О.П.* К вопросу оценки обеспеченности растений доступным калием // *Агрохимия.* 1987. № 1. С. 116–138.
11. *Никитина Л.В.* Исследование калийного режима разных типов почв в длительных опытах // *Агрохимия.* 2018. № 1. С. 39–51.
12. *Прокошев В.В.* Актуальные вопросы агрохимии калийных удобрений // *Агрохимия.* 1985. № 4. С. 32–41.
13. *Середина В.П.* Калий в автоморфных почвах на лессовидных суглинках. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1984. 216 с.
14. *Пивоварова Е.Г.* Влияние калийных удобрений на содержание форм калия в почве и урожайность сельскохозяйственных культур // *Агрохимия.* 1993. № 2. С. 44–49.
15. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
16. *Абидуева Т.И., Соколова Т.А.* Глинистые минералы и калийное состояние степных почв Западного Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 101 с.
17. *Важенин И.Г., Карасева Г.И.* Об агрохимических методах определения подвижных форм калия в почве // *Почвоведение.* 1959. № 8. С. 87–91.
18. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П., Травников Л.С.* Калийное состояние пахотных почв Европейской территории России // *Почвоведение.* 2000. № 3. С. 329–339.
19. *Нечаева Т.В., Назарюк В.М.* Запасы калия в эродированных почвах при внесении минеральных удобрений // *Плодородие.* 2008. № 1. С. 12–14.
20. *McLean A.J.* Fixation of potassium in some Canadian soil // *Can. Soil. Sci.* 1962. V. 42. № 1. P. 96–104.
21. *Ковалев Р.В., Ильин В.Б., Трофимов С.С.* Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука, СО, 1966. 422 с.
22. *Попов В.М.* Пищевой режим орошаемых лугово-черноземных почв и влияние минеральных удобрений на овощные культуры // *Плодородие почв Новосибирского Приобья.* Новосибирск: Наука, СО, 1971. С. 131–177.
23. *Назарюк В.М., Нечаева Т.В.* Калийное состояние эродированных почв Западной Сибири // *Земледелие.* 2007. № 1. С. 16–17.
24. *Якименко В.Н.* Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // *Агрохимия.* 2019. № 3. С. 19–29.
25. *Куперман И.А., Хитрово Е.В.* Дыхание как элемент продукционного процесса растений. Новосибирск; Наука, СО, 1977. 183 с.
26. *Ушаков Р.Н., Косорукова Т.Ю.* Повышение устойчивости зерновых культур к почвенной засухе при использовании калийных удобрений // *Изв. ТСХА,* 2004. Вып. 3. С. 63–66.

Distribution of Potassium forms in the Soil Profile of Eroded Meadow-Chernozem Soils and Their Transformation in Agrocenoses

V. M. Nazariuk^a and F. R. Kalimullina^{a, #}

^a Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
prosp. akad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia

[#]E-mail: flura.kalimullina@issa-siberia.ru

In micro-field experiments on eroded meadow-chernozem soils, the dynamics of the main forms of potassium available to plants in soil horizons was studied. The greatest changes in the forms of potassium occurred in the humus-accumulative (A – non – eroded soil) and transitional horizons (A + AB-eroded soil). On non-eroded soils, with favorable moisture and the introduction of K90 against the background of N90P90, potato yield increased by 0.9 kg/m². On eroded soils, a significant increase in the yield of 0.7 kg/m² was noted only in conditions of drought and the application of potash fertilizers.

Key words: eroded soil, soil profile, food regime, forms of potassium, potatoes, yield.

СОДЕРЖАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ ПРИ ВНЕСЕНИИ В НЕЕ БИОУГЛЯ[§]

© 2021 г. Л. В. Бойцова^{1,*}, Е. Я. Рижия², М. А. Москвин¹

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79, Россия

*E-mail: larisa30.05@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2021 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 11.05.2021 г.

В двухлетнем вегетационно-полевом эксперименте изучили влияние внесения биоугля в дозе 20 т/га на содержание и сезонную динамику минеральных форм азота (аммонийной и нитратной). Вегетационно-полевой эксперимент заложен в Меньковском филиале Агрофизического института (МОС-АФИ, (Ленинградская обл.)), на дерново-подзолистых супесчаных почвах, различавшихся по степени окультуренности: среднеокультуренной и высокоокультуренной. Схема опыта: контроль (без биоугля) и почва с биоуглем в дозе 20 т/га. Цель исследования состояла в изучении влияния внесения биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разного качества. Содержание аммонийного азота в образцах почв определяли индофенольным методом, концентрацию нитратов – спектрофотометрическим методом. Установлено, что внесение древесного биоугля в почву в дозе 20 т/га привело к увеличению содержания минеральных форм азота. В 2019 г. отмечено увеличение содержания минеральных форм азота в вариантах с биоуглем в 1.4 раза по сравнению с контролем, в 2020 г. – в 1.2 раза в тех же вариантах. Наибольшее увеличение содержания минеральных форм азота по сравнению с контрольным вариантом отмечено в почве со средней степенью окультуренности. В 2020 г. по сравнению с 2019 г. произошло уменьшение содержания нитратных форм азота и увеличение его аммонийных форм.

Ключевые слова: аммонийный азот, нитратный азот, древесный биоуголь, дерново-подзолистая почва, степень окультуренности.

DOI: 10.31857/S0002188121080056

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные соединения азота служат непосредственным источником питания растений [1]. Внесение биоугля влияет на физические условия почвенной среды и изменяет интенсивность процессов аммонификации и нитрификации, обуславливающих накопление ионов аммония и нитрат-ионов. Пока не удается найти устойчивой зависимости между концентрацией данных ионов в почве с наличием в ней биоугля вследствие крайней изменчивости почвенных условий в течение вегетационного периода. Известно, что скорость процессов аммонификации и нитрификации зависит

от температуры, влажности, реакции среды, содержания органического вещества и от многих других характеристик.

Основные механизмы, регулирующие изменения содержания минерального азота в почве с биоуглем, связаны с высокой катионообменной способностью “состарившегося” биоугля за счет окислительных реакций на его поверхности и последующего взаимодействия биоугля с минеральными веществами почвы [2, 3], также с его способностью изменять рН почвенной среды [4]. На данный процесс влияют также свойства биоугля, приводящие к увеличению влагоудерживающей способности почвы и, как следствие этого, уменьшающие общий объем выщелачивания элементов [5, 6]. Кроме того, происходит микробная

[§] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-016-00038-А.

Таблица 1. Химический состав биоугля (исходные данные до начала полевого опыта)

C _{общ}	N _{общ}	C : N	H, %	H : C	O, %	O : C	pH _{H₂O}	W _{гв}	Зольность
%								%	
88.9	0.43	207	3.2	0.04	5.1	0.06	8.3	3.1	1.8

Примечание. W_{гв} – гигроскопическая влажность биоугля.

иммобилизации лабильного углерода, содержащегося в биоугле [3, 7]. Данный углерод может служить микробным субстратом, что приводит к увеличению потребности микробов в неорганическом азоте, и тем самым – к иммобилизации азота посредством биотических процессов [3, 6, 8, 9]. Считается, что биоуголь, благодаря своей пористой структуре, повышает число аэробных участков в почве, что способствует увеличению интенсивности нитрификации и снижению интенсивности денитрификации. Поэтому увеличивается содержание нитратного азота в почве и снижаются его потери при переходе в газообразную форму. Кроме того, биоуголь, как мелиорант, обладающий высокой адсорбционной способностью, путем катионного обмена может адсорбировать NO₃⁻ и NH₄⁺, снижая эмиссию почвенного аммиака и, таким образом, увеличивая содержание доступного азота в почве, улучшая ее плодородие. Тем не менее, адсорбция аммонийного азота биоуглем может привести к снижению его доступности нитрифицирующим микроорганизмам [10].

Цель работы – изучение влияния биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разного качества.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проведены с середины мая по конец сентября 2019–2020 гг. на территории экспериментальной опытной станции АФИ (МОС-АФИ) (п. Меньково, Гатчинский р-н, Ленинградская обл.). Vegetационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ. Почвы стационара представлены дерново-подзолистыми супесчаными разновидностями. Данные почвы различались по степени окультуренности и качеству: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). В 2003–2005 гг. в среднеокультуренную почву был внесен навоз КРС 220 т/га, высокоокультуренную почву – 540 т/га [11].

На начало опыта в конце апреля 2019 г. почва участков СОК и ВОК характеризовалась следующими агрохимическими показателями. Средне-

окультуренная почва имела pH_{KCl} 5.3, содержание C_{орг} – 1.53%, N_{общ} – 0.17%, N-NO₃ – 16.4 мг/кг почвы, N-NH₄ = 5.6 мг/кг почвы, подвижных (по Кирсанову) P₂O₅ – 255, K₂O – 112 мг/кг почвы. Высокоокультуренная почва отличалась от почвы СОК большими величинами данных показателей, а именно: pH_{KCl} 6.4, C_{орг} – 2.92%, N_{общ} – 0.28%, N-NO₃ – 22.3 мг/кг почвы, N-NH₄ – 6.7 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P₂O₅ – 994, K₂O – 542 мг/кг почвы.

Опытные делянки размером 4 м² (2 × 2 м) заложены 20 мая 2019 г. на парцеллах почв с СОК и ВОК, на контрольных участках (без дополнительного внесения различных доз минеральных удобрений). Схема опыта включала 2 варианта в трехкратной повторности: 1 – контроль (без биоугля), 2 – почва с биоуглем в дозе 20 т/га.

В качестве биоугля использовали древесный уголь из березы сорта “Премиум” (береза 1-го класса), фракция с размером частиц угля 0.5–5.0 см. Биоуголь произведен быстрым пиролизом при температуре 600°C на предприятии ООО “Файервуд” (Ленинградская обл, Тосненский р-н, д. Коркино). Химическая характеристика биоугля представлена в табл. 1. Перед внесением в почву биоуголь просеивали через сито с размером ячейки 2 см. Биоуголь в дозе 20 т/га (или 2 кг/м²) вносили в верхний слой 0–10 см почвы вручную.

На делянках в течение вегетационного периода 2019 г. в качестве тест-объекта возделывали викоовсяную смесь (вика посевная яровая сорта Львовский (*Vicia sativa* L.) и овес яровой сорта Боррус (*Avena sativa* L.) в соотношении 30 : 70) из расчета 200 кг семян/га (или 21.3 г/м²). Посев состоялся 21 мая. В 2020 г. возделывался люпин белый сорт Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу, посев проведен 15 мая из расчета 200 кг семян/га, запашка – 16 августа.

Отбор почвенных образцов в вариантах опыта проводили по стандартной методике [12] с помощью почвенного бура из слоя 0–10 см. Объединенную пробу в каждом варианте составляли из индивидуальных проб, отобранных равномерно со всей площади участка. Периодичность отбора

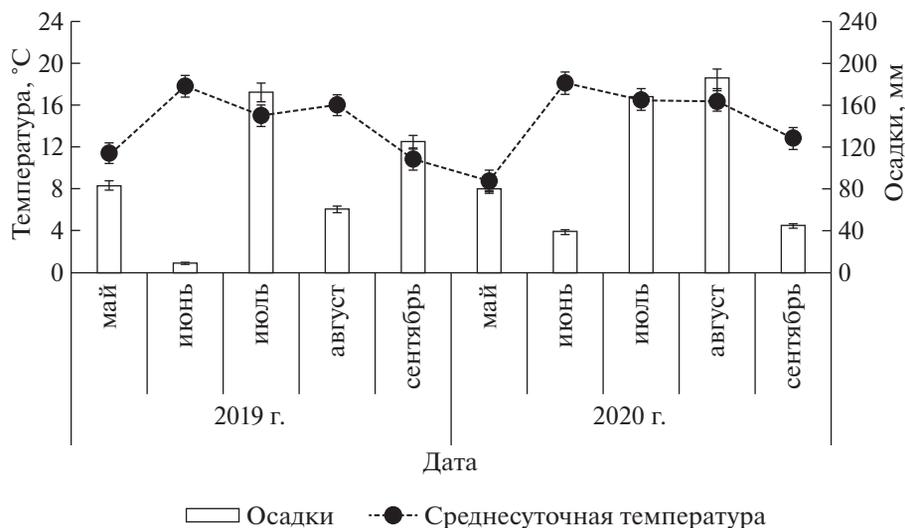


Рис. 1. Сравнительная характеристика среднесуточной температуры и осадков в течение вегетационных периодов 2019 и 2020 гг.

образцов — через каждые 10–12 сут с момента закладки опыта.

Метеорологические показатели в течение вегетационных периодов 2019–2020 гг. фиксировали на метеостанции, находящейся в 200 м от Агрофизического стационара (рис. 1).

Сравнивая вегетационные периоды 2019 и 2020 гг., можно отметить общие закономерности погодных явлений по месяцам. Май в годы исследования характеризовался как холодный месяц со средним количеством осадков до 80 мм, июнь — как жаркий и засушливый (но в 2020 г. осадков выпало на 30 мм больше, чем в 2019 г.), июль — теплый и влажный, август — теплый (но в 2020 г. еще и влажный по сравнению с 2019 г., когда осадков выпало всего 60 мм), сентябрь — холодный и умеренно-влажный.

Сезон 2020 г. с июня по сентябрь характеризовался более высокими среднесуточными температурами воздуха и большим количеством осадков по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. Среднесуточная температура воздуха данного периода в 2020 г. была на 1°C выше, чем в 2019 г., и составила 15.9°C, количество осадков за тот же период в 2020 г. было равно 109.3 мм, в 2019 г. — несколько меньше (92.1 мм).

Содержание аммонийного азота в образцах почв определяли колориметрическим методом в солевой вытяжке (1 н. раствор KCl) с индофенолом (ГОСТ 26489-85), нитратного азота — в виде окрашенного диазосоединения (ГОСТ 26488-85) спектрофотометрическим методом (на спектрофотометре Spectroflex 6100, WTW, Германия).

Все анализы выполнены в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ “Microsoft Excel”. Определены средние величины, их стандартные отклонения, корреляции Пирсона, достоверность различий средних при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение содержания минерального азота в биоугле экстракцией 2 М KCl не позволила получить достоверные результаты. Установлены следы присутствия аммонийного азота и отсутствие нитратов в биоугле. Результаты других исследователей согласовались с нашими данными. Показано, что в биоугле может содержаться от 0.6 до 1.8 мг N/kg [13]. В наших ранее проведенных экспериментах по изучению сорбции питательных веществ было установлено, что биоуголь может поглотить калия в 4 раза больше, чем содержится в растворе. В меньшем количестве усваивается аммоний, фосфор и кальций. Данные элементы поглощаются примерно с одинаковой интенсивностью и количестве. Нитраты и магний практически не сорбировались биоуглем [14].

Анализ данных, полученных в течение вегетационного периода 2019 г., выявил постепенное снижение содержания аммонийного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с СОК, тогда как в вариантах почвы с ВОК отмечали его увеличение во время первых 2-х нед опыта и последующее снижение (рис. 2а). Данное повышение было связано, вероятно, с большей биологической активностью в почвах с ВОК. Высококультуренная

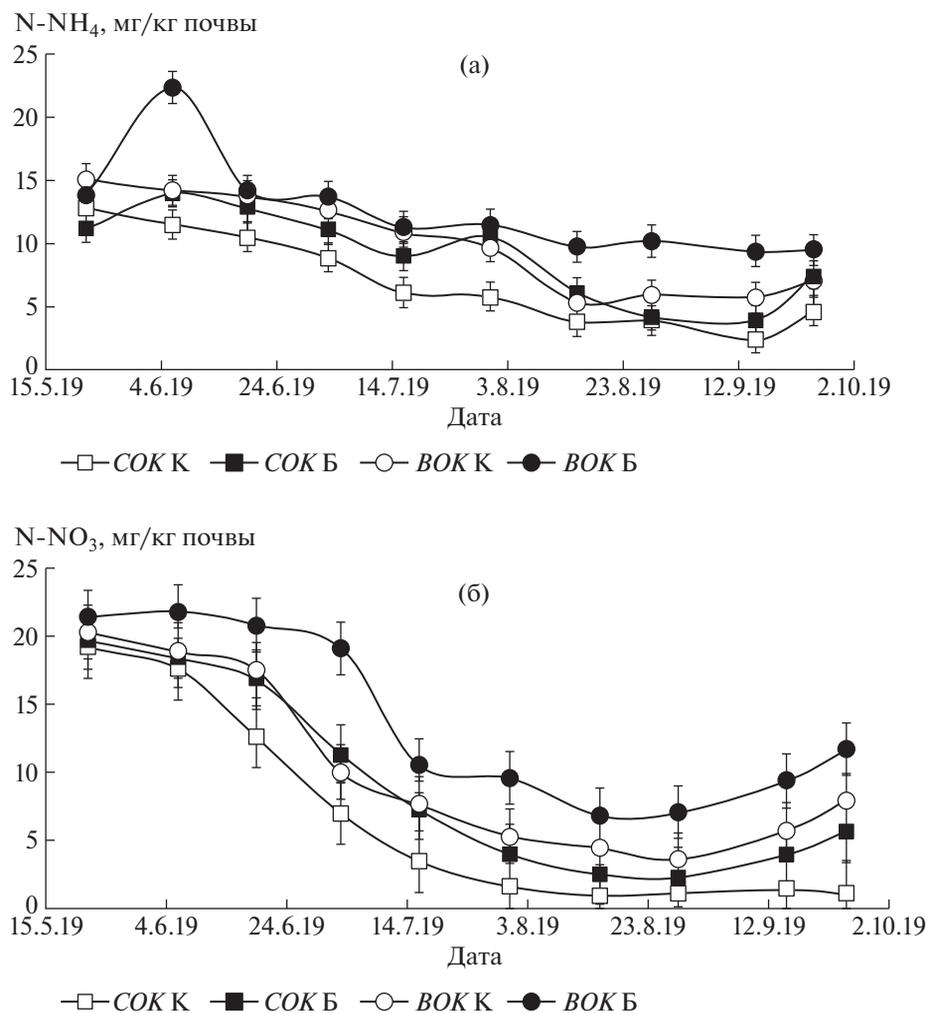


Рис. 2. Динамика содержания: (а) – аммонийного азота, (б) – нитратного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней и высокой степенью окультуренности (2019 г.) (COK – средне окультуренная почва, BOK – высоко окультуренная почва, К – контроль, Б – биоуголь). То же на рис. 3.

почва характеризовалась более благоприятными условиями для развития микроорганизмов и растений, т.к. обладала бóльшим содержанием органического вещества и подвижных элементов. Снижение концентрации аммонийного азота в ходе дальнейшего вегетационного периода в почве было обусловлено увеличением интенсивности процессов нитрификации. Кроме этого, аммонийный азот является важнейшим источником питания для растений и поступает в растения быстрее, чем его нитратный, т.к. для его использования на построение органических веществ растениям не требуется предварительное восстановление и дополнительные энергозатраты как при использовании растениями нитратной формы азота [15].

Кроме того, общая тенденция уменьшения содержания $N-NH_4$ в середине вегетационного пе-

риода, возможно, была связана с изменением воздушного, теплового и водного режимов почвы из-за засухи в июне и июле, которая оказала неблагоприятное влияние на интенсивность микробиологических процессов цикла азота.

Оптимальная температура для минерализации почвенного органического вещества составляет $\approx 28-30^\circ C$. При уменьшении температуры на $10^\circ C$ интенсивность минерализации уменьшается на 50%, и она почти останавливается при $0^\circ C$ [16]. Изменение влажности почвы влияет на минерализацию в меньшей степени, чем изменение температуры. Отмечена более интенсивная минерализация при чередовании засушливых и влажных периодов. Во время минерализации органического вещества высвобождается NH_3 , он получает протон во влажном субстрате и превращается в

NH_4^+ . В сухом субстрате происходит эмиссия аммиака, что приводит к потере азота [17].

Внесение биоугля привело к повышению содержания аммонийного азота в почве с *СОК* и *ВОК*. В вариантах с почвой с *СОК* биоуголь способствовал повышению содержания N-NH_4 в среднем на 38%, а в вариантах с почвой *ВОК* – на 33%. Повышение содержания аммонийного азота в почве с биоуглем могло быть связано с адсорбцией N-NH_4 на поверхности биоугля, и, как результат, со снижением выщелачивания N-NH_4 из почвы. Аналогичные результаты были получены в экспериментах [18].

Содержание нитратного азота в сезон 2019 г. в почве с *ВОК* было достоверно больше ($p < 0.05$), чем в почве с *СОК*. Это согласовалось с данными, полученными для почв разной степени окультуренности в 2012–2014 гг. [19]. В дерново-подзолистой супесчаной почве с *СОК* отмечено снижение содержания нитратного азота в ходе вегетационного периода (рис. 26). В почве с *ВОК* в течение первых 5-ти нед опыта концентрация N-NH_3 значительно не изменялась, далее наблюдали ее уменьшение, а затем увеличение в конце вегетационного периода.

В вариантах почвы *СОК* и *ВОК* зафиксировано достоверно ($p < 0.05$) большее количество нитратов по сравнению с контрольными вариантами, что, по-видимому, свидетельствовало об усилении процессов нитрификации при внесении в почву биоугля. Внесение биоугля в почву с *СОК* повысило содержание N-NO_3 в среднем на 39%, в почву с *ВОК* – на 36%. Большой отклик на внесение биоугля в почву наблюдали в почве *СОК*. Данная почва обладала более низким нитрификационным потенциалом по сравнению с почвой *ВОК*, что привело к увеличению нитрификации и повышению содержания нитратного азота [20].

Корреляционный анализ данных, полученных в сезоне 2019 г., выявил отрицательную связь между температурой почвы и содержанием в ней минеральных форм азота: $r = -0.50 \dots -0.56$ – для нитратного азота и более тесную связь ($r = -0.58 \dots -0.86$) – для аммонийного азота. Влияние влажности почвы на содержание нитратов в почве *СОК* было слабым ($r = -0.16 \dots -0.30$), в почве *ВОК* зафиксирована тесная отрицательная связь ($r = -0.50 \dots -0.54$). При этом в почве с биоуглем данная связь была сильнее в обоих вариантах. Корреляция между влажностью почвы и содержанием в ней аммонийного азота, напротив, в почве *СОК* была несколько сильнее ($r = -0.28 \dots -0.42$), чем в почве *ВОК* ($r = -0.17 \dots -0.29$). В почве с био-

углем данная связь была более тесной в обоих вариантах.

В течение 2020 г. от мая до начала июля содержание аммонийной формы азота в почве *СОК* в контроле оставалось практически на одном уровне – 6.60–6.84 мг/кг почвы, затем в середине июля происходило увеличение содержания аммонийного азота в 2.2 раза по сравнению с началом наблюдений (рис. 3а). К окончанию периода зафиксировано уменьшение концентрации N-NH_4 до 8.13 мг/кг почвы, что превосходило величину этого показателя в мае месяце. Внесение биоугля привело к повышению содержания аммонийного азота в почве с *СОК*. Тренд изменения содержания N-NH_4 в почве *СОК* с биоуглем был такой же, как и в почве *СОК* в контроле, за исключением начала мая, когда было зафиксировано небольшое уменьшение содержания аммонийной формы азота.

Изменение содержания аммонийного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве *ВОК* в целом происходило так же, как и в почве *СОК*. Однако содержание N-NH_4 характеризовалось достоверно ($p < 0.02$) большими величинами при сравнении почв *СОК* и *ВОК* в контроле и при внесении в них биоугля. Кроме того, к окончанию вегетационного периода содержание аммонийного азота в почве *ВОК* с биоуглем сравнялось с таковым в почве *ВОК* в контроле.

Внесение биоугля привело к достоверному ($p < 0.02$) повышению содержания аммонийного азота в почве с *СОК* и *ВОК*. В вариантах с почвой с *СОК* биоуголь способствовал повышению содержания N-NH_4 в среднем за сезон на 29%, в вариантах с почвой *ВОК* – на 25% по сравнению с контролем. Повышение содержания аммонийного азота в почве с биоуглем в 2020 г. объясняется теми же причинами, что и повышение данного параметра в 2019 г.

Содержание нитратного азота в 2020 г. в почве с *ВОК* было больше, чем в почве с *СОК*, однако различия в содержании нитратного азота не являлись достоверными ($p < 0.1$). В дерново-подзолистой супесчаной почве всех изученных вариантов наблюдали волнообразное изменение содержания нитратного азота в течение вегетационного периода 2020 г. (рис. 3б). При этом максимальные величины содержания N-NO_3 зафиксированы в середине июня (11.1 мг/кг в почве *СОК* и 13.5 мг/кг в почве *ВОК* в контрольных вариантах, 13.0 мг/кг в почве *СОК* и 15.7 мг/кг в почве *ВОК* при применении биоугля). Июнь являлся самым теплым и сухим месяцем вегетационного периода. Среднесуточная температура воздуха состави-

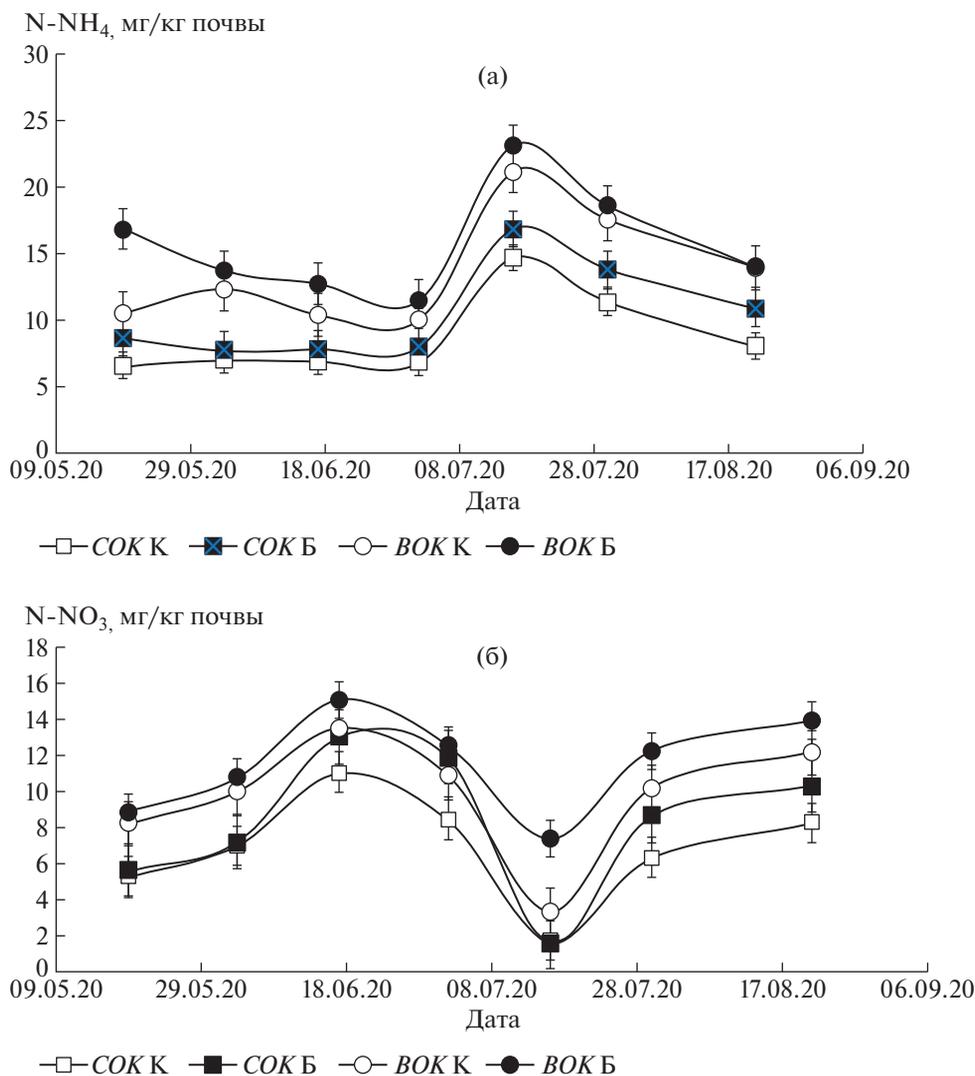


Рис. 3. Динамика содержания: (а) – аммонийного азота, (б) – нитратного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней и высокой степенью окультуренности (2020 г.).

ла 18.1°C, количество осадков – 38.9 мм. Далее до середины августа наблюдали уменьшение содержания N-NO₃ во всех вариантах опыта. Варианты различались абсолютными величинами содержания нитратного азота. Например, в почве контрольных вариантов *СОК* и *ВОК* содержалось меньше нитратного азота, чем в аналогичных вариантах с добавлением биоугля, что, по-видимому, свидетельствовало о более интенсивном процессе нитрификации в почвах с биоуглем. Кроме того, биоуголь, обладающий большой удельной поверхностью и пористостью, способствует адсорбции влаги [21] и удержанию минеральных элементов, в частности, нитратного азота. В этой связи почвы с биоуглем накапливают больше нитратного азота, что имеет существенное значение для питания растений. Однако различия в со-

держании нитратного азота в почвах *СОК* и *ВОК* при внесении биоугля не были достоверными ($p < 0.1$). Внесение биоугля в почву с *СОК* повысило содержание N-NO₃ в среднем на 21%, в почву с *ВОК* – на 18% по сравнению с контролем. Данные различия объясняются причинами, изложенными выше. В целом для вариантов с биоуглем были характерны более высокие уровни содержания N-NH₄ и N-NO₃, что согласовалось с данными других авторов [22, 23].

Корреляционный анализ данных, полученных в 2020 г., выявил положительную связь между температурой почвы и содержанием в ней минерального азота ($r = 0.10–0.74$) во всех вариантах, за исключением варианта почвы с *ВОК* и внесением биоугля, где такой связи не обнаружено в отношении аммонийного азота. Влияние влаж-

ности почвы на содержание нитратов во всех вариантах было слабым, за исключением варианта почвы с *ВОК* и внесением биоугля ($r = -0.57$). Корреляция между влажностью почвы и содержанием в почве аммонийного азота носила отрицательный характер ($r = -0.55...-0.59$).

При сравнении изученных почв по величине среднего содержания в них аммонийного и нитратного азота за вегетационные периоды 2019 и 2020 гг., можно отметить следующие закономерности. В 2020 г. во всех вариантах исследованных почв произошло уменьшение содержания нитратного азота, за исключением варианта *СОК*, где его содержание осталось практически на уровне 2019 г. (6.62 и 6.86 мг/кг почвы соответственно). Наибольшим снижением среднего содержания нитратного азота характеризовалась почва с внесением биоугля. В варианте почвы с *СОК* и внесением биоугля снижение данного параметра произошло на 9%, в варианте почвы с *ВОК* и биоуглем – на 17% по сравнению с 2019 г. Среднее за сезон содержание аммонийного азота увеличилось во всех вариантах, причем наибольшее увеличение зафиксировано для высокоокультуренной почвы как с внесением биоугля, так и без него. В варианте с почвой *ВОК* увеличение составляло 36%, в варианте *ВОК* и биоуглем – 25%, по сравнению с 2019 г.

Данные изменения были связаны с метеорологическими условиями, сложившимися в вегетационные периоды 2019–2020 гг. Погодные условия, сложившиеся в 2020 г., в большей степени способствовали процессу аммонификации, чем нитрификации, в изученных почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение древесного биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву в дозе 20 т/га привело к увеличению содержания минеральных форм азота в течение 2-х лет. При этом в 2019 г. отмечали увеличение содержания минеральных форм азота в вариантах с биоуглем в 1.4 раза по сравнению с контролем, в 2020 г. – в 1.2 раза в тех же вариантах. Наибольшее увеличение содержания минеральных форм азота по сравнению с контрольным вариантом отмечено в почве со средней степенью окультуренности. В 2020 г. по сравнению с 2019 г. произошло уменьшение содержания нитратных форм азота и увеличение его аммонийных форм. Корреляционная связь содержания минеральных форм азота в почве с ее влажностью и температурой в 2019 г. носила отрицательный характер, в 2020 г. с влажно-

стью была в основном отрицательной, с температурой – в основном положительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Козым Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
2. Ding Y., Liu Y.X., Wu W.X., Shi D.Z., Yang M., Zhong Z.K. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns // Water Air Soil Pollut. 2010. V. 213 (1–4). P. 47–55.
3. Nelissen V., Rütting T., Huygens D., Staelens J., Ruyschaert G., Boeckx P. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil // Soil Biol. Biochem. 2012. V. 55. P. 20–27.
4. Novak J.M., Busscher W.J., Laird D.L. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil // Soil Sci. 2009. № 174. P. 105–112.
5. Ouyang L., Wang F., Tang J., Yu L., Zhan R. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2013. V. 13 (4). P. 991–1002.
6. Zheng H., Wang Z., Deng X., Herbert S., Xing B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil // Geoderma. 2013. V. 206. P. 32–39.
7. Ippolito J.A., Laird D.A., Busscher W.J. Environmental benefits of biochar // J. Environ. Qual. 2012. V. 41 (4). P. 967–972.
8. Lehmann J., Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics // Biol. Approach. Sustain. Soil Syst. 2006. V. 113 (517). P. 530.
9. Nelissen V., Saha B. K., Ruyschaert G., Boeckx P. Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 70. P. 244–255.
10. Nguyen T.T.N., Xu C.Y., Tahmasbian I., Che R., Xu Z., Zhou X., Wallace H.M., Bai S.H. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis // Geoderma. 2017. V. 288. P. 79–96.
11. Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // Агрофизика. 2012. № 4. С. 8–18.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
13. Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Using poultry litter biochars as soil amendments // Soil Res. 2008. V. 46(5). P. 437–444.
14. Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 211–220.
15. Якушкина Н.И. Физиология растений. М.: Изд-во Владос, 2004. 464 с.

16. *Kirschbaum M.U.F.* The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate // *Soil Biol. Biochem.* 2006. V. 38 (9). P. 2510–2518.
17. *Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой биологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
18. *Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A.R.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere.* 2012. V. 89 (11). P. 1467–1471.
19. *Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В.* Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности // *Агрохимия.* 2020. № 8. С. 48–56.
20. *Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Рижия Е.Я., Оленченко Е.А.* Эмиссия закиси азота из легких сельскохозяйственных почв Ленинградской области // Мат-лы совещ.-семинара “Снижение отрицательного воздействия на окружающую среду химически активного азота при производстве сельскохозяйственной продукции”. М., 2010. С. 46–53.
21. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // *Агрохимия.* 2016. № 9. С. 46–53.
22. *Белая А.А., Патрушева О.В., Нестерова О.В., Бриксманс А.В.* Влияние биоугля на содержание некоторых форм азота в почве и биомассе капусты // Мат-лы Международ. научн. семинара “Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду”. АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г. СПб.: АФИ, 2020. С. 8–12.
23. *Дубровина И.А.* Пролонгированное влияние биоугля на агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // Там же. С. 28–30.

Mineral Nitrogen Content in Sod-Podzolic Sandy Soils of Different Fertility after Application of Biochar

L. V. Boitsova^{a, #}, E. Ya. Rizhiya^{a, b}, and M. A. Moskvina^a

^a *Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia*

^b *Russian State Hydrometeorological University
Voronezhskaya ul. 79, St.-Petersburg 192007, Russia*

[#]*E-mail: larisa30.05@mail.ru*

In a two-year vegetation-field experiment, the effect of applying biochar at a dose of 20 t/ha on the content and seasonal dynamics of mineral forms of nitrogen (ammonium and nitrate) was studied. The vegetation-field experiment was based in the Menkov branch of AFI (MOS-AFI, Leningrad region), on the sod-podzolic sandy loam soils differed in the degree of cultivation: medium-cultivated and high-cultivated. The scheme of the experiment: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. The aim of the study was to study the effect of biochar application on the content of mineral forms of nitrogen in sod-podzolic sandy loam soil of different quality. The content of ammonium nitrogen in soil samples was determined by the indophenol method, the concentration of nitrates – by the spectrophotometric method. It was found that the introduction of wood biochar into the soil at a dose of 20 t/ha led to an increase in the content of mineral forms of nitrogen. In 2019, there was an increase in the content of mineral forms of nitrogen in the variants with biochar by 1.4 times compared to the control, in 2020 – by 1.2 times in the same variants. The greatest increase in the content of mineral forms of nitrogen in comparison with the control variant was observed in the soil with an average degree of cultivation. In 2020, compared to 2019, there was a decrease in the content of nitrate forms of nitrogen and an increase in its ammonium forms.

Key words: ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, woody biochar, sod-podzolic soil, degree of cultivation.

УДК 631.84:631.584.5:633.358:633.11:631.582

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНОГО УДОБРЕНИЯ В СМЕШАННЫХ ПОСЕВАХ ГОРОХА И ПШЕНИЦЫ В СЕВООБОРОТЕ

© 2021 г. М. А. Алёшин^{1,*}, А. А. Завалин²¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д. Н. Прянишникова
614990 Пермь, ул. Петропавловская, 23, Россия² Всероссийский научный-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: matvei0704@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 09.06.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

В полевом опыте изучили влияние уровней азотного питания (N0, N30, N60) на урожайность смешанных посевов гороха и яровой пшеницы (пшеница 75% + горох 25%, пшеница 50% + горох 50%, пшеница 25% + горох 75%) в сравнении с одновидовыми посевами (яровая пшеница, посевной горох). Максимальная урожайность зерносеменной массы (12.1 т/га) была получена в смешанном агроценозе пшеница 25% + горох 75%, при внесении N60. При увеличении доли гороха (25%–50%–75%) возрастало содержание сырого протеина до 139–149 г/кг (1-й класс) и снижалось количество сырой клетчатки до 248 г/кг (1-й класс) в составе полученного корма. Накопление пожнивно-корневых остатков (ПКО) в почве определялось продуктивностью и составом смешанных посевов и достигало 3.33–4.05, 4.04–5.24, 4.44–5.86 т/га при внесении N0, N30, N60. После уборки в почву поступало общего азота 16.0–19.5 (вариант пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (вариант пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (вариант пшеница 25% + горох 75%) кг/га, при этом в зависимости от состава смешанного посева 20–108 кг N/га поступало за счет симбиотической азотфиксации. При увеличении доли гороха в смешанном посеве >50% отмечено более высокое содержание азота (>2%) в составе зерносеменной массы и более узкое соотношение C : N = 25.4–27.5. При выращивании ярового ячменя в севообороте после смешанных посевов гороха и пшеницы на фоне N0 прибавка урожайности зерна составила 0.33–0.71 т/га.

Ключевые слова: дозы азота, смешанный посев, посевной горох, яровая пшеница, урожайность, зерносемян, биохимический состав, биологический азот, пожнивно-корневые остатки, соотношение C : N.

DOI: 10.31857/S000218812111003X

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие сельскохозяйственной отрасли в значительной степени зависит от возобновляемых ресурсов, таких как биологически фиксированный азот. Наряду с одновидовыми посевами, смешанные посевы зерновых бобовых и злаковых культур способны обеспечить вовлечение в биологический цикл значительного количества азота атмосферы [1, 2], высокую продуктивность [3, 4] и эффективное использование пашни [5], а также целый ряд сопутствующих экологических преимуществ в агроэкосистемах [6–8].

Благодаря взаимодействию компонентов в смешанном посеве [9] наблюдают усиление интенсивности потребления элементов [10, 11] и оптимизацию условий минерального питания. В работе

[12] приведены факты о трансфере и доставке горохом части симбиотически фиксированного азота к корневой системе злакового растения в виде аминокислотного экссудата. Благодаря более высокой усваивающей способности корневой системы зернобобовых культур, в границах ризосферы происходит увеличение подвижности почвенных соединений азота [13, 14] и фосфора [15–17]. В результате существенно облегчается процесс поглощения питательных веществ корневой системой, происходит оптимизация условий минерального питания злакового компонента [18, 19]. Стимулирующее видоспецифическое влияние компонентов смешанных посевов [20–23] отчасти объясняют изменением состава и активности микробного пула ризосферы.

Воздействие злаков на растения из семейства бобовых может быть выражено посредством увеличения их симбиотической фиксации атмосферного N_2 [24, 25]. Данное взаимодействие происходит посредством корневых экссудатов, способных увеличить экспрессию флавоноидов (сигнальных соединений для ризобий) и генов, отвечающих за инфицирование корневой системы бобовых культур со стороны симбиотических микроорганизмов и последующий процесс нодуляции [26].

Ключевая роль в вопросе взаимодействия компонентов смешанных посевов принадлежит азоту. Азот почвы и удобрений является тем питательным ресурсом, благодаря которому комплементарные межвидовые взаимоотношения переходят в конкурентные. Доминирующая роль злаковых компонентов в составе смешанных посевов сводится к более интенсивному поглощению азота почвенных запасов и привнесенных количеств с удобрениями [27–29]. Вопреки такому “агрессивному” поведению злака, бобовый компонент посева отвечает увеличением азотфиксирующей способности на 9–17% [30, 31] для обеспечения собственной потребности в азоте до 95–99% [32, 33].

Внесение азота минеральных удобрений [34] особенно в нитратной форме [35, 36] вносит дополнительные коррективы в механизм образования и последующую работу корневого симбиотического аппарата бобовых. Указывали на снижение скорости и полное ингибирование процесса образования клубеньков (нодуляции), наличие повреждений уже существующих клубеньков, непосредственное уменьшение объемов фиксации азота [35] в одно- и поливидовых посевах бобовых культур. При этом исследователи [37] указали на менее выраженный характер такого влияния на ризобиальный аппарат со стороны азота удобрений именно в смешанных посевах.

Обозначенные критерии и параметры взаимодействия компонентов в составе смешанных бобово-злаковых посевов делают более значимым последующее исследование данного вопроса, подчеркивают их актуальность и позволяют более комплексно подходить к интерпретированию полученных результатов. Цель работы — изучение эффективности азотного удобрения для определения перспективности возделывания смешанных посевов гороха и яровой пшеницы в севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2012–2014 гг. на научно-учебном опытном поле Пермского ГАТУ. Почва — дерново-мелкоподзолистая среднесуглинистая, сформированная на покровных пермских глинах. Перед закладкой опыта пахотный слой 0–(24–26 см) имел следующие агрохимические показатели: содержание гумуса (по методу Тюрина в модификации Никитина) — 1.68–1.81%, pH_{KCl} 5.6–6.4, содержание подвижных форм (по Кирсанову) фосфора и калия — 242–401 и 224–340 мг/кг соответственно. Полевой 2-факторный опыт предполагал изучение отзывчивости посева на уровень азотного питания при 3-х соотношениях компонентов в составе бобово-злаковой смеси в сравнении с одновидовыми посевами бобовой (горох, 1.4 млн шт./га) и зерновой (яровая пшеница, 7 млн шт./га) культур по следующей схеме. Фактор *A* — состав посева: A_0 — пшеница 100%, A_1 — пшеница 75% + горох 25%, A_2 — пшеница 50% + горох 50%, A_3 — пшеница 25% + горох 75%, A_4 — горох 100%; фактор *B* — дозы азота: B_0 — N_0 , B_1 — N_{30} , B_2 — N_{60} .

Размер делянок для фактора *A* и *B* составлял 900 и 150 м² соответственно, учетная площадь при уборке — 25.2 м², Повторность в опыте четырехкратная, расположение делянок — по методу систематических повторений. Азотное удобрение (N_m , 46% д.в.), вносили под предпосевную культувацию.

Предшественник — озимая рожь, посеянная после чистого пара. Объекты исследования — районированные сорта гороха посевного (Альбумен) и пшеницы яровой (Иргина), имеющие близкий по продолжительности вегетационный период. Посев и последующие агротехнические мероприятия проводили согласно перспективной технологии заготовки кормов из смесей бобовых и злаковых растений при уборке всей надземной биомассы в фазе молочно-восковой спелости злакового компонента на зерносеяж [38]. Уборку проводили дифференцировано, скашивали косилкой КС-2,1 по достижению культурами уборочной спелости в сочетании с прямым методом учета урожая.

В образцах зерносеяжа определяли содержание сухого вещества (ГОСТ 31640-2012), сырого протеина (ГОСТ 13496.4-93), сырой клетчатки (ГОСТ 31675-2012), сырого жира (ГОСТ 13496.15-2016), сырой золы (ГОСТ 32933-2014). Расчет количества обменной энергии (**ОЭ**, Мдж/кг) и кормовых единиц (**к.е.**, кг/кг) производили согласно [39]. Поступление органического вещества, общего и фиксированного азота в вариантах с одно-

видовыми и смешанными посевами рассчитывали по [40].

Изучение эффективности действия общего и биологического азота, накопленного в составе пожнивно-корневых остатков гороха в вариантах со смешанными и одновидовым посевами, проводили посредством учета урожая зерна ячменя сорта Родник Прикамья, высеваемого в качестве последующей культуры севооборота соответственно с 2013 по 2015 г. Посев и последующие агротехнические мероприятия в опыте производили в соответствии с методикой [41]. При посеве ячменя вносили фосфорное удобрение (P_c , 26% д.в.), в дозе P_{15} . Учет урожая ячменя проводили сплошным методом при уборке комбайном в фазе полной спелости зерна. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа.

Вегетационный период (май–август) 2012 г. в Пермском крае отличался преобладанием положительной аномалии температуры воздуха на $1-2^\circ\text{C}$, в отсутствие сильных похолоданий. Сумма осадков на большей части края была около нормы, преобладали осадки конвективного характера. В мае 2013 г. средняя температура воздуха была близка к норме ($8-12^\circ\text{C}$), осадков выпало меньше нормы, они имели в основном ливневый характер. Отмечались регулярные заморозки до $-1...-4^\circ\text{C}$ в 1-й и 2-й декадах. Июнь был теплым и сухим, средняя температура воздуха была выше нормы на $2-3^\circ\text{C}$ и соответствовала норме июля. Среднемесячная температура составила $18-21^\circ\text{C}$. Осадков в крае выпало меньше нормы. Август характеризовался умеренно теплой погодой без резких колебаний температуры. Осадков выпало преимущественно меньше нормы.

Главной особенностью вегетационных периодов 2014–2015 гг. оказалось преобладание прохладной погоды с избытком осадков. Средняя температура воздуха за летний период составила 15.5°C , что было примерно на 1.3°C ниже климатической нормы. В 2014 г. с 10 июля и до конца месяца на Среднем Урале наблюдали аномально холодную погоду с температурой воздуха ниже нормы в среднем на $5-6^\circ\text{C}$. В 2015 г. средняя температура воздуха в июне составила 18.8°C (на 2.4°C теплее нормы), в июле – 14.7°C (на 3.6°C холоднее нормы), в августе – 13.0°C (на 2.3°C холоднее нормы). Периоды 2014–2015 гг. в Пермском крае были исключительно дождливыми, причем больше всего осадков выпало в основной сельскохозяйственной зоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возделывание смешанных посевов зернобобовых и злаковых культур может иметь дифференцированный [42] и в то же время универсальный характер использования с учетом потребностей животноводства. Гидротермические условия в периоды вегетации обусловили существенные различия в продуктивности одновидовых и смешанных посевов и их отзывчивости на уровни азотного питания в зависимости от года проведения исследования (табл. 1). Большой пластичностью к условиям возделывания среди изученных видов характеризовалась яровая пшеница. Без азотного удобрения урожайность ее зерносеменной массы по годам составила $6.01-7.60$ т/га. Горох при тех же равных условиях формировал урожайность на уровне $5.34-6.63$ т/га. Вегетационный период 2012 г. отличался более высокой урожайностью бобовой культуры, в остальные годы (2013–2014 гг.), достоверно выше была урожайность яровой пшеницы. Для смешанных посевов характерным был более высокий уровень урожайности относительно одновидовых посевов во все годы исследования. Более существенные отличия зафиксированы в 2012 г. Увеличение уровня азотного питания в годы проведения исследования и в среднем за 3 года было условием повышения и соответствующего дифференцирования урожайности посевов.

В 2012 г. отмечено существенное увеличение урожайности зерносеменной массы от $4.99-5.61$ до $7.14-7.76$ т/га (относительно одновидовых посевов) при включении в состав посевов посевного гороха в долевом эквиваленте, равном 50 и 75% соответственно. При внесении N_{30} урожайность увеличивалась на 0.97 т/га. При дальнейшем повышении уровня азотного питания увеличение урожайности отмечали на уровне тенденции.

Отзывчивость одновидовых посевов пшеницы и гороха на использование азотного удобрения в дозах 30 и 60 кг/га составила $1.20-1.68$ и $0.37-1.20$ т/га соответственно. Высокая отзывчивость злакового компонента на использование азота удобрений обусловлена биологическими особенностями развития культуры и зачастую выступает в качестве фактора, лимитирующего уровень ее продуктивности на дерново-подзолистых почвах Предуралья [43].

Более высокая урожайность смешанных посевов получена при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха (пшеница 25% + горох 75%) в смеси. Для условий Предуралья установлено преимущество внесения N_{60} . В этом случае наблюдали

Таблица 1. Урожайность зерносенажной массы одновидовых и смешанных посевов пшеницы и гороха, т/га

Состав посева (фактор А)	Дозы азота (фактор Б)			Среднее фактора А
	N0	N30	N60	
2012 г.				
Пшеница 100%	5.05	6.25	6.73	6.0
Пшеница 75% + горох 25%	6.54	7.05	7.28	7.0
Пшеница 50% + горох 50%	10.5	11.8	12.5	11.6
Пшеница 25% + горох 75%	11.3	12.8	14.2	12.8
Горох 100%	6.11	6.48	7.31	6.6
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.74)	7.90	8.87	9.60	HCP_{05} главных эффектов = 1.5
HCP_{05} частных различий фактора	А			2.6
	Б			1.6
2013 г.				
Пшеница 100%	5.72	6.24	7.14	6.37
Пшеница 75% + горох 25%	6.06	7.65	8.35	7.35
Пшеница 50% + горох 50%	6.41	7.79	9.29	7.83
Пшеница 25% + горох 75%	7.57	9.17	10.9	9.20
Горох 100%	4.45	5.18	6.39	5.34
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.37)	6.04	7.21	8.41	HCP_{05} главных эффектов = 0.87
HCP_{05} частных различий фактора	А			1.5
	Б			0.8
2014 г.				
Пшеница 100%	6.85	7.03	8.92	7.60
Пшеница 75% + горох 25%	8.07	8.10	9.52	8.56
Пшеница 50% + горох 50%	8.16	9.33	10.8	9.42
Пшеница 25% + горох 75%	8.64	9.47	10.4	9.45
Горох 100%	5.36	6.16	7.48	6.33
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.54)	7.42	8.02	9.38	HCP_{05} главных эффектов = 0.91
HCP_{05} частных различий фактора	А			1.6
	Б			1.2
Среднее (2012–2014 гг.)				
Пшеница 100%	5.87	6.51	7.60	6.66
Пшеница 75% + горох 25%	6.89	7.60	8.38	7.62
Пшеница 50% + горох 50%	8.35	9.65	10.84	9.61
Пшеница 25% + горох 75%	9.18	10.80	12.11	10.70
Горох 100%	5.31	5.94	7.06	6.10
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.35)	7.1	8.1	9.2	HCP_{05} главных эффектов = 2.3
HCP_{05} частных различий фактора	А			4.0
	Б			0.78

формирование более высокорослых и облиственных растений, прежде всего – бобовой культуры.

Увеличение доли зернобобового компонента в составе смешанных посевов с 25 до 50 и до 75% приводило к повышению их отзывчивости при уровне азотного питания N30 с 0.51 до 1.37 и 1.41 т/га, N60 – с 0.74 до 1.99 и 2.89 т/га соответственно. Это было связано со снижением видовой конкуренции между культурами относительно использования доступного количества азота почвы и удобрений [44, 45], которую наблюдали благодаря снижению доли злакового компонента в составе посева при последующих переводе и выстраивании взаимоотношений между видами культур по типу протокооперации на основании принципов комплементарности [46, 47].

Существенное увеличение урожайности зерносенажной массы от 0.99–2.01 до 3.50–4.53 т/га (относительно одновидовых посевов) зафиксировано в 2013 г. при включении в состав посевов злакового компонента. Более высокая урожайность (9.20 т/га) получена в смешанном посеве с преобладанием бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). При внесении N30 и N60 происходило увеличение зерносенажной массы на 1.16 и 2.37 т/га соответственно. Существенная разница урожайности между фоном N0 и вариантами с внесением N30 (1.38–1.60 т/га) зафиксирована только в смешанных посевах. Это могло быть связано с более интенсивным потреблением и использованием растениями азота удобрения.

Современные сорта посевного гороха в процессе вегетации достаточно эффективно используют азот почвы и минеральных удобрений. При этом отмечен частичный или даже полный отказ представителей данного семейства от симбиотрофного типа питания азотом атмосферы [48], что в последующем негативно отражается на азотном балансе почвы и делает менее привлекательным включение одновидовых и смешанных посевов гороха в состав севооборотов. Азот минеральных удобрений (особенно в нитратной форме) уже через 7 ч способен оказывать ингибирующее действие на развитие симбиотического ризобияльного аппарата бобовых культур [49]. По данным [50, 51], на последующем этапе развития представители семейства бобовых могут самостоятельно регулировать количество клубеньков на корнях и степень развития ризосферных симбионтов в зависимости от обеспеченности почвы доступными для питания формами азота и характера взаимоотношений, прежде всего, степени проявления конкуренции, в рамках одновидовых и смешанных посевов.

Более высокая урожайность зерносенажа (7.57 т/га) на фоне N0 (относительно одновидового посева пшеницы) была получена в варианте с преобладанием бобового компонента в составе смеси. С увеличением уровня азотного питания урожайность смесей существенно возрастала только при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). Увеличение доли зернобобового компонента в составе смешанных посевов с 25 до 50 и до 75% привело к росту прибавки урожайности: при применении N30 с 1.59 до 1.38 и 2.60 т/га, N60 – с 2.29 до 2.88 и 4.30 т/га соответственно. Преимущество смешанных посевов относительно одновидовых посевов этих культур в отношении использования элементов питания из удобрений отмечено при обоих уровнях (N30, N60) азотного питания. В подтверждение полученных данных можно привести результаты исследования [52], где указано на более интенсивное (в 1.88–2.76 раза) поглощение азота пшеницей и викой в смешанных посевах на протяжении всего периода вегетации относительно одновидовых посевов. Более высокий эффект от сочетания компонентов получен при соотношении пшеница 25% + горох 75% и внесении азота в дозе N60.

В 2014 г. преимущество имели смешанные посевы пшеницы и гороха. Существенное увеличение урожайности зерносенажной массы от 0.96–1.85 до 2.23–3.12 т/га отмечали при всех изученных соотношениях компонентов в составе высеваемых смесей. При внесении N30 происходило увеличение зерносенажной массы на 0.60 т/га, последующее увеличение дозы до N60 обеспечивало дальнейший рост урожайности на 1.36 т/га. Аналогичная тенденция и более высокая отзывчивость на уровне азотного питания была получена только при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) в составе высеваемой смеси. Сформированный смешанный посев с указанным составом компонентов отличался последовательной увеличивающейся отзывчивостью на возрастающие дозы азотного удобрения (прибавка при применении N30 составила +1.17, N60 – +1.43 т/га).

Это указывало на более полную реализацию биологического потенциала культур с точки зрения потребления элементов питания (прежде всего азота) из почвы и внесенного удобрения при соответствующем соотношении видов в составе высеваемой смеси. Такое долевое сочетание компонентов при близких сроках прохождения фенологических фаз развития и интенсивности роста использованных сортов культур в посеве способ-

ствовало межвидовому взаимодействию, позволившему полноценно развиваться растениям обоих видов.

Более высокая урожайность смеси относительно одновидового посева пшеницы без N-удобрения получена при преобладании бобового компонента в составе смеси (пшеница 25% + горох 75%). Увеличение уровня азотного питания (N30), способствовало получению существенных прибавок урожайности зерносеменной массы смеси с равным соотношением культур (пшеница 50% + горох 50%) и преобладанием бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). На более высоком уровне азотного питания (N60) существенная прибавка урожайности (1.84 т/га) получена при равном соотношении высеваемых культур (пшеница 50% + горох 50%). Существенное увеличение урожайности на 1.45–2.60 т/га всех вариантов смешанных посевов отмечено только на более высоком уровне азотного питания (N60). На основании фенологических наблюдений в 2014 г. зафиксировано существенное удлинение межфазных периодов и затягивание момента перехода к развитию генеративных органов растений.

В среднем за 3 года исследования варьирование урожайности зерносеменной массы смешанных посевов составило 0.79–1.64 т/га, что объясняется отличиями гидротермических условий годов опыта. По урожайности смешанные посевы существенно превосходили одновидовые посевы этих культур.

В среднем за годы исследования за счет возрастания доли семян гороха с 25 до 50 и 75% в посевной норме происходило увеличение урожайности зерносеменной массы на 0.97, 2.95 и 4.04 т/га соответственно. Существенными были различия прибавки урожайности только при увеличении доли бобового компонента в смеси >50%. Увеличение доз азота (N0→N30→N60) сопровождалось выраженным положительным действием во все годы исследования. В среднем за 3 года уровень прибавки составил соответственно 0.98 и 2.08 т/га. Проявление принципов комплементарности между компонентами смешанных посевов пшеницы и гороха было связано не только с развитием корневых систем, но и архитектурой надземной массы. Прочная соломина, а в последующем и колос яровой пшеницы выполняли роль поддерживающего компонента, благодаря которому происходило четкое вертикальное ориентирование стеблей гороха. Это позволило бобовому компоненту в последующем занять максимальное количество свободного межрядового пространства в посевах, тем самым обеспечить большую ассимилирующую поверхность листового

аппарата. Учитывая совокупность воздействия изученных факторов, следует отметить, что максимальная урожайность в среднем за 3 года (12.1 т/га) получена при возделывании пшеницы и гороха в смеси (пшеница 25% + горох 75%) на фоне N60. Созданный фон азотного питания определял сбалансированность питания культур в одновидовых посевах, снижение напряженности во взаимодействии и конкурентных отношениях между видами в смешанных посевах.

Перечень показателей качества урожая (табл. 2, 3) продиктован характером использования корма и принципами, на основании которых происходит составление рационов для высокопродуктивных сельскохозяйственных животных и птицы [53, 54].

Зерносеменная масса, полученная в одновидовых посевах, существенно отличалась по большинству представленных показателей. Корм, полученный в смешанных посевах, чаще занимал промежуточное положение, которое определяло соотношение видов культур в составе высеваемой смеси.

В зерносеменной массе, полученной в смешанных посевах яровой пшеницы и посевного гороха, содержание сырого протеина было на уровне 89.8–149 г/кг. Более высокие показатели (139–149 г/кг корма) были характерны для смешанных посевов с соотношением компонентов пшеница 25% + горох 75%. Полученный корм соответствовал 1-му классу (не менее 120 г/кг). Биологические особенности развития зернобобовых культур предусматривают накопление и более высокое содержание азотсодержащих соединений в составе не только зерна, но и вегетативных органов (стеблей, листьев, побегов) растений.

Смешанные посевы имели преимущество над одновидовыми посевами пшеницы при равном сочетании компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и большей доли гороха в составе высеваемой смеси (пшеница 25% + горох 75%). Преимущество среди изученных посевов по уровню содержания сырого протеина (145 г/кг – 1-й класс), имел посев с преобладанием бобовой культуры в составе высеваемой смеси. Устойчивая тенденция к повышению содержания сырого протеина (118→124→128 г/кг) зафиксирована при увеличении уровня азотного питания (N0→N30→N60). Существенное увеличение содержания сырого протеина на 9.7 г/кг (до уровня 1-го класса), происходило только при внесении N60.

Структурность и переваримость зерносеменного, а также степень расщепления полимерных углеводистых соединений в его составе определяются

Таблица 2. Содержание сырого протеина и сырой клетчатки в зерносенаже, г/кг сухого вещества (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 24/34)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	77/303	82/290	92/307	83/300
Пшеница 75% + горох 25%	90/267	98/258	105/257	98/260
Пшеница 50% + горох 50%	107/259	114/275	113/266	111/267
Пшеница 25% + горох 75%	139/248	148/263	149/271	145/261
Горох 100%	178/230	180/239	182/248	180/239
Среднее фактора В, (НСР ₀₅ главных эффектов = 9.5/15)	118/261	124/265	128/270	
НСР ₀₅ частных различий фактора		А		42/59
		В		21/34
Нормы для зерносенажа 1 / 2 / 3 класса по ГОСТ Р 58145-2018	сырого протеина, не менее 120/100/80			сырой клетчатки, не более 250/270/290

Примечание. Над чертой – содержание сырого протеина, под чертой – содержание сырой клетчатки.

Таблица 3. Содержание сырого жира и сырой золы в зерносенаже, г/кг сухого вещества (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 8.3/7.0)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	14.7/18.7	17.5/19.4	16.9/20.7	16.3/19.6
Пшеница 75% + горох 25%	20.4/28.3	22.7/26.3	18.7/27.7	20.6/27.5
Пшеница 50% + горох 50%	23.6/35.7	22.3/37.3	20.5/37.4	22.2/36.8
Пшеница 25% + горох 75%	28.1/42.4	25.9/46.4	25.5/41.0	26.5/43.3
Горох 100%	26.1/45.1	27.0/50.0	29.6/53.7	27.6/49.6
Среднее фактора В (НСР ₀₅ главных эффектов = 2.2/3.3)	22.6/34.0	23.1/35.9	22.2/36.1	
НСР ₀₅ частных различий фактору		А		14.5/12.0
		В		5.0/7.3
Нормы для зерносенажа 1/2/3 класса по ГОСТ Р 58145-2018	Содержание сырого жира не нормируется			Содержание сырой золы ≥60/80/100

Примечание. Над чертой – содержание сырого жира, под чертой – содержание сырой золы.

содержанием сырой клетчатки. Ее накопление по мере созревания зерновых культур ограничивает проведение уборки на зерносенаж в более поздние сроки, отличающиеся накоплением большего количества сухого вещества [53].

В зерносенажной массе, полученной в смешанных посевах яровой пшеницы и посевного гороха, содержание сырой клетчатки было на уровне 248–275 г/кг. Более низкие показатели (248 г/кг корма) были получены в смешанном посеве пшеница 25% + горох 75% без внесения N-удобрения. Включение и последующее увеличение доли гороха в составе смешанных посевов способствовало снижению количества сырой

клетчатки в зерносенажной массе, что положительно отражается на переваримости корма [53].

Зерносенажная масса, полученная в смешанных посевах с преобладанием одного из компонентов в составе высеваемой смеси (пшеница 75% + горох 25%, пшеница 25% + горох 75%), по содержанию сырой клетчатки соответствовала 2-му классу. Ключевым условием, наряду с включением гороха, для этого являлось снижение количества солоистой части растений пшеницы в общем объеме полученной зерносенажной массы. Повышение содержания сырой клетчатки (261→265→270 г/кг) при увеличении уровня азотного питания можно рассматривать на уровне тенденции.

Таблица 4. Содержание обменной энергии (МДж/кг сухого вещества) и кормовых единиц (кг/кг сухого вещества) в зерносенаже (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 0.57/0.08)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	7.97/0.51	8.12/0.53	8.26/0.55	8.12/0.53
Пшеница 75% + горох 25%	8.35/0.57	8.56/0.60	8.69/0.61	8.53/0.59
Пшеница 50% + горох 50%	8.73/0.62	8.83/0.63	8.82/0.63	8.79/0.63
Пшеница 25% + горох 75%	9.43/0.72	9.57/0.74	9.54/0.74	9.51/0.74
Горох 100%	10.3/0.86	10.3/0.86	10.3/0.86	10.3/0.86
Среднее фактора В (НСР ₀₅ главных эффектов = 0.21/0.03)	8.96/0.66	9.07/0.67	9.12/0.68	
НСР ₀₅ частных различий фактора		А		0.99/0.14
		В		0.47/0.07
Нормативные требования оценки питательности корма 1/2/3 класса, для 1 кг сухого вещества		обменной энергии ≥9.20/8.60/8.10		кормовых единиц ≥0.69/0.60/0.53

Примечание. Над чертой – содержание обменной энергии, под чертой – содержание кормовых единиц.

Содержание сырого жира в зерносенаже (табл. 3) в зависимости от состава смешанных посевов и уровня азотного питания варьировало в пределах от 10.8–91.4 до 5.5–19.1% соответственно. Двухкомпонентные посевы имели преимущество относительно одновидового посева пшеницы только в случае преобладания доли гороха в составе высеваемой смеси (пшеница 25% + горох 75%).

Содержание сырой золы входит в перечень ключевых показателей, которые определяют классность зерносенажа по ГОСТ Р 58145-2018 “Зерносенаж. Технические условия”. Более высокое содержание сырой золы в зерносенажной массе было в одновидовом и смешанном посеве бобовой культуры, поскольку зерновые бобовые культуры больше потребляют элементов минерального питания по сравнению со злаковыми [55]. Преимущество среди изученных смесей по содержанию сырой золы (36.8 и 43.3 г/кг, 1-й класс), имели посевы с сочетанием пшеница 50% + горох 50% и пшеница 25% + горох 75%. Содержание сырой золы в зерносенаже смешанных посевов не изменялось в зависимости от состава посева и уровня азотного питания и соответствовало норме для 1-го класса (≤60 г/кг). Данная особенность была связана с тем, что однолетние злаковые и бобовые культуры относительно многолетних представителей своих видов отличаются более низким содержанием минеральных соединений в своем составе [53].

Возделывание смешанных посевов гороха в севооборотах позволяет увеличить накопление

энергии и выход кормовых единиц (к.е.) с урожаем за счет повышения урожайности и валового сбора, увеличения общей питательности и оптимизации биохимического состава корма. Обменная энергия (ОЭ) считается основной частью перевариваемой энергии, заключенной в корме, которая становится доступной животным для использования в процессе обмена веществ [53]. Согласно [39], для ее расчета используют уравнение, в котором применяют показатели, отражающие содержание сырой клетчатки и сырого протеина.

Зерносенажная масса, полученная в одновидовых посевах пшеницы и гороха, существенно отличается по величине обменной энергии и количеству кормовых единиц (табл. 4). На основании главных эффектов разница в содержании обменной энергии в составе зерносенажной массы горохового посева составила +2.18 МДж/кг или +0.33 кг к.е./кг. Для частных различий в зависимости от уровня азотного питания величины прибавок составили +2.34 (N0), +2.17 (N30) и +2.04 (N60) МДж/кг сухого вещества корма или +0.35 (N0), +0.32 (N30) и +0.31 (N60) кг к.е./кг сухого вещества корма. В зерносенаже одновидового посева гороха количество обменной энергии не изменялось (10.3 МДж/кг) в зависимости от доз азота, в посеве яровой пшеницы отмечена тенденция к повышению содержания обменной энергии (с 7.97 до 8.12 и 8.26 МДж/кг) в полученной зерносенажной массе при увеличении уровня азотного питания.

За счет увеличения доли гороха зафиксировано более высокое содержание обменной энергии

(+1.28–1.45 МДж/кг) и кормовых единиц (+0.19–0.21 кг) относительно одновидового посева пшеницы в зерносенаже смешанного посева (пшеница 25% + горох 75%, 1-й класс) независимо от уровня азотного питания. Повышение содержания обменной энергии (8.96→9.07→9.12 МДж/кг) и количества кормовых единиц (0.66→0.67→0.68 кг/кг) при увеличении уровня азотного питания можно рассматривать только на уровне слабой тенденции к росту.

Зерносенаж, полученный в смешанных посевах, значительно отличался и превосходил по биохимическому составу и питательности корм одновидового посева яровой пшеницы. При преобладании пшеницы в составе высеваемой смеси (пшеница 75% + горох 25%) полученный зерносенаж по абсолютному большинству нормируемых показателей, согласно ГОСТ Р 58145-2018, соответствовал только 3-му классу. Исключение составил вариант с внесением N60: зерносенаж по всем показателям соответствовал более высокому 2-му классу.

При равном долевым соотношении компонентов смеси (пшеница 50% + горох 50%) получен зерносенаж, соответствующий 2-му классу. Исключение составил вариант с внесением N30: зерносенаж соответствовал только 3-му классу ввиду превышения количества сырой клетчатки (>270 г/кг) в составе корма. Дальнейшее увеличение доли гороха в составе посева до 75% определяло увеличение количества протеинового компонента и общей питательности корма. По абсолютному большинству нормируемых показателей (сырой протеин, сырая зола, количество обменной энергии и кормовых единиц) полученный зерносенаж соответствовал 1-му классу. Лимитирующим показателем для корма в данном варианте служило содержание сырой клетчатки: для отнесения корма к 1-му классу ее содержание не должно превышать 250 г/кг. Данному пороговому показателю и соответственно полному удовлетворению всей совокупности требований, предъявляемых для зерносенажа 1-го класса, согласно ГОСТ Р 58145-2018, соответствовал корм, полученный без внесения азотного удобрения.

Бобовые культуры обладают уникальной способностью в симбиозе с клубеньковыми бактериями фиксировать азот атмосферы и переводить его в доступные для растений соединения [40, 56]. Они обогащают почву азотом, действие которого проявляется в течение 2–3-х лет. За счет растительных остатков бобовых культур происходит обогащение почвы свежим органическим веществом, по химическому составу наиболее полно

удовлетворяющим условиям интенсивной гумификации и минерализации.

Накопление общего количества N в составе урожая напрямую зависело от продуктивности посевов и содержания азота в составе зерносенажа (табл. 5). В свою очередь, величины данных параметров были связаны с соотношением отдельных компонентов в составе посева и уровнем азотного питания.

В составе урожая посева с преобладанием пшеницы (пшеница 75% + горох 25%) накопление общего азота на 29.9–34.7% было обеспечено за счет бобового компонента. Увеличение доли гороха в составе высеваемых смесей до 50 и 75% способствовало наращиванию количества азота, полученного за счет гороха, до 55.4–58.3 и 63.0–67.3% соответственно. Вынос азота урожаем зерносенажной массы в одновидовом посева составил 68.1–92.6 кг/га и четко зависел от уровня азотного питания.

За счет включения гороха в состав посевов с пшеницей после уборки соответствующих посевов в почву поступало 16.0–19.5 (пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (пшеница 25% + горох 75%) кг азота/га. Большая часть общего азота ко времени уборки урожая на зерносенаж была накоплена в надземной вегетативной массе растений. Например, в вариантах со смешанными посевами соотношение между количеством азота, накопленного в урожае зерносенажа и в составе ПКО, составило 1.02–1.27. В вариантах с одновидовым посевом гороха наблюдали обратную закономерность: 0.92–0.94. В вариантах со смешанными посевами общее количество азота в составе биомассы гороха была представлено равными долями между надземной убираемой частью урожая и массой корневых систем с сопряженной с ними частью соломы.

В зависимости от урожайности и состава горохо-пшеничные смеси накапливали общего азота от 44 до 130 кг/га в вегетативной массе и 46–101 кг/га – в пожнивно-корневых остатках, суммарное содержание симбиотического азота в них было равно 20–108 кг/га. В пожнивно-корневых остатках гороха при возделывании его в составе горохо-пшеничных смесей накапливалось меньшее количество симбиотического азота – от 10.4 до 54.8 кг/га. Следует отметить, что одновидовой посев гороха по количеству общего азота значительно (на 7.4–13.8 кг/га) превосходил вариант со смесью пшеница 25% + горох 75%. По накоплению фиксированного азота воздуха данные ва-

Таблица 5. Вклад биологического азота растений гороха в азотный баланс при его возделывании в составе горохо-пшеничных смесей и одновидового посева на зерносеяж в зависимости от уровня азотного питания (среднее за 2012–2014 гг.)

Показатель	Состав посева											
	пшеница 75% + + горох 25%			пшеница 50% + + горох 50%			пшеница 25% + + горох 75%			горох 100%		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Урожайность, т/га	3.10	3.42	3.77	3.76	4.34	4.88	4.13	4.86	5.45	2.39	2.67	3.18
Выход пожнивно-корневых остатков (ПКО), т/га	3.33	3.67	4.05	4.04	4.67	5.24	4.44	5.22	5.86	2.57	2.87	3.41
в т.ч. за счет гороха	0.83	0.92	1.01	2.02	2.33	2.62	3.33	3.91	4.39			
Накопление общего N, кг/га												
В урожае	44.5	53.7	63.1	64.4	79.4	88.0	92.1	114.9	129.8	68.1	76.8	92.6
в т.ч. за счет гороха	15.5	17.1	18.9	37.6	43.4	48.8	62.0	72.9	81.8			
В составе ПКО	46.0	50.7	55.9	63.0	72.8	81.7	77.3	90.8	102	73.8	82.6	98.2
в т.ч. в ПКО гороха	16.0	17.6	19.5	38.7	44.8	50.3	63.9	75.2	84.3			
В биомассе гороха	31.5	34.7	38.3	76.3	88.2	99.1	126	148	166	142	159	191
Накопление фиксированного N, кг/га												
В биомассе гороха	20.5	22.6	24.9	49.6	57.4	64.4	81.8	96.2	108	76.3	85.8	103
в т.ч. в ПКО	10.4	11.5	12.6	25.2	29.1	32.7	41.6	48.9	54.8	32.0	35.8	42.6
Накопление органического С, кг/га												
В урожае	1400	1540	700	1690	1950	2190	1860	2190	2450	1070	1200	1430
Поступило в почву с ПКО	1540	1700	1870	1900	2200	2470	2130	2500	2810	1250	1400	1670
в т.ч. за счет гороха	406	448	495	985	1140	1280	1630	1910	2140			
Отношение С : N в составе ПКО	33.5			30.2			27.5			25.4		

рианты имели близкие показатели: 42.1–56.0 и 41.6–54.8 кг N/га соответственно.

В смешанном посеве с минимальной долей гороха (25%) величина накопления биологического азота была соразмерна внесению N_{aa} в дозе 30–35 кг/га, при равных долях компонентов смеси (50% + 50%) – соответственно 73–95 кг/га. В посеве с преобладанием гороха (пшеница 25% + горох 75%) и в его одновидовом посеве этот показатель достигал 120–160 кг/га. Указанное количество биологического азота соответствовало минимальной рекомендуемой дозе N_{aa} при возделывании яровых зерновых культур в Предуралье [41].

Учитывая, что 25% от накопленного $N_{биол}$ усваивается последующей культурой севооборота, можно рассчитать величину возможной прибавки, получаемой при возделывании яровой зерновой культуры в севообороте, где в качестве предшественника были смешанные и одновидовой посев гороха (табл. 6). При размещении в севообороте в качестве последующей культуры ярового ячменя, у которого вынос азота 1 т зерна с соответствующим количеством соломы составил

бы 29 кг, величины прибавок урожайности составят от 0.10 до 0.48 т/га. Полученные расчетные величины прибавок урожайности зерна напрямую зависели от доли гороха в составе смешанного посева, урожайности посева и условий азотного питания. Исследование [57] показало, что возделывание зернобобовых в севообороте позволяло сократить внесение азотных минеральных удобрений под основные культуры на 15–20% без ущерба для их продуктивности, а также полностью исключить их применение под зернобобовые культуры.

Ключевым критерием, наряду с содержанием общего азота, определяющим скорость разложения, последующую минерализацию и качество образующегося в почве органического вещества, является соотношение углерода к азоту (C : N). Органическую массу пожнивно-корневых остатков (ПКО) в которой содержание общего азота в расчете на абсолютно сухую массу превышало 2% (пшеница 25% + горох 75%, горох 100%), а соотношение углерода к азоту (C : N) не превышало 20, можно вносить и заделывать под любую культуру без риска проявления азотного голодания растений. Чем уже соотношение C : N и больше

Таблица 6. Расчетное количество усвоенного $N_{\text{биол}}$ и величины прибавок урожайности ярового ячменя (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Количество усвоенного $N_{\text{биол}}$, кг/га			Величина прибавок урожайности, т/га		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Пшеница 75% + горох 25%	2.6	2.9	3.2	0.09	0.10	0.11
Пшеница 50% + горох 50%	6.3	7.3	8.2	0.22	0.25	0.28
Пшеница 25% + горох 75%	10.4	12.2	13.7	0.36	0.42	0.47
Горох 100%	10.5	11.8	14.0	0.36	0.41	0.48

Таблица 7. Влияние биологического азота гороха, возделываемого в составе одновидового и смешанных посевов на урожайность последующей культуры севооборота – ячменя (среднее за 3 года), т/га

Вид предшественника (фактор А)	Дозы азота под предшественник (фактор В)			Среднее фактора А (HCP_{05} главных эффектов = 0.17)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	2.15	2.27	2.33	2.25
Пшеница 75% + горох 25%	2.48	2.39	2.47	2.43
Пшеница 50% + горох 50%	2.78	2.82	2.80	2.80
Пшеница 25% + горох 75%	2.86	2.86	2.70	2.81
Горох 100%	3.07	3.00	2.91	2.99
Среднее фактора В (HCP_{05} главных эффектов = 0.10)	2.67	2.67	2.65	
HCP_{05} частных различий фактора	А		0.29	
	В		0.22	

азота в составе ПКО, тем выше их удобрительная способность, и наоборот. Если в остающихся в поле ПКО и соломе соотношение С : N шире, чем 20, и содержание N < 2.0%, то использование такой органической массы при заправке под яровые зерновые культуры может способствовать снижению урожайности вследствие потребления запасов азота почвы микроорганизмами, поскольку скорость минерализации фитомассы снижается по мере увеличения внесенного количества ПКО и при обратной зависимости с соотношением С : N [58].

Количество поступившего в почву углерода с ПКО в большей степени зависело от урожайности зерносеменной массы. Объемы поступления > 2 т С/га зафиксированы в смешанных посевах с равными долями компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха (пшеница 25% + горох 75%) в составе высеваемой смеси. При увеличении доли гороха в посевной норме > 50% отмечено более высокое содержание азота (> 2%) в составе зерносеменной массы, за счет чего достигалось более узкое соотношение С : N = 25.4–27.5. Соотношение С : N, обусловленное прежде всего содержанием общего азота в составе фитомассы, является наиболее употребляемым показателем качества поступающих в почву рас-

тительных остатков, характеризующих их способность к разложению [59, 60]. Установлен “чистый эффект” фиксации N_2 зернобобовыми культурами в балансе азота почвы, т.е. разницу между фиксированным азотом воздуха и азотом, накопленным в зерне бобовых культур. Для гороха изменения этого показателя отмечены в достаточно широком интервале от 46 до 181 кг N/га. Было подсчитано, что вклад азота, минерализованного из остатков гороха, в средней урожайности зерна следующей культуры севооборота (пшеницы), составлял порядка 15–30% [61].

Таким образом, показано, что с помощью только биологической азотфиксации нельзя полностью восполнить вынос азота из почвы урожаями сельскохозяйственных культур и его потери от вымывания, иммобилизации и денитрификации. Однако частичная замена азота, используемого для формирования урожая и внесенного с минеральными удобрениями или минерализуемого из запасов органического вещества почвы, за счет фиксированного азота вполне возможна.

Полноценное включение смешанных посевов посевного гороха в состав севооборотов подразумевает обязательную их оценку в качестве предшественника (табл. 7). Благодаря заправке горо-

ховой соломы совместно с ПКО, отличающимися более высоким содержанием азота и других элементов минерального питания в своем составе, отмечены значительные изменения в уровне урожайности последующей культуры севооборота. В среднем за 3 года опыта прослежены схожие закономерности с результатами, полученными в отдельные годы исследования. При размещении ячменя после смешанных посевов гороха прибавка урожайности зерна составила 0.18–0.56 т/га, после одновидового посева зернобобовой культуры – 0.74 т/га.

Полученный уровень фактической прибавки урожайности ячменя несколько превышал расчетные величины за счет симбиотически фиксированного азота (табл. 6). Это можно объяснить изменением биохимического состава пшеницы в составе смешанных посевов с горохом. Изменения претерпевало не только зерно, но и вегетативная масса растений, что в последующем могло быть дополнительным источником азота в общем объеме ПКО, благодаря чему отчасти и происходило сужение соотношения С : N в составе послеуборочных остатков.

Рассматривая влияние вида предшественника на уровень урожайности ячменя, особого внимания заслуживает показатель увеличения доли гороха в составе смешанных посевов. Повышение урожайности прежде всего было связано с увеличением количества поступающих в почву ПКО с более высоким содержанием в них азота. Сопутствующими факторами были увеличение видового разнообразия в микробном сообществе сапротрофных организмов ризосферы, улучшение структурности и влагообеспеченности почвы, накопление в прикорневой зоне биогенных элементов, активно извлекаемых из почвы за счет более высокой усваивающей способности корневой системы гороха.

Вид культуры в одновидовых посевах и количественное соотношение компонентов в составе смесей, использованных в качестве предшественника, определяло степень отзывчивости посевов ярового ячменя на созданные ранее уровни азотного питания. При рассмотрении эффективности каждого из посевов с включением гороха в качестве предшественника в отдельности, необходимо выделить достаточно высокий уровень урожайности ячменя на фоне без внесения азота. Существенная прибавка урожайности (+0.33–0.92 т/га) относительно одновидового посева пшеницы на фоне N0 получена после любого из изученных смешанных посевов с участием гороха. В данных условиях отмечено планомерное развитие растений бобового компонента и их симбиотического

ризобиального аппарата, происходило выделение и последующая иммобилизация достаточного количества органических соединений за счет экзосмоса в ризосфере. При применении N30 и N60 увеличение урожайности зерна ячменя наблюдали только в вариантах с равными посевными долями культур (пшеница 50% + горох 50%) и при последующем увеличении доли гороха (до 75% и 100%) в составе смешанных посевов. Высокий уровень урожайности ячменя при внесении под предшественник N30 был получен за счет значительного увеличения продуктивности самих смешанных посевов, а также поступления ПКО. При последующем увеличении обеспеченности почвы азотом (N60) в смешанных посевах пшеница 50% + горох 50% и пшеница 25% + горох 75% наблюдали тенденцию к снижению урожайности. Это было обусловлено определенным ингибирующим действием минерального азота, которое снижало степень нодуляции и симбиотической активности азотфиксирующих микроорганизмов, инфицирующих корневую систему гороха на начальных этапах вегетации, а также замедлением развития и последующего эффективного функционирования симбиотического аппарата бобового компонента в посевах.

Эффективность азота, внесенного с удобрением под предшественник, была обусловлена его “прямым” влиянием, т.е. накоплением в почве (закреплением и последующей реминерализацией) и “косвенным” последствием, связанным с увеличением продуктивности предшествующих культур в севообороте, накоплением послеуборочных остатков, поступлением в почву органического вещества и азота, а также их соответствием классическим для этого условиям (содержание $N_{\text{общ.}} > 2\%$, отношение С : N ≤ 20 –24. Результаты проведенной оценки смешанных посевов в качестве предшественника убедительно свидетельствовали, что использование минерального азота удобрений снижало эффективность включения и последующего увеличения доли гороха в составе смешанного посева с яровой пшеницей.

ВЫВОДЫ

1. Смешанные посевы гороха и пшеницы по величине урожайности зерносенажной массы превосходили одновидовые посевы пшеницы и гороха. За счет увеличения доли гороха с 25 до 50 и 75% в составе высеваемой смеси происходило увеличение урожайности зерносенажной массы на 0.97, 2.95 и 4.04 т/га соответственно. Увеличение уровня азотного питания (N0→N30→N60)

сопровождалось изменением продуктивности посевов на 0.98 и 2.08 т/га.

2. Более высокое содержание сырого протеина в зерносенажной массе (139–149 г/кг корма), было характерно при соотношении компонентов смеси: пшеница 25% + горох 75%. Полученный корм соответствовал 1-му классу (не менее 120 г/кг).

3. Увеличение доли гороха в составе смешанных посевов способствовало снижению количества сырой клетчатки в полученной зерносенажной массе. Более низкий показатель (248 г/кг корма, 1-й класс), характерен для смешанного посева пшеница 25% + горох 75% без внесения N-удобрения. Более высоким содержанием сырого жира (20.6–27.6 г/кг) и сырой золы (27.5–49.6 г/кг) в зерносенажной массе отличались одновидовой и смешанные посевы бобовой культуры.

4. Введение смешанных посевов гороха в состав севооборотов позволяет увеличить накопление энергии и выход кормовых единиц с урожаем за счет повышения урожайности и валового сбора, увеличения общей питательности и оптимизации биохимического состава зерносенажа. Более высокое содержание обменной энергии (+1.28–1.45 МДж/кг) и кормовых единиц (+0.19–0.21 кг) получено в корме смешанного посева (пшеница 25% + горох 75%, 1-й класс).

5. В вегетативной массе смешанного посева гороха и яровой пшеницы накапливалось общего азота от 44 до 130 кг/га, в пожнивно-корневых остатках – 46–101 кг/га. Суммарное накопление в них симбиотического азота составляло 20–108 кг/га. После уборки смешанных посевов на зерносенаж в почву с почвенно-корневыми остатками (ПКО) поступало 16.0–19.5 (пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (пшеница 25% + горох 75%) кг N/га.

6. Количество поступившего в почву углерода с пожнивными и корневыми остатками в большей степени зависело от урожайности зерносенажной массы. При увеличении доли гороха в посевной норме >50%, отмечено более высокое содержание азота (>2%) в составе зерносенажной массы, за счет чего достигнуто более узкое соотношение C : N = 25.4–27.5 в составе поступающих в почву ПКО.

7. При размещении ярового ячменя в севообороте после смешанных посевов гороха на фоне N0 получена максимальная прибавка урожайности зерна (0.33–0.71 т/га). Данный факт указывал на то, что именно полноценное развитие растений гороха и их симбиотического ризобиального аппарата в большей степени влияло на продуктивность последующей культуры, нежели суммарная

продуктивность посевов и выход ПКО. Использование минерального азота удобрений снижало эффективность симбиотической азотфиксации и агрономическую ценность включения гороха в состав смешанных посевов в качестве предшественника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jensen E.S., Carlsson G., Hauggaard-Nielsen H.* Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis // *Agron. Sustain. Develop.* 2020. V. 40. № 5. Iss. 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
2. *Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Благоевещенский Г.В., Тимошенко С.М., Соболев С.В., Назарова Т.О.* Азотфиксация гороха сортов немчиновской селекции в зависимости от удобрений на дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья и вклад фиксированного азота в малый биологический круговорот // *Зернобобов. и круп. культуры.* 2019. № 2 (30). С. 27–35.
3. *Персикова Т.Ф., Почтовая Н.Л.* Эффективность смешанных посевов люпина со злаковыми культурами // *Агротех. вестн.* 2010. № 1. С. 17–19.
4. *Надежина Н.В., Соколов В.А., Мамадназарбеков А.Ф.* Эффективность ландшафтно-адаптированных технологий совместного выращивания гороха посевного безлисточкового морфотипа с зерновыми культурами в Верхневолжье // *Аграр. вестн. Верхневолжья.* 2019. № 4 (29). С. 26–39.
5. *Лапшин Ю.А.* Смешанные агрофитоценозы как резерв увеличения производства фуражного зерна и более рационального использования земельной площади // *Аграр. наука Евро-Северо-Востока.* 2017. № 3 (58). С. 36–42.
6. *Banik P., Midya A., Sarkar B.K., Ghose S.S.* Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering // *Eur. J. Agron.* 2006. V. 24. № 4. P. 325–332.
7. *Красноперов А.Г., Буянкин Н.И.* Весенне-летние смешанные посевы // *Зернобоб. и круп. культуры.* 2019. № 2 (30). С. 144–154.
8. *Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozata Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S.* The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability // *Field Crops Res.* 2011. V. 122. № 3. P. 264–272.
9. *Алешин М.А.* Влияние минеральных удобрений на взаимодействие компонентов смешанных посевов в условиях дерново-подзолистой почвы Предуралья // *Пробл. агрохим. и экол.* 2020. № 3. С. 33–38.
10. *Dahmardeh M., Ghanbari A., Syahsar B.A., Ramrodi M.* The role of intercropping maize (*Zea mays* L.) and cow-

- pea (*Vigna unguiculata* L.) on yield and soil chemical properties // *Afric. J. Agricult. Res.* 2010. V. 5 (8). P. 631–636.
11. Long L., Jianhao S., Fusuo Z., Xiaolin L., Sicun Y., Zdenko R. Wheat / maize or wheat / soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients // *Field Crops Res.* 2001. V. 71. № 2. P. 123–137.
 12. Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S. Facilitative root interactions in intercrops // *Plant and Soil.* 2005. V. 274. P. 237–250.
 13. Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M., Pansu M., Drevon J., Ounane S.M. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean – rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem // *Plant Soil Environ.* 2018. V. 64. P. 138–146.
 14. Bedoussac L., Justes E. The efficiency of a durum wheat–winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth // *Plant and Soil.* 2010. V. 330. P. 19–35.
 15. Long L., Fusuo Z. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency // *Plant and Soil.* 2003. V. 248. P. 305–312.
 16. Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 46. P. 181–190.
 17. Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability // *Eur. J. Agronomy.* 2016. V. 72. P. 80–90.
 18. Latati M., Dokukin P., Aouiche A., Rebouh N.Y., Takouachet R., Hafnaoui E., Hamdani F.Z., Bacha F., Ounane S.M. Species interactions improve above-ground biomass and land use efficiency in intercropped wheat and chickpea under low soil inputs // *Agronomy.* 2019. V. 9 (11). P. 765.
 19. Aslam M., Mahmood I.A., Peoples M.B., Schwenke G.D., Herridge D.F. Contribution of chickpea nitrogen fixation to increased wheat production and soil organic fertility in rain-fed cropping // *Biol. Fertil. Soils.* 2003. V. 38. P. 59–64.
 20. Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil // *Plant and Soil.* 2014. V. 385. P. 181–191.
 21. Latati M., Aouiche A., Tellaha S., Laribia A., Benlahrecha S., Kacia G., Ouarema F., Ounanea S.M. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions // *Eur. J. Soil Biol.* 2017. V. 80. P. 9–18.
 22. Tian Xl., Wang C., Bao Xg. Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping // *Plant and Soil.* 2019. V. 436. 173–192.
 23. Tang Xi., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche G., Placella S.A., Hinsinger P. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 75. P. 86–93.
 24. Bhim B., Ghaley H., Hauggaard-Nielsen H.J., Jensen E.S. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2005. V. 73. P. 201–212.
 25. Fenliang F., Fusuo Z., Yana S., Jianhao S., Xingguo B., Tianwen G., Li L. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems // *Plant and Soil.* 2006. V. 283. P. 275–286.
 26. Li B., Li Y-Y., Wu H.-M., Zhang F.-F., Li C.-J., Li X-X., Lambers H., Li L. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation // *Proceed. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS).* 2016. V. 113. № 23. P. 6496–6501.
 27. Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops // *Plant and Soil.* 2005. V. 266. P. 273–287.
 28. Hauggaard-Nielsen H., Jørnsgaard B., Kinane J., Jensen E.S. Grain legume–cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems, *Renewable* // *Agricult. Food Syst.* 2008. V. 23. Sp. № 1: Researching sustainable agricultural systems. P. 3–12.
 29. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003. V. 65. P. 289–300.
 30. Kurdali F., Sharabi N.E., Arslan A. Rainfed vetch–barley mixed cropping in the Syrian semi-arid conditions I. Nitrogen nutrition using ¹⁵N isotopic dilution // *Plant and Soil.* 1996. V. 183. P. 137–148.
 31. Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Correhellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems // *Field Crops Res.* 2009. V. 113. № 1. P. 64–71.
 32. Rodriguez C., Carlsson G., Englund J.-E., Flöhr A., Pelzer E., Jeuffroy M.-H., Makowski D., Jensen E.S. Grain legume–cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate

- agroecosystems. A meta-analysis // Eur. J. Agron. 2020. V. 118. P. 126077.
33. *Naudin C., Corre-Hellou G., Voisin A.-S., Oury V., Salon C., Crozat Y., Jeuffroy M.-H.* Inhibition and recovery of symbiotic N₂ fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure // Plant and Soil. 2011. V. 346. № 1. P. 275–287.
34. *Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.-H.* The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation // Field Crops Res. 2010. V. 119. № 1. P. 2–11.
35. *Ohyama T., Fujikake H., Yashima H., Tanabata S., Ishikawa S., Sato T., Nishiwaki T., Ohtake N., Sueyoshi K., Ishii S., Fujimaki S.* Effect of nitrate on nodulation and nitrogen fixation of soybean // Soybean Physiology and Biochemistry. Intech Open. P. 333–364.
36. *Li Y., Yu C., Cheng X., Li C., Sun J., Zhang F., Lambers H., Li L.* Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean / Plant and Soil. 2009. V. 323 (1/2). P. 295–308.
37. *Волошин В.А.* Каталог кормов Пермского края Пермь, 2016. 106 с.
38. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. М.: ЦИНАО, 2002. 76 с.
39. *Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожемяков А.П.* Вклад биологического азота бобовых культур в азотный баланс земледелия России. Методика определения. М.: РАСХН, 2007. 44 с.
40. *Акманаев Э.Д., Баландин Б.Н., Баландина Е.В., Волошин В.А., Елисеев С.Л., Зубарев Ю.Н., Каменских Н.Ю., Кузякин Д.В., Маслов И.Л., Медведева И.Н., Фомин Д.С., Чесноков А.В., Юдин В.С.* Инновационные технологии в агробизнесе: учеб. пособ. / Под ред. Зубарева Ю.Н., Елисеева С.Л., Ренева Е.А. М., Пермь: Пермская ГСХА, 2012. 335 с.
41. *Huňady I., Hochman M.* Potential of legume–cereal intercropping for increasing yields and yield stability for self-sufficiency with animal fodder in organic farming // Czech. J. Genet. Plant Breed. 2014. V. 50. P. 185–194.
42. *Косолапова А.И., Возжаев В.И., Лейних П.А.* Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Перм. аграр. вестн. 2017. № 3 (19). С. 76–80.
43. *Li Q.-Z., Sun J.-H., Wei X.-J., Christie P., Zhang F.-S., Li L.* Over yielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley / Plant and Soil. 2011. V. 339. P. 147–161.
44. *Мищихина О.С., Михайлова Л.А.* Биологическая эффективность смешанного посева яровой пшеницы и посевного гороха при уборке на зерно в зависимости от доз азота // Перм. аграр. вестн. 2017. № 3 (19). С. 96–101.
45. *Кононов А.С., Белоус Н.М., Ториков В.Е., Мельникова О.В., Шкотова О.Н.* Теория экологической ниши в сельском хозяйстве и методика расчета взаимодействия видов в гетерогенном агроценозе // Зернобоб. и круп. культуры. 2017. № 2 (22). С. 59–67.
46. *Getachew A., Amare G., Woldeyesus S.* Yield performance and land–use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in Ethiopian highlands // Eur. J. Agron. 2006. V. 25. № 3. P. 202–207.
47. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Метод оценки азотфиксирующей способности бобовых растений на основе симбиотических мутантов // Междуна-род. сел.-хоз. журн. 2016. № 2. С. 49–51.
48. *Saito A., Tanabata S., Tanabata T., Tajima S., Ueno M., Ishikawa S., Ohtake N., Sueyoshi K., Ohyama T.* Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* L.) Merr.) // Inter. J. Mol. Sci. 2014. V. 15 (3). P. 4464–4480.
49. *Giles E.D., Oldroyd, Murray J.D., Poole P.S., Downie J.A.* The Rules of engagement in the legume–rhizobial symbiosis // Ann. Rev. Genet. 2011. V. 45. P. 119–144.
50. *Cao Y., Halane M.K., Gassmann W., Stacey G.* The Role of plant innate immunity in the legume–rhizobium symbiosis // Ann. Rev. Plant Biol. 2017. V. 68. P. 535–561.
51. *Пасынкова Е.Н.* Динамика конкурентных отношений в потреблении азота растениями яровой пшеницы и вики, возделываемых в смешанных посевах // Аграр. наука Евро-Северо-Востока. 2010. № 2 (17). С. 28–33.
52. *Волошин В.А.* Вопросы полевого кормопроизводства в Предуралье. Пермь: Изд-во “ОТ и ДО”, 2012. 379 с.
53. *Кучин Н.Н., Мансуров А.П.* Изменение степени силосуемости и питательности многолетних бобовых трав в зависимости от фазы развития травостой и степени проявляивания // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 3 (1). С. 149–152.
54. *Алешин М.А., Михайлова Л.А.* Изменение урожайности и биохимического состава зерна полевых культур в смешанных посевах при использовании минеральных удобрений // Плодородие. 2020. № 2 (113). С. 9–13.
55. *Азаров Б.Ф., Акулов П.Г., Азаров В.Б., Соловиченко В.Д.* Вклад симбиотического азота бобовых в плодородие почв Центрального Черноземья // Достиж. науки и техн. АПК. 2008. № 9. С. 9–11.
56. *Задорин А.Д., Исаев А.П., Новиков В.М., Селихов С.Н.* Роль зернобобовых и крупяных культур в развитии устойчивого земледелия // Земледелие. 2012. № 5. С. 7–9.
57. *Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К., Иванникова Л.А., Семенов В.М.* Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разло-

- жении растительных остатков // Агрохимия. 2003. № 10. С. 3–12.
58. *Vigil M.F., Kissel D.E.* Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1991. V. 55. P. 757–761.
59. *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.
60. *Evans J., McNeill A.M., Unkovich M.J., Fettell N.A., Heenan D.P.* Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review // *Austr. J. Exp. Agric.* 2001. V. 41 (3). P. 347–359.

Efficiency of Application of Nitrogen Fertilizer in Mixed Crops of Peas and Wheat in Crop Rotation

M. A. Aleshin^{a,#} and A. A. Zavalin^b

^a *D.N. Pryanishnikov Perm State Agro-Technological University
Petropavlovskaya ul. 23, Perm 614990, Russia*

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

[#] *E-mail: matvei0704@mail.ru*

The results of a field experiment to determine the effect of nitrogen nutrition levels (N₀, N₃₀, N₆₀) on the yield of mixed agrocenoses of peas (wheat 75% + pea 25%, wheat 50% + pea 50%, wheat 25% + peas 75%) in comparison with single-species crops (spring wheat, seeded peas) are presented. The maximum yield of the grain mass (12.1 t/ha) was obtained in a mixed agrocenosis – wheat 25% + pea 75%, with the introduction of N₆₀. With an increase in the proportion of pea (25%–50%–75%), the content of crude protein increases to 139–149 g/kg (class 1) and the amount of crude fiber decreases to 248 g/kg (class 1) in the composition of the resulting feed. The accumulation of crop-root residues in the soil is determined by the productivity and composition of mixed agrocenoses and reaches 3.33–4.05–4.04–5.24–4.44–5.86 t/ha. After harvesting, the soil receives 16.0–19.5 (wheat 75% + pea 25%), 38.7–50.3 (wheat 50% + pea 50%) and 63.9–84.3 (wheat 25% + pea 75%) kg/ha of total nitrogen, while depending on the composition of agrocenoses, 20–108 kg N/ha was received due to symbiotic nitrogen fixation. With an increase in the proportion of peas in the sown mixture over 50%, a higher nitrogen content (>2%) in the composition of the grain mass and a narrower C : N ratio = 25.4–27.5 are observed. When growing spring barley in the crop rotation after mixed agrocenoses of peas, against the background of N₀, the increase in grain yield was 0.33–0.71 t/ha.

Key words: nitrogen doses, mixed agrocenoses, seeded peas, crop yield, biochemical composition, biological nitrogen, crop–root residues, C : N ratio.

УДК 631.816:631.454:635.1/.8

ЗНАЧЕНИЕ ТОЧНОЙ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ОВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2021 г. А. И. Иванов^{1,*}, Ж. А. Иванова¹, А. А. Конашенков²

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп. 14, Россия

² Федеральный исследовательский центр РАН – Санкт-Петербургский Северо-Западный центр
междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, шоссе Подбельского, 7, лит. А. Россия

*E-mail: office@agrophys.ru

Поступила в редакцию 10.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Проанализированы данные ландшафтного и модельно-полевого опытов на контрастной по свойствам почвенной структуре с использованием в овощных севооборотах 3-х вариантов минеральной и органо-минеральной систем удобрения: широко применяемой зональной, точной на основе предварительного прецизионного окультуривания почвы и точной с ежегодным дифференцированным внесением мелиорантов и удобрений. Установлены параметры оптимизации свойств почвы и агрономической эффективности, а также ряды чувствительности овощных культур и отдельных показателей качества продукции к почвенным условиям и точным системам удобрения. Обеспечив выраженную оптимизацию и выравнивание (в среднем на 63%) комплекса важнейших агропроизводственных свойств почвы, система удобрения на основе точного окультуривания превзошла по продуктивности овощного севооборота зональную в органо-минеральном исполнении на 14, в минеральном – на 41, по ее пространственной вариабельности – на 44 и 61%, по уровню накопления питательных веществ и витаминов – на 3–16, по снижению содержания нитратов – на 6 и разнокачественности продукции – на 44%.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, свойства почвы, точные системы удобрения, овощной севооборот, продуктивность, качество продукции, вариабельность.

DOI: 10.31857/S0002188121110077

ВВЕДЕНИЕ

В силу специфики биохимического состава овощной продукции особенное место в производстве продуктов питания занимает овощеводство, способное генерировать продукты функционального качества [1–3].

Управление производственным процессом овощных культур в агрофитоценозах базируется на оптимизации факторов их жизни приемами агротехники [1, 4–6]. Базовым приемом оптимизации условий питания является система удобрения, основанная на учете физиологических потребностей сельскохозяйственных культур и сортов в конкретных почвенно-климатических условиях [4, 6–8]. Последние, как известно, характеризуются значительной пространственной и временной изменчивостью, в том числе и внутри отдельных производственных полей [9–11]. Основными факторами формирования такой пест-

роты чаще выступают выраженный рельеф поверхности [12–14], неоднородность почвообразующих пород ледникового происхождения [15–17] и нарушения технических требований к качеству применения химических мелиорантов и удобрений [16, 18–20].

Одним из важных путей повышения отдачи от применения удобрений в таких условиях является внедрение точных систем удобрения, основанных на учете мелкомасштабной гетерогенности свойств почвы [21–23]. И хотя достижение значимого агроэкономического эффекта от них отнюдь не гарантировано [23–25], овощные севообороты представляют собой один из самых перспективных объектов их внедрения. Прежде всего это связано с такими факторами как высокая отзывчивость этих культур на применение удобрений [7, 8] и относительная оцененность товарной продукции на продовольственном рынке, сулящая окупаемость весьма затратных прецизион-

Таблица 1. Исходные свойства почв опытов

Свойство почвы	Статистические параметры свойств в опытах							
	ландшафтный опыт				модельно-полевой опыт			
	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$
Физическая глина, %	6.3	32.1	18.3	63	4.8	32.5	18.1	60
$m_{\text{об.}}, \text{г/см}^3$	1.19	1.41	1.32	7	1.16	1.44	1.32	7
НВ, %	12.2	36.9	23.8	45	8.9	39.4	24.4	45
$\text{pH}_{\text{КСЛ}}$	4.78	5.86	5.13	10	4.34	6.35	5.40	14
$H_{\text{г}}, \text{смоль(экв)/кг}$	1.22	4.03	2.59	44	0.87	4.20	2.01	56
$S, \text{смоль(экв)/кг}$	2.00	7.80	4.35	64	3.61	16.3	7.49	69
$C_{\text{орг}}, \%$	1.03	2.25	1.50	36	0.92	2.50	1.72	39
$N_{\text{лг}}, \text{мг/кг}$	65	99	81	19	32	101	67	45
$P_2O_{5\text{подв}}, \text{мг/кг}$	216	315	245	19	125	550	391	34
$K_2O_{\text{подв}}, \text{мг/кг}$	38	184	104	59	22	370	208	64

ных технологий [22]. Это нашло свое подтверждение и в результатах выполненного ранее комплексного исследования [26]. Одной из его целей в агроэкологическом аспекте была сравнительная оценка воздействия различных вариантов точной системы удобрения на качественные показатели товарной продукции овощного севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в опорном пункте АФИ, КХ “Прометей” Гдовского р-на Псковской обл., на базе стационарных ландшафтного и модельно-полевого опытов. Их закладке в 2007 г. предшествовало прецизионное обследование агроландшафта пологоволнистой озерно-ледниковой равнины площадью 42 га [16]. Структура его почвенного покрова представляла собой литогенную мозаику полугидроморфных дерново-слабоподзолистых почв, сформированных на морене разной мощности от песчаного до среднесуглинистого гранулометрического состава.

Ландшафтный опыт был заложен по оригинальной методике [22] в пределах трансекты, пересекающей доминирующие в нем агромикрорландшафты (АМЛ): элювиальные (АМЛ 1 и АМЛ 2) – на возвышенных элементах с песчаными и супесчаными, элювиально-аккумулятивные (АМЛ 3 и АМЛ 4) – в микро- и мезопонижениях с легко- и среднесуглинистыми разновидностями почв (табл. 1). В каждом из 4-х АМЛ был заложен мелкоделяночный полевой опыт площадью 336 м² (12 × 28 м). Делянка в опыте имела общую площадь 21 м² и учетную площадь – 11.2 м² при систематическом размещении в трехкратной повторности.

В модельно-полевом опыте мелкомасштабную неоднородность почвенного покрова агроландшафта моделировали искусственно набором из 8 полиэтиленовых сосудов без дна площадью 1 м² в четырехкратной повторности. В них была сформирована верхняя часть профиля (горизонты $A_{\text{пах}}$ – 0–22 см и $A2B$ – 22–40 см) дерново-подзолистой почвы разного гранулометрического состава (песчаного, супесчаного, легко- и среднесуглинистого) и уровня окультуренности (слабого и хорошего). В целом пространственная неоднородность почв в опытах была весьма характерной для Нечерноземной зоны и оценивалась средней величиной коэффициента вариации представленных в табл. 1 свойств (37 и 44%).

В ландшафтном опыте был развернут овощной севооборот однолетние травы–картофель–свекла столовая–капуста белокочанная–морковь столовая, в модельно-полевом – редька черная–картофель–свекла столовая–капуста белокочанная–морковь столовая. В посевах и посадках их представляли сорта и гибриды: однолетние травы – овес сорта Скакун и вика посевная сорта Немчиновская Юбилейная, редька черная сорта Зимняя черная, картофель сорта Невский, свекла столовая сорта Бикорес, капуста белокочанная сорта Куизор F₁, морковь столовая сорта Нарбонне F₁.

Схемы обоих опытов двухфакторные. В вариантах фактора А (ландшафтно-экологические и почвенные условия) в ландшафтном опыте изучали 4 варианта агромикрорландшафтов, в модельно-полевом опыте – 8 вариантов почвенных разновидностей, отличавшихся гранулометрическим составом и уровнем окультуренности. Фактор В (система удобрения) в обоих опытах форми-

Таблица 2. Дозы мелиорантов и удобрений для точного окультуривания

Вид удобрения	Доза мелиоранта или удобрения							
	ландшафтный опыт				модельно-полевой опыт			
	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$
Известняковая мука, т/га	0	12.0	4.4	120	0	20.0	6.6	107
Торф низинный, т/га	65	375	134	70	0	900	391	77
Фосфоритная мука, кг д.в./га	—	—	—	—	0	750	94	283
Калий сернокислый, кг д.в./га	0	648	291	69	0	1710	395	153

ровался 4-мя вариантами: контроль – без удобрений, зональная система удобрения (ЗСУ), точная система удобрения 1 (ТСУ-1) на основе предварительного точного окультуривания почвы и последующего равномерного внесения удобрений, точная система удобрения 2 (ТСУ-2) с использованием ежегодного дифференцированного применения удобрений. В ландшафтном опыте изучали минеральную, в модельно-полевом – органико-минеральную систему удобрения (табл. 2).

В варианте ЗСУ дозы удобрений для всей структуры почвенного покрова были едиными, зависящими от средневзвешенных показателей почвы и планируемой урожайности и в ландшафтном опыте составили: под однолетние травы – N90P4K50, под картофель – N140P17K100, под свеклу столовую, капусту белокочанную и морковь столовую – N130P27K125. В модельно-полевом опыте их уровень достиг: под редьку черную – известь 4.5 т/га + N95P20K125, под картофель – навоз 45 т/га + N100P30K90, под свеклу столовую – N130P50K150, под капусту белокочанную – известь 2.1 т/га + навоз 50 т/га + N120P10K90, под морковь столовую – N100P40K130.

В варианте ТСУ-1 при закладке опыта было проведено прецизионное (с учетом свойств каждой почвенной разновидности) окультуривание с применением дифференцированных доз известняковой муки, низинного торфа, фосфоритной муки и сульфата калия (табл. 2). В последующем расчет доз удобрений выполняли на принципах варианта ЗСУ с учетом изменившихся свойств почвенной структуры. Фактический уровень доз составил в ландшафтном опыте: под однолетние травы – N70P10K30, под картофель – N120P20K100, под свеклу столовую, капусту белокочанную и морковь столовую – N100P30K120; в модельно-полевом опыте: под редьку черную – N70K60, под картофель – навоз 45 т/га + N80K100, под свеклу столовую – N100P30K130, под капусту белокочанную – навоз 50 т/га + N100P10K70, под морковь столовую – N100P10K120.

В варианте ТСУ-2 средний уровень доз был идентичен варианту ЗСУ, но они дифференцировались по почвенным разностям в ландшафтном опыте: под однолетние травы – N70–110P0–10K30–80, под картофель – N120–150P0–40K80–140, под свеклу столовую – N110–150P0–90K90–190, под капусту белокочанную и морковь столовую – N110–150P0–60K120–190; в модельно-полевом опыте: под редьку черную – известь 0–12 т/га + N70–110P0–90K60–200, под картофель – навоз 30–65 т/га + N80–110P0–110K70–150, под свеклу столовую – N90–170P0–150K80–240, под капусту белокочанную – известь 2.1 т/га + навоз, 30–70 т/га + N110–135P0–60K40–120 и под морковь столовую – N85–115P10–90K70–200.

В опытах использовали кондиционные партии известняковой муки, аммиачной селитры, азофоски, фосфоритной муки, суперфосфата двойного, калия сернокислого, калия хлористого, а также местные удобрения: торф низинный (влажность 65%, зольность 24%, рН_{H₂O} 6.1, содержание N – 1.05, P₂O₅ – 0.07, K₂O – 0.04%), навоз свиной подстилочный полуперепревший (влажность 72–75%, рН_{H₂O} 6.4–6.8, содержание N – 0.45–0.49, P₂O₅ – 0.15–0.20, K₂O – 0.24–0.29%).

Образцы основной и побочной продукции отбирали в ходе проведения учетов сплошным весовым методом в трехкратной повторности. Их химико-аналитическое исследование было выполнено в аккредитованной испытательной лаборатории АФИ с использованием стандартизированных методик: содержание общего азота, фосфор и калия – из одной навески после мокрого озоления по Гинзбург–Щегловой–Вульфийус, сырого протеина – расчетным методом от общего азота, крахмал и простые сахара – поляриметрическим методом по Эверсу, нитраты – ионометрическим методом по ГОСТ 29270-95, витамин С – триметрическим методом по ГОСТ 24556-89, каротин – хроматографическим методом по ГОСТ 54635–2011.

Статистическая обработка результатов исследования выполнена дисперсионным методом с

использованием программы Statistica 7.0 ("Stat Soft, Inc." США). Основными оценочными характеристиками при этом служили: средняя (m_{med}), минимальная (m_{min}) и максимальная (m_{max}) величина оцениваемого показателя и коэффициент вариации (Cv , %). Достоверность различий оценивали на 95%-ном уровне значимости по критерию Фишера.

Погодно-климатические условия региона проведения исследования весьма благоприятны для эффективного применения практически всех видов удобрений и мелиорантов [6, 27]. При средних за годы исследования параметрах среднесуточной температуры в 14.9°C их варьирование находилось в пределах от 13.5°C в 2008 г. до 16.0°C – в 2010 г. при коэффициенте вариации 6%. Средняя влагообеспеченность вегетационного периода составила 348 мм при варьировании от 257 мм в засушливом 2007 г. до 418 мм – в избыточно влажном 2008 г. и коэффициенте вариации по годам в 17%. Погодные условия 2007 г. оказались одними из самых засушливых за предшествующее 30-летие. В первой половине вегетации 2008 г. они были весьма благоприятны, а во второй – непоправимый ущерб урожаю нанесли обильные затяжные дожди. Остальные годы отличались повышенной теплообеспеченностью (особенно жаркий 2010 г.) и близкими к средним многолетним нормам выпадения осадков. Однако вариабельность их распределения по отдельным месяцам и декадам на уровне в 28–44% создавала разный уровень дискомфорта для отдельных культур севооборота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень изученных в экспериментах доз мелиорантов и удобрений, особенно в модельно-полевом опыте с его органо-минеральными системами удобрения практически гарантировал оптимизацию комплекса свойств и режимов Апах контрастной почвенной структуры и, как следствие, активизацию продукционного процесса. Параметры улучшения исходных свойств почвы определялись видом и дозами удобрений, вариантом их распределения по площади и балансом элементов питания. Наиболее значимые позитивные изменения закономерно отвечали варианту с предварительным прецизионным окультуриванием почвы. На его фоне в обоих опытах регистрировали улучшение не только физико- и агрохимических свойств (повышение pH_{KCl} на 0.51 и 1.29 ед., содержания легкогидролизуемого азота – на 28 и 60, подвижных фосфатов – на 26 и 101, подвижного калия – на 56 и 132 мг/кг соответственно), но и весьма консервативных агро-

физических кондиций (увеличение доли физической глины на 0.8 и 1.5%, макроструктурных агрегатов – на 8 и 11%, уменьшение средней плотности почвы до 1.24 и 1.11 г/см³ соответственно). В вариантах ЗСУ и ТСУ-2 существенными изменениями были затронуты только агрохимические свойства, а в модельно-полевом опыте – и физико-химические свойства почвы. С учетом равенства доз удобрений в целом по почвенной структуре эти изменения в данном случае не имели значительных отличий по абсолютным показателям и заключались в увеличении (относительно контроля) pH_{KCl} на 1.13–1.24 ед., суммы обменных оснований – на 2.00–2.25 смоль(экв)/кг, содержания органического вещества – на 0.68–0.71%, легкогидролизуемого азота, подвижных форм фосфора и калия на 20–22, 24–56 и 37–61 мг/кг соответственно. Тем не менее, преимущество точной системы удобрения выражалось в заметном уменьшении пространственной гетерогенности агрохимических свойств почвы в среднем в 2-х опытах с 41% в контроле, до 28, 15 и 22% в вариантах ЗСУ, ТСУ-1 и ТСУ-2 соответственно.

Изученные в модельно-полевом опыте варианты органо-минеральной точной системы удобрения в овощном севообороте характеризовались ощутимо повышенной агрономической эффективностью (рис. 1). Например, в вариантах опыта с одинаковыми дозами удобрений прибавка продуктивности севооборота на фоне ЗСУ составила 95, на фоне ТСУ-2 – 115% к контролю при окупаемости 1 кг NPK – 9.9 и 12.0 зерновых единиц (з.е.) соответственно. На фоне точного окультуривания варианта ТСУ-1 прибавка продуктивности севооборота за ротацию возрастала до 122%, но окупаемость 1 кг NPK снижалась до 3.9 з.е. Однако без учета затрат на предварительное окультуривание почвы она составляла 14.8 з.е. При этом вариабельность продуктивности севооборота по элементарным контурам структуры почвенного покрова уменьшилась с 32 в контроле до 16% в варианте ЗСУ и 9% в вариантах ТСУ-1 и ТСУ-2. Таким образом, превосходство точной органо-минеральной системы удобрения над зональной по показателю продуктивности севооборота достигло 10–14% и его пространственной вариабельности – 44%.

Продуктивность культур овощного севооборота в ландшафтном опыте оказалась в 1.9 раза меньше, чем в модельно-полевом (рис. 2), что было связано с существенной разницей в уровне эффективного плодородия почвы и ограниченными возможностями в регулировании ее водного режима. Отдача от минеральной системы удобрения в этом случае оказалась ожидаемо меньше.

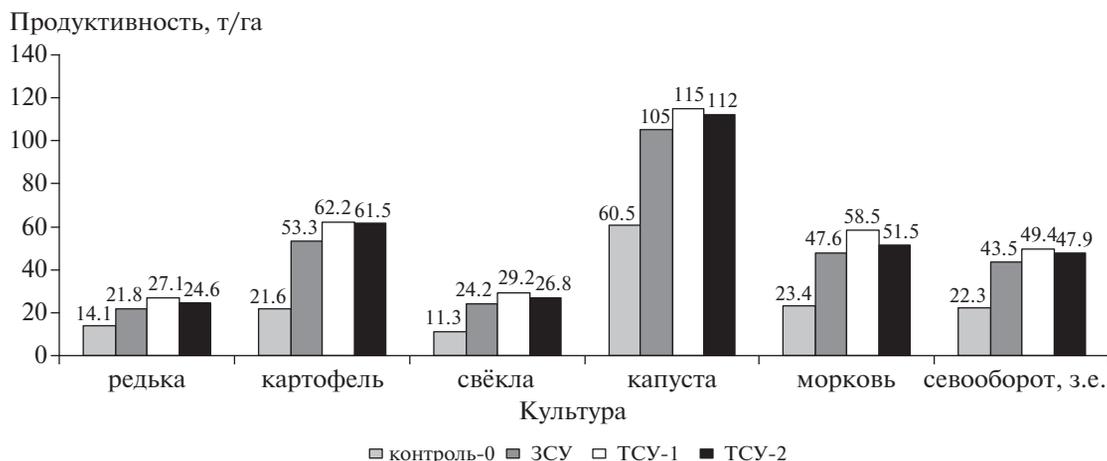


Рис. 1. Влияние систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборота в модельно-поле-вом опыте (HSP_{05} : редька – 1.3, картофель – 2.6, свекла – 1.6, капуста – 4.4, морковь – 1.6, севооборот – 2.1 т/га).

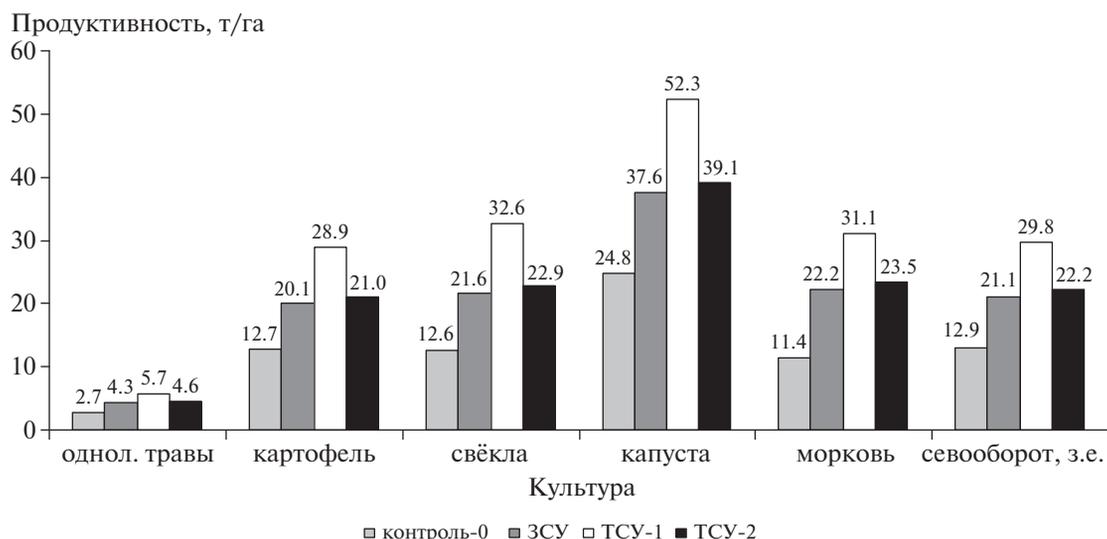


Рис. 2. Влияние систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборота в ландшафтном опыте (HSP_{05} : однолетние травы – 0.4, картофель – 1.7, свекла – 1.8, капуста – 3.5, морковь – 3.5, севооборот – 2.7 т/га).

Уровень прибавок продуктивности севооборота в весьма неблагоприятных агрофизических условиях в ЗСУ и ТСУ-2 достиг 64–72% и практически не зависел от технологии внесения удобрений. Напротив, отдача от прецизионного окультуривания в варианте ТСУ-1 составила 131% к контролю и 41% – к ЗСУ. Коэффициент вариации продуктивности севооборота снизился с 33–37% в контроле и ЗСУ до 23 и 13% – в ТСУ-2 и ТСУ-1 соответственно.

Исходя из специфики питания и восприимчивости к изменению агроэкологических условий произрастания под действием изученных вариантов применения удобрений в среднем в 2-х опы-

тах сформировался следующий убывающий ряд отзывчивости относительной прибавкой урожайности на точное окультуривание и систему удобрения в ТСУ-1: морковь столовая (162%) ≥ свекла столовая (159%) ≥ картофель (158%) > однолетние травы (111%) > капуста белокочанная (101%) > редька черная (92%). Аналогичный ряд отзывчивости на дифференцированное внесение удобрений в ТСУ-2 принял вид: картофель (125%) > морковь столовая (113%) ≥ свекла столовая (110%) > капуста белокочанная и редька черная (72%) ≥ однолетние травы (70%). При оценке отзывчивости культур на точные системы удобрения в зависимости от уровня снижения простран-

ственного коэффициента вариации урожайности лидирующую позицию заняли наиболее требовательные к плодородию почвы свекла столовая и капуста белокочанная.

Относительно влияния изученных вариантов системы удобрения на качественный состав растительной продукции, полученная информация не столь однозначна. Поскольку химический состав растений весьма жестко контролируется на генетическом уровне, его изменения под влиянием исходных свойств почвы и удобрений (в отличие от урожайности) не всегда были статистически достоверными (табл. 3, 4), а пространственная вариабельность (16%) существенно меньше, чем у почвы. Оценка влияния на качество продукции изученных почвенно-экологических условий показала, что исходные свойства почвы влияли на них более значимо, чем специфика положения в агроландшафте. Средняя величина пространственного коэффициента вариации показателей качества в контрольном варианте ландшафтного опыта составила 14%, тогда как в модельно-полевом – 17%. Наиболее чувствительным к почвенным условиям по показателю вариабельности оказалось содержание витаминов (27%), калия (25%) и нитратов (23%).

Вследствие оптимизации питательного режима перевод дерново-подзолистой почвы из слабо-в хорошо окультуренное состояние в модельно-полевом опыте увеличил в среднем в зависимости от культуры содержание сырого протеина в овощной продукции на 15% (с 7.0 до 8.1%), калия – на 43% (с 1.35 до 1.93%), витаминов – на 25% (с 44 до 55 мг/кг), нитратов – на 31% (со 138 до 193 мг/кг). На легких (песчаных и супесчаных) почвах в сравнении со средними (легко- и среднесуглинистыми) почвами товарная продукция отличалась повышенным на 8–9 отн.% содержанием сухого вещества и сахаров и, напротив, пониженным на 28 и 15 отн.% – калия и нитратов соответственно.

Характер влияния изученных в опытах систем удобрения на качество овощной продукции имел во многом похожие на описанные выше закономерности, но при этом для отдельных показателей обнаружилось влияние биологических особенностей видов растений и специфики варианта системы удобрения. По чувствительности, выраженной относительно отклонением от параметра контрольного варианта, изученные в опыте показатели качества продукции сформировали убывающий ряд: содержание витаминов ($\uparrow 46\%$) > нитратов ($\uparrow 42\%$) > калия ($\uparrow 27\%$) > сырого протеина ($\uparrow 18\%$) > фосфора ($\uparrow 8\%$) > сухого вещества ($\downarrow 5\%$) > сахаров ($\downarrow \uparrow 3\%$).

Аналогичные убывающие ряды отзывчивости овощных культур на применение систем удобрения по относительному приросту достоверно реагирующих качественных показателей приняли следующий вид:

– содержание витаминов: морковь столовая (62%) > редька черная (50%) > свекла столовая (45%) > картофель (43%) > капуста белокочанная (38%);

– содержание нитратов: картофель (76%) > свекла столовая (52%) > редька черная (32%) > морковь столовая (25%) > капуста белокочанная (20%);

– содержание калия: редька черная (39%) > картофель (33%) \geq морковь столовая (32%) > капуста белокочанная (26%) > свекла столовая (20%);

– содержание сырого протеина: картофель (26%) > редька черная (23%) > свекла столовая (15%) \geq морковь столовая (14%) \geq капуста белокочанная (13%).

При этом определенную роль в формировании этих рядов играли и погодно-климатические условия. Например, лидирующая позиция в накоплении нитратов в клубнях под действием удобрений занята картофелем во многом благодаря неблагоприятной дождливой и прохладной погоде в процессе их формирования в 2008 г. Напротив, скромное в этом отношении положение капусты белокочанной и моркови столовой было отчасти обеспечено засушливой погодой в 2010 и 2011 гг. Позиция же в этом ряду свеклы столовой, склонной к накоплению нитратов [7, 28], выглядит вполне закономерной.

Оптимизируя почвенные режимы применением мелиорантов и удобрений, удалось снизить коэффициент вариации изученных качественных показателей в среднем в опытах в варианте ЗСУ на 25 отн.% (с 16 до 12%) и в вариантах ТСУ-1 и ТСУ-2 – на 44 отн.% (до 9%). При оценке отзывчивости овощных культур севооборотов по относительному уровню снижения этого показателя они сформировали убывающий ряд: морковь столовая (51%) > капуста белокочанная (42%) > свекла столовая (37%) \geq картофель (36%) > редька черная (33%).

Сравнительная оценка минеральной (в ландшафтном опыте) и органо-минеральной (в модельно-полевом опыте) систем удобрения показала весьма схожий характер влияния на качество овощной продукции. Тем не менее, существенная разница между ними проявилась в уровне снижения содержания сухого вещества (от недо-

Таблица 3. Влияние систем удобрения на качественный состав товарной продукции культур овощного севооборота в модельно-полевом опыте

Вариант опыта	Статистические показатели качества видов продукции													
	сухое вещество		сахара*		сырой протеин,		P ₂ O ₅ , % с.в.		K ₂ O, % с.в.		витамины**		NO ₃ ⁻	
	%				% сухого вещества						мг/кг			
	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %
Редька черная (корнеплоды)														
Контроль	11.9	6	4.5	13	7.1	13	0.66	11	1.73	25	105	37	79	41
ЗСУ	11.5	7	4.5	11	8.3	4	0.70	10	2.16	18	147	41	104	29
ТСУ-1	11.8	7	4.8	10	9.0	6	0.73	9	2.75	9	173	31	100	27
ТСУ-2	11.5	9	4.6	10	8.8	6	0.69	5	2.33	15	153	32	109	33
HCP ₀₅	0.2		F _φ < F ₀₅		0.6		0.03		0.29		20		9	
Картофель (клубни)														
Контроль	25.2	5	13.3	6	3.5	17	0.51	12	1.24	37	38	32	83	37
ЗСУ	24.7	3	12.8	6	3.9	11	0.53	6	1.54	25	47	27	195	24
ТСУ-1	25.1	3	13.4	4	4.3	7	0.56	4	1.70	18	55	15	182	17
ТСУ-2	25.1	3	13.1	6	4.1	8	0.53	7	1.72	18	58	18	171	14
HCP ₀₅	F _φ < F ₀₅		0.4		0.2		0.02		0.24		5		17	
Свекла столовая (корнеплоды)														
Контроль	17.8	6	10.5	9	8.0	9	0.47	10	1.90	24	62	14	227	27
ЗСУ	17.2	6	10.2	7	8.8	9	0.49	7	2.21	19	83	11	430	15
ТСУ-1	17.6	5	10.6	7	9.2	11	0.53	6	2.40	13	99	7	358	13
ТСУ-2	17.4	6	10.3	7	8.9	8	0.50	7	2.25	15	89	10	401	11
HCP ₀₅	0.2		0.3		0.5		0.02		0.19		7		40	
Капуста белокочанная (кочаны)														
Контроль	11.6	8	7.0	13	11.1	9	0.45	15	1.64	31	560	24	267	23
ЗСУ	11.5	5	7.1	4	12.6	6	0.49	11	2.08	19	658	16	336	16
ТСУ-1	12.1	4	7.5	4	12.8	3	0.51	8	2.30	9	789	7	316	15
ТСУ-2	11.6	6	7.1	6	12.5	4	0.50	10	2.20	5	741	7	328	18
HCP ₀₅	F _φ < F ₀₅		F _φ < F ₀₅		0.4		0.03		0.30		67		29	
Морковь столовая (корнеплоды)														
Контроль	15.2	6	8.9	9	7.9	9	0.65	7	1.69	22	82	10	172	23
ЗСУ	14.7	5	8.7	6	8.9	5	0.68	5	2.08	12	89	6	234	17
ТСУ-1	15.2	3	9.1	6	9.1	5	0.70	4	2.31	7	92	2	205	18
ТСУ-2	14.9	3	8.8	6	8.8	4	0.68	3	2.11	10	91	4	222	24
HCP ₀₅	0.3		0.3		0.3		0.02		0.19		4		23	

*В клубнях картофеля – крахмал, в остальной продукции – простые сахара.

**В корнеплодах моркови – каротин, в остальной продукции – витамин С.

стоверных 0.2% при органо-минеральной до 2.3% – при минеральной системе удобрения).

Зональная система удобрения снизила в среднем содержание в овощной продукции сухого вещества на 5% (с 17.7 до 16.8%), сахаров и крахмала – на 3% (с 9.8 до 9.5%) и, напротив, повысила содержание сырого протеина на 13% (с 7.9 до 8.9%), фосфора – на 6% (с 0.54 до 0.57%), калия – на 22% (с 1.72 до 2.09%), витаминов – на 30% (со 170 до

221 мг/кг) и нитратов – на 42% (со 184 до 261%). Дифференцированное внесение равных доз удобрений и мелиорантов в варианте ТСУ-2 не обеспечило существенного улучшения качества продукции. Ожидаемые положительные эффекты, в том числе относительно снижения содержания нитратов, чаще носили форму тенденции. Однако ее бесспорное превосходство в снижении пространственной вариабельности качества продук-

Таблица 4. Влияние систем удобрения на качественный состав товарной продукции культур овощного севооборота в ландшафтном опыте

Вариант	Статистические показатели качества видов продукции													
	сухое вещество		сахара*		сырой протеин		P ₂ O ₅		K ₂ O		витамины**		NO ₃ ⁻	
	%				% с.в.						мг/кг			
	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> _{med}	<i>Cv</i> , %
Однолетние травы (зеленая масса)														
Контроль	31.7	7	3.8	5	12.5	5	0.65	9	1.56	26	29	11	114	19
ЗСУ	26.5	5	4.5	8	14.4	6	0.71	5	1.76	24	40	12	173	8
ТСУ-1	27.1	7	4.6	7	15.0	3	0.71	4	1.88	17	43	11	155	15
ТСУ-2	27.3	4	4.6	5	14.9	4	0.72	4	1.67	14	43	3	168	9
HCP ₀₅	1.8		0.2		0.9		0.03		$F_{\phi} < F_{05}$		6		26	
Картофель (клубни)														
Контроль	27.0	9	14.9	14	3.8	7	0.54	5	1.36	21	31	26	79	15
ЗСУ	25.6	7	13.8	13	5.4	5	0.58	11	1.73	18	38	19	110	18
ТСУ-1	26.5	5	14.6	9	4.7	5	0.59	8	2.03	2	47	7	95	15
ТСУ-2	25.7	5	13.9	14	5.3	2	0.57	11	1.68	14	42	12	109	13
HCP ₀₅	$F_{\phi} < F_{05}$		0.7		0.4		$F_{\phi} < F_{05}$		0.25		3		14	
Свекла столовая (корнеплоды)														
Контроль	22.0	8	10.7	14	8.3	12	0.57	8	1.76	27	66	42	267	14
ЗСУ	19.1	7	10.2	7	9.6	10	0.62	7	1.95	21	88	34	356	17
ТСУ-1	20.6	3	10.8	2	10.5	4	0.65	3	2.36	9	103	5	323	17
ТСУ-2	19.0	5	10.2	7	9.4	7	0.60	3	1.97	14	92	20	346	11
HCP ₀₅	1.6		$F_{\phi} < F_{05}$		1.0		0.04		0.25		20		38	
Капуста белокочанная (кочаны)														
Контроль	12.3	5	7.6	8	12.9	5	0.48	8	2.21	18	542	28	370	13
ЗСУ	11.6	4	7.2	6	14.0	4	0.50	8	2.51	16	748	18	445	13
ТСУ-1	11.8	5	7.6	1	14.6	2	0.53	3	2.71	13	860	16	434	9
ТСУ-2	11.5	4	7.5	5	14.3	4	0.50	4	2.52	12	746	11	432	10
HCP ₀₅	$F_{\phi} < F_{05}$		$F_{\phi} < F_{05}$		0.5		$F_{\phi} < F_{05}$		0.16		150		40	
Морковь столовая (корнеплоды)														
Контроль	16.2	4	11.1	5	8.1	6	0.54	6	1.94	18	43	49	113	15
ЗСУ	15.3	5	10.7	6	9.0	5	0.58	4	2.52	7	88	11	142	12
ТСУ-1	15.9	5	11.3	6	9.5	1	0.61	6	2.67	7	98	5	135	16
ТСУ-2	15.5	7	10.8	4	9.1	4	0.58	2	2.61	5	89	6	135	5
HCP ₀₅	0.5		$F_{\phi} < F_{05}$		0.5		0.04		0.3		18		16	

*В клубнях картофеля – крахмал, в остальной продукции – простые сахара.

**В зеленой массе однолетних трав и корнеплодах моркови – каротин, в остальной продукции – витамин С.

ции на 25 отн.% имеет важное экологическое значение. Как показали наши более ранние исследования [19], значительная неоднородность партии картофеля по содержанию нитратов зачастую формируется за счет клубней с превышением МДУ нитратов, полученных в очагах переудобрения азотом посевов. А такая ситуация при использовании точной системы удобрения маловероятна.

Овощная продукция с лучшими качественными показателями была получена в варианте ТСУ-1 с предварительным точным окультуриванием почвы и последующим равномерным внесением органических и сниженных доз минеральных удобрений. В целом лучшую склонность к накоплению питательных веществ проявляла корне- и клубнеплодная продукция. За счет комплексной оптимизации свойств и режимов дерново-подзо-

листой почвы относительно варианта ЗСУ в этом случае удалось незначительно повысить содержание сухого вещества на 5% (с 16.8 до 17.4%), сахаров – на 3% (с 9.5 до 10.0%), сырого протеина на 4% (с 8.9 до 9.3%) и фосфора – на 5% (с 0.57 до 0.60%), более значимо – калия на 13% (с 2.09 до 2.36%) и витаминов – на 16% (с 221 до 257 мг/кг). Вследствие сокращения на 17–21% доз азотных удобрений в этом варианте удалось хоть и незначительно (на 6%), но все же снизить среднее содержание в товарной продукции нитратов с 261 до 245 мг/кг. Это в сочетании с сокращением пространственной дифференциации привело к существенному сокращению рисков загрязнения продукции нитратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На контрастной по агрофизическим и агрохимическим свойствам структуре почвенного покрова в форме литогенной мозаики полугидроморфных дерново-подзолистых почв разной степени окультуренности использованные варианты точной системы удобрения (с предварительным точным окультуриванием почвы и ежегодным дозированием с учетом мелкомасштабной неоднородности свойств почвы) обеспечили выраженное преимущество над показателями традиционной зональной системы удобрения по агрономической и экологической эффективности. Их уровень определялся спецификой почвенных условий и системой удобрения, технологией их применения, а также биологическими особенностями культур овощных севооборотов и отдельных оцениваемых показателей. Превосходство в продуктивности севооборота системы на основе прецизионного внесения удобрений достигло 5–10%, а точного окультуривания – 14–41% при снижении ее пространственной variability на 44–51%.

По чувствительности качества продукции к применению удобрений овощные культуры сформировали убывающий ряд: морковь столовая (51%) > капуста белокочанная (42%) > свекла столовая (37%) ≥ картофель (36%) > редька черная (33%), а показатели качества овощной продукции – такой убывающий ряд: содержание витаминов (↑46%) > нитратов (↑42%) > калия (↑27%) > сырого протеина (↑18%) > фосфора (↑8%) > сухого вещества (↓5%) > сахаров (↓↑3%).

Обеспечив выраженную оптимизацию и выравнивание (в среднем на 63%) комплекса важнейших агропроизводственных свойств почвы, система удобрения на основе точного окультуривания превзошла по продуктивности овощного севооборота зональную в органо-минеральном исполнении на 14%, в минеральном – на 41%, по

ее пространственной variability – на 44 и 61%, по уровню накопления питательных веществ и витаминов – на 3–16%, по снижению содержания нитратов – на 6% и разнокачественности продукции – на 44%.

Точная органо-минеральная система удобрения на основе ежегодного дифференцированного их внесения превзошла зональную по уровню продуктивности на 10%, пространственной variability урожайности и качества продукции – на 44%, незначительно улучшив ряд показателей накопления питательных веществ в отдельных культурах и сократив риски избыточного накопления нитратов.

Таким образом, даже в непростых современных условиях в овощных севооборотах на контрастных по свойствам дерново-подзолистых почвах внедрение точных систем удобрения является обоснованным и высоко эффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пивоваров В.Ф.* Овощи России. М.: ВНИИССОК, 2006. 384 с.
2. *Пивоваров В.Ф., Пышная О.Н., Гуркина Л.К.* Овощи – продукты и сырье для функционального питания // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 3. С. 121–127.
3. *Гинс М.С., Гинс В.К., Пивоваров В.Ф., Кононков П.Ф., Дерканосова Н.М.* Значение овощных культур в коррекции биохимического состава рациона человека // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2017. № 2. С. 3–5.
4. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под ред. А.Л. Иванова, Л.М. Державина. М.: Минсельхоз РФ, РАСХН, 2008. 392 с.
5. *Гинс М.С., Пивоваров В.Ф., Гинс В.К., Кононков П.Ф., Дерканосова Н.М.* Научное обеспечение инновационных технологий при создании функциональных продуктов на основе овощных культур // Овощи России. 2014. № 1 (22). С. 4–9.
6. *Архипов М.В., Данилова Т.А., Сеницына С.М.* Научные основы эффективного использования агресурсного потенциала Северо-Запада России. СПб.–Пушкин, 2018. 135 с.
7. *Борисов В.А.* Система удобрения овощных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 392 с.
8. *Пивоваров В.Ф., Надежкин С.М.* Основные пути совершенствования систем удобрения в овощеводстве // Плодородие. 2016. № 5 (92). С. 16–18.
9. *Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А.* Структура пространственной variability агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1559–1566.
10. *Фрид А.С.* Пространственное варьирование и временная динамика плодородия почв в длительных полевых опытах. М.: РАСХН, 2002. 80 с.

11. Басевич В.Ф., Тетенькин В.Л. Неоднородность подзолистых почв и пестрополье // Вестн. МГУ. Сер. 17. 2010. С. 35–42.
12. Кашианов А.Н., Явтушенко В.Е. Агрохимия почв склонов. М.: Колос, 1997. 316 с.
13. Шпедт А.А., Пурлаур В.К. Оценка влияния рельефа на плодородие почв и урожайность зерновых культур // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2008. № 10. С. 5–11.
14. Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. Мониторинг агрохимических свойств почв различных угодий в пределах агроландшафта // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2020. № 1. С. 27–30.
15. Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастливая Л.С., Касаткина Г.А. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 224 с.
16. Иванов А.И., Конашенков А.А., Хомяков Ю.В., Фоменко Т.Г., Федькин И.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия // Агрохимия. 2014. № 2. С. 39–49.
17. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Дубовицкая В.И. Влияние ландшафтных условий на свойства почвенного покрова пахотного угодья на пологом склоне озерно-ледниковой равнины // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 2. С. 39–43.
18. Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
19. Иванов А.И., Конашенков А.А. Агроэкологические последствия неравномерного внесения навоза в овощном севообороте // Агрохимия. 2012. № 6. С. 66–72.
20. Иванов А.И., Конашенков А.А., Федотенков Д.В. Равномерность внесения навоза и пестрота почвенного плодородия // Плодородие. 2007. № 2. С. 16–18.
21. Шпаар Д., Захаренко А.В., Якушев В.П. Точное сельское хозяйство. СПб.—Пушкин, 2009. 397 с.
22. Иванов А.И., Конашенков А.А. Методико-технологические аспекты и результаты оценки точных систем удобрения // Сел.-хоз. машины и технол. 2014. № 3. С. 20–24.
23. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А. Влияние ландшафтных условий на эффективность точной системы удобрения в звене полевого севооборота // Агрохимия. 2020. № 2. С. 69–76.
24. Bianchini A.A., Mallarino A. Soil-Sampling Alternatives and Variable-Rate Liming for a Soybean–Corn Rotation // Agron. J. 2002. V. 94 (6). P. 1355–1366.
25. Weisz R., Heiniger R., White J.G., Knox B., Reed L. Long-term variable rate lime and phosphorus application for piedmont no-till field crops // Precis. Agricult. 2003. № 4. P. 311–330.
26. Иванов А.И., Лапа В.В., Конашенков А.А., Иванова Ж.А. Биологические особенности ответа культур овощного севооборота на точные системы удобрения // Сел.-хоз. биол. 2017. Т. 52. № 3. С. 454–463.
27. Дерюгин И.П., Кирпичников Н.А., Прокошев В.В. Агрохимическое обоснование оптимальных параметров содержания в почве подвижных форм фосфора и калия и оптимизация доз фосфорных и калийных удобрений на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 1995. № 2. С. 3–8.
28. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Чекмарев П.А., Державин Л.М., Борисов В.А. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в интенсивном овощеводстве открытого грунта. М.: РАСХН, 2012. 476 с.

Importance of Precise Fertilizer System in Management Vegetable Quality

A. I. Ivanov^{a, #}, Zh. A. Ivanova^a, and A. A. Konashenkov^b

^a Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prospect 14, St. Petersburg 195220, Russia

^b St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences North–West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance
sh. Podbelskogo, 71, St.-Petersburg–Pushkin 196608, Russia

[#] E-mail: office@agrophis.ru

The paper analyzes the data of landscape and model–field experiments on a soil contrasting in properties. In vegetable crop rotations, three variants of mineral and organic–mineral fertilization systems were used: a common zonal system, a precise system based on the preliminary precision soil cultivation, and a precise system with annual differentiated application of ameliorants and fertilizers. We determined the parameters of optimization of soil properties and agronomic efficiency, as well as the series of sensitivity of vegetable crops and separate indicators of product quality to soil conditions and precise fertilization systems. Having ensured a pronounced optimization and levelling of the most important agricultural properties of the soil (on average by 63%), the fertilization system based on the precise cultivation surpassed the zonal system in terms of the productivity of vegetable crop rotation in the organic-mineral version by 14%, in the mineral one – by 41%, in its spatial variability – by 44 and 61%. In terms of the accumulation of nutrients and vitamins, the superiority of the former system was 3–16%, while the content of nitrates decreased by 6%, and the variability in product quality – by 44%.

Key words: sod-podzolic soil, soil properties, precise fertilization systems, vegetable crop rotation, productivity, product quality, variability.

УДК 631.095.337: 632.952:634.8

СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ С МИКРОУДОБРЕНИЯМИ И СОВРЕМЕННЫМИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ПЕСТИЦИДАМИ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВИНОГРАДА

© 2021 г. Т. С. Астарханова¹, *, С. С. Ладан², А. В. Березнов², И. Р. Астарханов³

¹ Российский университет дружбы народов, Аграрно-технологический институт
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, корп. 2, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

³ Дагестанский государственный аграрный университет им. М. М. Джамбулатова
367032 Махачкала, ул. М. Гаджиева, 180, Республика Дагестан, Россия

*E-mail: tamara-ast@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Проведены исследования для усовершенствования приемов производства высококачественного экологически безопасного винограда при введении в системы защиты фунгицидов, содержащих микроэлементы. Представлены данные накопления микроэлементов в листьях виноградных растений после опрыскивания растений металлосодержащими фунгицидами и их влияния на физиолого-биологические показатели виноградного растения, содержание сахаров в ягодах винограда и вине.

Ключевые слова: фунгициды, микроэлементы, содержание сахаров, накопление, медь, цинк, марганец.

DOI: 10.31857/S0002188121110041

ВВЕДЕНИЕ

Независимо от того, что площади плодоносящих виноградных насаждений увеличиваются, остается проблема повышения урожайности данной культуры. Это связано с тем, что развитию многочисленных вредоносных объектов способствуют существенные нарушения технологии возделывания винограда, а системы защитных мероприятий не соответствуют современным требованиям [1–6]. Многократное применение ограниченного по химическому составу числа пестицидов приводит к ряду экологических проблем, в частности, загрязнению почвы агробиоценозов и продукции остаточными количествами агрохимикатов и пестицидов. Исследованиями по вопросам экологической безопасности использования пестицидов в сельском хозяйстве, в разное время занимались многие исследователи [3, 4, 7]. Несмотря на предпринимаемые меры проблема загрязнения окружающей среды и производства качественных безопасных продуктов питания остается актуальной и в настоящее время [5, 6, 8], т.к. возрастает роль контроля за последствием применяемых в защитных мероприя-

тиях пестицидов. Исследования в направлении последствий химических препаратов в производстве многолетних насаждений, к чему относятся виноградники, наиболее важны и актуальны, т.к. ягоды винограда используют в пищу в свежем виде [9–12].

Совершенствование технологии производства и системы защиты виноградных насаждений от комплекса фитофагов и фитопатогенов остается актуальной задачей для повышения урожайности и получения экологически безопасной продукции. Полному управлению вредителями и возбудителями болезней способствует введение в системы защиты микроудобрений, современных пестицидов и регуляторов роста растений, которые укрепляют иммунитет растений и снижают интенсивность развития фитопатогенов и численность фитофагов [1, 2, 4, 12].

Цель работы – усовершенствовать приемы производства высококачественного экологически безопасного винограда при введении в системы защиты фунгицидов, содержащих микроэлементы. В задачи исследования входило уточнение технологии опрыскивания растений металлос-

держашими фунгицидами, изучение влияния микроэлементов на физиолого-биологические показатели виноградного растения и эффективности применения фунгицидов на качество и урожайность винограда. Впервые изучено влияние современных многокомпонентных пестицидов, введенных в системы защиты, на урожайность и показатели качества винограда в конкретных агробиоценозах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты проводили в зоне II черноземов лесостепной и степной областей, в Северо-Кавказском регионе возделывания сельскохозяйственных культур в Республике Дагестан, Каякентском р-не, в ГУП «Каспий» на столовом сорте Кардинал. Посадки винограда представляли двуплечий кордон со схемой посадки 3×2 м на почвах каштановых и лугово-каштановой, с содержанием гумуса – 2.8%, рН 8.2. Обработка почвы на опытных участках – весенняя вспашка, 4 культивации в борьбе с сорняками, в том числе 2 – с рыхлением в рядках, двукратная чеканка однолетнего прироста. Размер опытной делянки – 2 куста (16 м^2), повторность – четырехкратная. Делянки располагались блоками.

Мероприятия по уходу за опытными делянками, в т.ч. обработки пестицидами были следующими: двукратная чеканка однолетнего прироста, фоновые обработки (двукратно) против оидиума препаратами Квадрис, СК (250 г/л) – 0.8 кг/га, Топаз, КЭ (100 г/л) – 0.25 кг/га.

Для исследования были отобраны многокомпонентные фунгициды системного и контактного действия, такие как Акробат МЦ, ВДГ, Ридомил Голд МЦ, ВДГ и Абига-Пик, ВС.

Препарат Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг) – системный фунгицид, используемый для борьбы с милдью винограда. Диметоморф, входящий в состав фунгицида, ингибирует формирование клеточной стенки оомицетов на всех стадиях их развития, а манкоцеб подавляет синтез сразу нескольких ферментов в клетках гриба. В состав манкоцеба входит комплекс ионов цинка (2.5%), марганца (18%) и этиленбисдифитокарбамата (62%). Фунгицид Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мепеноксам 40 мг/кг) – это пестицид системного и контактного действия для защиты винограда от милдью. Медьсодержащий фунгицид контактного действия Абига-Пик, ВС (400 г хлорокиси меди/л) предназначен для борьбы с комплексом грибных и бактериальных болезней на виноградной лозе.

Обработки исследованными препаратами проводили в период вегетации в фазах развития растений (по шкале ВВСН): 1-я – в фазе распускания глазков (07 – начало распускания почек, зеленые кончики побегов только виднеются), 2-я – в фазе начала образования ягод (71 – появление плодов, молодые плоды начинают набухать, остатки цветов опадают). Расход рабочей жидкости – 300 л/га. На 2-е, 7-е и 14-е сут после 1-й обработки брали пробы листьев для определения накопления микроэлементов.

Для определения содержания микроэлементов пробы для анализа на поступление в ткани листа отбирали не сразу после опрыскивания, а спустя некоторое время, т.к. время с момента нанесения раствора соли на листья до начала их поступления внутрь тканей могло занимать несколько часов. В контроле во время опрыскивания пестицидами листья изолировали пергаментными мешочками от прямого попадания раствора. Листья после отбора высушивали при 105°C и озоляли в муфельной печи при температуре 500°C и далее проводили количественное определение микроэлементов.

Для выяснения действия фунгицидов на рост виноградной лозы проводили учеты роста виноградных побегов путем замеров 4-х модельных побегов на каждом из 5-ти модельных кустов через 10 сут после обработки растений. Измеряли диаметр листьев основных и пасынковых побегов 5-ти модельных кустов в каждом варианте и площадь листовой поверхности по окончании роста растений по методу Мельник. Определение общего количества сахаров и кислотности в соке ягод проводили по ГОСТ 27198-87 (СТ СЭВ 5622-86) Виноград свежий «Методы определения массовой концентрации сахаров».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Большое количество исследователей доказали, что микроэлементы обладают способностью проникать внутрь тканей растений в период их использования в качестве внекорневых подкормок.

Исследования по поступлению микроэлементов при опрыскивании растений винограда металлосодержащими фунгицидами как источника дополнительного питания остается недостаточно изученным. Имеются рекомендации о необходимости использовать фунгициды только как средство борьбы с болезнями растений. В 2018–2020 гг. были проведены исследования виноградных насаждений и способность их листьев накапливать микроэлементы, содержащиеся в составе примененных фунгицидов (табл. 1).

Таблица 1. Влияние фунгицидов на содержание микроэлементов в листьях винограда (2018–2020 гг.), мг/кг сухого вещества

№ п/п	Вариант	Норма расхода, кг, л/га	2-е сут			7-е сут			14-е сут		
			Cu	Fe	Zn	Cu	Fe	Zn	Cu	Fe	Zn
1	Контроль	Без обработок	40.8	62.5	18.0	42.4	70.8	22.8	40.5	130	21.3
2	Абига-Пик, ВС	1.5	60.5	166	18.5	55.2	125	15.0	50.4	161	12.5
3	Акробат МЦ, ВДГ	2.0	17.7	191	14.5	16.5	213	16.8	10.2	255	13.7
4	Ридомил Голд МЦ, ВДГ	2.5	53.5	115	21.8	75.5	130	30.6	78.5	170	35.4

В 2018 г. после опрыскивания кустов винограда фунгицидом Акробат МЦ, ВДГ содержание цинка в листьях на 2-е сут после обработки составило 14.5 мг/кг сухого вещества. На 5-е сут после опрыскивания оно повысилось еще на 2.3 мг, а перед следующим опрыскиванием (через 14 сут) снизилось до 13.7 мг/кг сухого вещества.

Содержание марганца было значительно меньше, чем в контроле (без опрыскивания). На 2-е сут после опрыскивания оно составило 19.2 мг/кг сухого вещества, на 5-е сут – 21.3, через 14 сут (перед следующим опрыскиванием) – 16.1 мг/кг сухого вещества.

Фунгицид Акробат МЦ, ВДГ при опрыскивании кустов винограда ингибировал поступление марганца в листья. Цинк, содержащийся в препарате, способствовал большему накоплению железа в листьях в отличие от других вариантов. На 2-е сут после опрыскивания виноградных кустов содержание железа в листьях было равно 191 мг/кг сухого вещества и превысило контроль в 1.5 раза. Перед следующим опрыскиванием его содержание увеличилось до 215 мг/кг сухого вещества.

После обработки фунгицидом Ридомил Голд МЦ, ВДГ содержание цинка в листьях повышалось по сравнению с вариантом без опрыскивания, достигнув максимума на 14-е сут. Содержание цинка соответствовало 36 мг/кг сухого вещества. Повышалось и содержание меди в варианте применения фунгицидов. Дополнительное введение цинка при опрыскивании кустов препаратом Ридомил Голд МЦ, ВДГ способствовало увеличению содержания железа в листьях по сравнению с контролем. На 2-е сут после опрыскивания выявлено превышение содержания железа на 75.0, на 14-е сутки – на 85.0 и снижалось до 25.0% на 21-е сутки после опрыскивания.

Повышение содержания железа, цинка и меди в листьях винограда при обработках фунгицидами положительно сказывалось на росте и развитии однолетних побегов виноградного куста. На контрольных участках, где применяли цинк-

содержащие фунгициды, наблюдали интенсивный рост побегов.

После опрыскивания препаратом Абига-Пик, ВС содержание меди в листьях превышало контроль. На 2-е сут после обработки в листьях содержание меди было равно 60.5 мг/кг сухого вещества, на 7-е сут – 55.2 мг/кг и через 14 сут – 50.4 мг/кг сухого вещества. В варианте с обработкой препаратом Абига-Пик, ВС (400 г хлорокиси меди/л) накопление меди шло активнее, чем в контроле. На 2-е сут после обработки содержание меди в листьях винограда было равно 65.1 мг/кг, на 7-е сут – 66.8 и через 14 сут (перед следующим опрыскиванием) – 62.5 мг/кг сухого вещества.

При применении медьсодержащих фунгицидов происходило замедление проникновения меди в листья винограда, которое можно объяснить плохой растворимостью меди в воде в отличие от растворимости фунгицидов, содержащих цинк и марганец, что согласовалось с выводами других исследователей по замедлению усвоения меди листьями винограда.

Медьсодержащие фунгициды подавляли и поступление цинка в листья: на 2-сут после обработки препаратом Абига-Пик, ВС в листьях был выявлен цинк в количестве 18.5 мг/кг, на 7-е сут – 15.0 и через 14 сут (перед следующим опрыскиванием) – 12.5 мг/кг сухого вещества.

Содержание железа в листьях винограда при обработке медьсодержащими препаратами повышалось так же, как и при обработке цинк- и марганецсодержащими фунгицидами. Особенно оно возросло в варианте с применением Абига-Пик, ВС. На 2-е сут после опрыскивания содержание железа в листьях было равно 166 мг/кг, что составило 155% от контроля, на 7-е сут – 125 мг/кг и через 14 сут (перед следующим опрыскиванием) – 111 мг/кг сухого вещества.

Проведенные исследования в 2019 и 2020 гг. подтвердили полученные ранее результаты поступления и накопления микроэлементов в листьях растений винограда. В 2019 г. была выявлена одна особенность. В вариантах, где опрыскивание

Таблица 2. Влияние фунгицидов на динамику накопления сахаров в листьях винограда, %

Вариант	Время экспозиции, сут					
	1	3	7	14	21	28
2018 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	9.8	12.5	14.2	17.5	16.3	13.4
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	6.9	11.2	8.7	13.8	16.4	15.2
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	7.1	10.5	8.5	14.2	15.8	12.0
Контроль	4.8	6.5	8.1	8.8	10.2	11.5
2019 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	8.5	10.8	8.2	12.5	11.7	8.5
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	8.2	11.2	9.8	10.4	12.1	10.2
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	6.5	7.2	5.2	8.8	9.8	7.5
Контроль	4.0	4.3	5.4	5.5	6.4	7.2
2020 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	8.3	12.5	10.3	13.8	15.7	14.2
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	7.2	9.1	8.5	12.8	16.2	15.1
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	7.5	8.8	8.2	11.5	14.2	10.5
Контроль	5.1	5.0	5.5	6.3	6.1	7.4

виноградных кустов проводили фунгицидами Акробат МЦ, ВДГ и Ридомил Голд МЦ, ВДГ, содержание цинка в листьях резко возросло. Например, при обработке препаратом Акробат МЦ, ВДГ содержание цинка в листьях на 2-е сут составило 185 мг/кг сухого вещества, превысив контроль в 7.5 раза. В варианте с применением препарата Ридомил Голд МЦ, ВДГ содержание цинка увеличилось по сравнению с контролем в 6.5 раза. Повышенное содержание цинка в листьях, обработанных препаратами, сохранилось на 7-е и 14-е сут после обработки. Этот год отличался выпадением обильных осадков в отличие от 2018 и 2020 гг. За 7 сут после обработки выпало >100 мм осадков. Вторая обработка была проведена через 14 сут, после чего наблюдали резкое повышение содержания цинка в листьях. Эту особенность можно объяснить влиянием осадков на повышение усвоения растением микроэлементов из пестицидов.

Высокие концентрации цинка в листьях винограда после 3-летнего применения препаратов Акробат МЦ, ВДГ и Ридомил Голд МЦ, ВДГ могли быть причиной угнетающего действия на рост побегов винограда. Увеличение роста побегов в варианте с Акробат МЦ, ВДГ по отношению к

эталону (Абига-Пик, ВС) составила 111%, в варианте с Ридомил Голд МЦ, ВДГ – 95.5%.

Результаты влияния медьсодержащих препаратов на содержание меди и других микроэлементов в листьях виноградного растения полностью подтвердились и в последующие годы исследования. Применение меди в составе препарата Абига-Пик, ВС увеличило содержание железа и ингибировало поступление цинка.

Таким образом, обработка виноградных насаждений фунгицидами, содержащими в своем составе микроэлементы, способствовала изменению соотношения содержания микроэлементов в листьях растений.

Одним из характерных показателей реакции растительного организма на действие пестицидов является изменение содержания сахаров. В начале созревания ягод, из листьев, расположенных против гроздей среднего яруса, отбирали образцы для анализа через 1, 3, 7, 14, 21 и 28 сут после 2-го опрыскивания. Пробы отбирали для изучения характера воздействия фунгицидов на динамику накопления сахаров в листьях. Было установлено, что многокомпонентные фунгициды влияли на динамику накопления сахаров в листьях. Неза-

Таблица 3. Влияние фунгицидов на динамику сахаронакопления в соке ягод винограда, г/л

Вариант	Время экспозиции, сут					
	7	14	21	28	35	42
2018 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	105	116	165	190	205	230
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	115	130	150	180	198	210
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	125	147	158	185	200	215
Контроль	103	120	145	168	182	194
2019 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	90	100	150	190	200	225
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	85	115	135	175	190	215
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	95	120	155	180	190	220
Контроль	70	85	105	122	140	157
2020 г.						
Абига-Пик, ВС (хлорокись меди 400 г/л)	105	125	170	200	220	230
Акробат МЦ, ВДГ (диметоморф 90 г/кг + манкоцеб 600 г/кг)	110	135	140	195	215	235
Ридомил Голд МЦ, ВДГ (манкоцеб 640 мг/кг + мефеноксам 40 мг/кг)	115	125	155	170	185	240
Контроль	101	115	138	157	176	190

висимо от обработки в листьях изученных растений во все сроки отбора проб были обнаружены раффиноза, сахароза, глюкоза и фруктоза. В 1-е сут в листьях обнаружены галактоза и один не идентифицированный сахар, на 14-е сут галактоза исчезала и появлялся другой не идентифицированный сахар.

Примененные пестициды не оказывали влияния на состав сахаров в листьях, а вызывали существенные изменения в их количественном содержании. Существенно повышали содержание глюкозы, фруктозы и сахарозы цинк- и марганецсодержащие фунгициды по сравнению с медьсодержащим препаратом (табл. 2).

При опрыскивании медьсодержащим фунгицидом Абига-Пик, ВС содержание суммы сахаров в листьях винограда характеризовалось менее интенсивным подъемом в отличие от контроля в течение первых 14 сут после обработки. У растений, обработанных препаратами Акробат МЦ, ВДГ (и Ридомил Голд МЦ, ВДГ, на 7-е сут после опрыскивания отмечено резкое уменьшение содержания сахаров, которое можно объяснить возможным увеличением траты сахаров растением в этот период. На 14-е сут после опрыскивания

цинк- и марганецсодержащими препаратами содержание сахаров повторно повышалось. На 28-е сут содержание сахаров во всех испытанных вариантах снижалось, но все же оставалось больше, чем в контроле. Примерно на 14-е сут после опрыскивания во всех вариантах наблюдали резкие изменения в содержании сахаров по сравнению с контролем.

Таким образом, применение медьсодержащих фунгицидов и других препаратов системного действия, которые широко используют для защиты виноградных насаждений, требует особого внимания, поскольку они воздействуют на физиологические и биохимические процессы в растении и влияют на качество урожая.

Влияние фунгицидов на процесс накопления сахара в соке ягод винограда показало, что накопление глюкозы и фруктозы в соке ягод происходило в течение всего периода созревания ягод во всех вариантах опыта. Для этого пробы брали через каждые 7 сут из гроздей среднего яруса. Максимальное содержание сахара отмечено в период полной зрелости ягод (табл. 3). Особенности сахаронакопления в листьях и соке ягод винограда, обусловленные обработками фунгицидов, содер-

жащих в своем составе микроэлементы, не оказали отрицательного действия на урожайность винограда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что каждый показатель качества ягод винограда по-разному реагировал на сложный механизм действия фунгицидов с разным химическим составом. Различные факторы окружающей среды (влажность, температура) и примененные для защиты растений химические препараты оказали влияние на ростовые реакции виноградного растения, а также на урожайность и качество ягод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейникова Н.В., Галкина Е.С. Возможность повышения урожая столового сорта винограда раннего срока созревания в условиях юго-западной зоны виноградарства Крыма // Бюл. Гос. Никит. бот. сада. 2015. Вып. 114. С. 53–57.
2. Алейникова Н.В., Галкина Е.С. Оценка влияния отечественных микроудобрений линии полидон на продуктивность винограда столовых и технических сортов в условиях Крыма // Бюл. Гос. Никит. бот. сада. 2018. Вып. 126. С. 102–110.
3. Астарханова Т.С. Зависимость деградации фунгицидов в винограде от условий произрастания // Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. “Основные проблемы, тенденции и перспективы устойчивого развития сельскохозяйственного производства”. Махачкала, 2006. С. 267.
4. Астарханова Т.С. Действие фунгицидов на развитие и продуктивность виноградных кустов // Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. “Научно-прикладные аспекты дальнейшего развития и интенсификации виноградо-винодельческой отрасли в связи с вступлением России в ЕС и ВТО”. Махачкала, 2006. С. 264–266.
5. Бурлаков М.И., Родионова Л.Я. Биохимия некоторых перспективных столовых сортов винограда // Научн. журн. КубГАУ. 2015. № 107 (03). С. 1–13.
6. Воробьева Т.Н., Киян А.Т., Малахов О.Н., Макеева А.Н. Влияние пестицидов на качество столового винограда, возделываемого на Тамани // Пищ. технол.: Изв. высш. уч. завед. 2003. № 1 (272). С. 92.
7. Карачаев Н.А. Влияние регуляторов растений на качество виноградной продукции // Винодел. и виноградарство. 2009. № 4. С. 45.
8. Кузьмина Е.И. Миграция пестицидов из почвы в виноград // Виноград и вино России. 2000. № 6. С. 14–15.
9. Левченко С.В. Сравнительная оценка влияния препаратов, применяемых во внекорневых подкормках, на урожай и качество винограда заклады “Магарач” // Виноградарство и виноделие. 2016. № 1. С. 17–19.
10. Михловски М., Ганак К. О наличии остаточных количеств тяжелых металлов и пестицидов в винограде и продуктах его переработки // Виноград и вино России. 1995. № 3. С. 31.
11. Саришвили Н.Г., Панасюк А.Л., Кузьмина Е.И., Белова Л.Н. Ксенобиотики в винограде и продуктах переработки // Виноград и вино России. 2000. Спецвыпуск. С. 57.
12. Симоненкова В.А. Эффективность различных фунгицидов в борьбе с болезнями гроздей винограда в условиях Оренбургской области // Изв. Оренбург-ГАУ. 2013. № 1. С. 78–80.

Protection Systems with Micro-Fertilizers and Modern Multicomponent Pesticides for Environmentally Safe Grape Production

T. S. Astarkhanova^{a, #}, S. S. Ladan^b, A.V. Bereznov^b, and I. R. Astarkhanov^c

^a Peoples Friendship University of Russia, Agrarian and Technological Institute
ul. Miklukho-Maklaya 8, bldg. 2, Moscow 117198, Russia

^b D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

^c M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University
ul. M. Gadzhieva 180, Makhachkala 367032, Republic of Dagestan, Russia

[#] E-mail: tamara-ast@mail.ru

Studies have been conducted to improve the methods of producing high-quality environmentally safe grapes when introducing fungicides containing trace elements into the protection systems. The data on the accumulation of trace elements in the leaves of grape plants after spraying plants with metal-containing fungicides and their effect on the physiological and biological parameters of the grape plant, the sugar content in grape berries and wine are presented.

Key words: fungicides, trace elements, sugar content, accumulation, copper, zinc, manganese, grape production.

УДК 631.81:631.821:631.559:633.11“324”(470.1)

АЗОТФИКСАЦИЯ КЛЕВЕРА ЛУГОВОГО ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ И ИЗВЕСТКОВАНИИ

© 2021 г. А. Н. Налиухин^{1, 2,*}, А. А. Рыжакова²

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

² *Вологодская государственная молочно-хозяйственная академия им. Н.В. Верещагина
160555 Вологда, ул. Шмидта, 2, Россия*

*E-mail: naliuhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Сочетание минерального и биологического азота – важный фактор повышения продуктивности севооборотов и сохранения плодородия почв в Нечерноземной зоне России. В условиях полевого эксперимента на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почве изучено влияние органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения на урожайность, химический состав и симбиотическую азотфиксацию клевера лугового. Показано, что нейтрализация реакции почвенного раствора до рН_{KCl} 5.8–5.9 способствовала увеличению урожайности зеленой массы клевера лугового на 6–15%, при внесении навоза в дозе 50 т/га (в занятом викоовсяном пару) и минеральных удобрений (под покровную культуру – ячмень) – на 32%. При этом существенного влияния различных систем удобрения на содержание питательных веществ не выявлено. Установлено, что доля фиксированного азота составляла 84–89% от общего. После распашки клеверного пласта на фоне применения минеральной и органо-минеральных систем удобрения при известковании в почву дополнительно поступало 130–140 кг связанного азота/га, что позволило возделывать последующую зерновую культуру без внесения азотных удобрений.

Ключевые слова: клевер луговой, урожайность, система удобрения, симбиотическая азотфиксация, известкование, дерново-подзолистая почва, севооборот.

DOI: 10.31857/S0002188121110090

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание многолетних бобовых трав имеет большое значение не только для обеспечения животноводства высокобелковыми кормами, но и играет большую роль в повышении плодородия почв. Клевер луговой при благоприятных условиях для симбиотической азотфиксации (слабокислая и близкая к нейтральной реакция среды, средняя обеспеченность подвижными формами фосфора и калия, а также микроэлементами – бором и молибденом), может накапливать биологический азот до 200–300 кг/га [1]. При распашке пласта многолетних бобово-злаковых трав в почву поступает дополнительное количество органического вещества и биологического азота, что во многом компенсирует потери гумуса в почвах вследствие недостаточного внесения органических удобрений и позволяет уменьшить дозы азотных удобрений [2]. Таким образом, возделывание бобовых трав позволяет правильно соче-

тать азот минеральных удобрений и биологический азот, уменьшить риски негативного воздействия на окружающую среду вследствие денитрификации и вымывания.

Одним из факторов, существенно снижающих продуктивность бобовых культур, является кислая реакция почвенной среды. Именно поэтому исследования влияния известкования на урожайность клевера лугового проводили во многих длительных и краткосрочных опытах. Например, в стационарном полевом опыте, заложенном в 1940 г. академиком О.К. Кедровым-Зихманом на Центральной опытной станции ВИУА, выявлено, что применение извести оказало существенное влияние на урожайность клевера. Прибавка к фону составила во 2-й ротации 130%, в 3-й и 4-й – 40 и 39% соответственно. В то же время эффективность повторного известкования существенно уменьшалась. Авторы пришли к выводу, что по мере снижения кислотности и содержания по-

движного алюминия (с 10.8 до 1.1 мг/100 г), действие извести на урожайность клевера значительно снижалось [3].

В работе Е.П. Трепачева, Н.А. Кирпичникова, М.С. Ягодиной [4] показана высокая симбиотическая активность клевера лугового на слабокультуренной дерново-подзолистой суглинистой почве без внесения азотных удобрений. При содержании подвижного фосфора 6–8 мг/100 г почвы известкование и внесение фосфорных удобрений в таких условиях не способствовало повышению урожайности.

Отмечено, что на сильнокислой дерново-подзолистой почве в опыте СШ-3 ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова с низким содержанием подвижного алюминия и молибдена положительное влияние извести на урожайность клевера лугового было обусловлено не только устранением кислотности, но и мобилизацией молибдена в почве [5, 6].

Во многих длительных опытах отмечено положительное действие органических и органо-минеральных систем удобрения. Наибольшая урожайность культур севооборота была получена при использовании органической и органо-минеральной систем удобрения в высоких дозах, но положительный баланс гумуса при этом обеспечивала только органо-минеральная система. Плодородие почвы, созданное в процессе длительного применения навоза и минеральных удобрений, обладает более высоким последствием, чем сформированное с использованием только минеральной системы [7–9].

На сегодняшний день назрела острая необходимость в продолжении исследований по эффективному сочетанию минеральных, органических, известковых удобрений при внесении их под различные культуры в севообороте и изучению их последствий. Особенно важно иметь информацию по влиянию удобрений на симбиотическую азотфиксацию бобовых трав, о размерах обогащения почвы биологическим азотом.

Именно поэтому, цель работы – в стационарном полевом опыте изучить последствие органической, минеральной, органо-минеральной систем удобрения на фоне известкования и без него на урожайность и симбиотическую азотфиксацию клевера лугового в зернотравяном севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт был заложен в 2015–2017 гг. на опытном поле Вологодской государственной мо-

лочно-хозяйственной академии им. Н.В. Верещагина на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой среднекультуренной почве. Перед закладкой опыта пахотный слой (0–20 см) характеризовался следующими агрохимическими показателями: pH_{KCl} 5.1–5.2, гидролитическая кислотность (по Каппену) – 1.74 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований (по Каппену–Гильковицу) – 13.5 мг-экв/100 г, степень насыщенности основаниями – 88.6%, содержание гумуса (по Тюрину) – 3.16%, подвижного фосфора (по Кирсанову) – 261 мг/кг и калия (по Кирсанову) – 125 мг/кг [10]. Объект исследования – клевер луговой сорта Дымковский однодичного использования. В годы исследования (2018–2020 гг.) за сезон проводили 2 укоса.

Исследование вели в 5-польном полевом севообороте: викоовсяная смесь (вика посевная сорта Льговская 31-292) – озимая пшеница сорта Московская 56 – ячмень сорта Сонет (с подсевом клевера лугового) – клевер луговой сорта Дымковский – овес сорта Лев.

Площадь делянок – 100 м², повторность трехкратная, размещение вариантов систематическое. Количество севооборотных полей – 3. В полевом опыте изучали 2 фактора: *A* – известкование, *B* – системы удобрения. В качестве систем удобрения (фактор *B*) использовали: органическую – с внесением навоза КРС 50 т/га под викоовсяную смесь, минеральную – внесение N150P120K225 под первые 3 культуры севооборота; органо-минеральную – с внесением половинных и полных доз навоза и минеральных удобрений. Все системы удобрения исследовали на 2-х фонах кислотности (фактор *A*): при pH_{KCl} 5.1–5.2 и 5.8–5.9. Второй уровень кислотности был создан путем известкования почвы по 1.0 H_r под викоовсяную смесь. В контрольном варианте удобрения не вносили. На клевере изучали последствие ранее внесенных удобрений.

Удобрения вносили в форме N_{aa} – 34.4% N, K_x – 60% K_2O , а также комплексного азотно-фосфорно-калийного удобрения марки NPK 15 : 15 : 15 + 7% S. В качестве известкового удобрения использовали известняковую муку (95% $CaCO_3$) [11].

Учет урожайности зеленой массы клевера лугового проводили сплошным методом, поделочно, в фазе начала цветения, с использованием косилки марки КРН-2.1, агрегатированной с трактором МТЗ-82. Урожайность зеленой массы клевера приводили к стандартной влажности (80%).

Для определения количества симбиотически фиксированного азота и коэффициента азотфик-

Таблица 1. Урожайность зеленой массы клевера лугового сорта Дымковский при применении различных систем удобрения (2018–2020 гг.)

Фактор А (известкование)	Фактор В (удобрения)	Урожайность, ц/га				Прибавка к контролю	
		2018 г.	2019 г.	2020 г.	средние за 3 года	ц/га	%
Без известкования (А ₁)	Контроль без удобрений	364	504	418	429	–	–
	Навоз 50 т/га	426	550	425	467	38.3	9
	НРК	421	544	430	465	36.4	8
	Навоз 25 т/га + 1/2 НРК	446	552	444	481	52.2	12
	Навоз 50 т/га + НРК	503	607	439	516	87.6	20
Средние фактора А ₁		432	552	431	472	–	–
Известь (А ₂)	Контроль (без удобрений)	3400	506	419	442	–	–
	Навоз 50 т/га	493	567	425	495	53.1	12
	НРК	482	590	456	509	67.5	15
	Навоз 25 т/га + 1/2 НРК	529	613	496	546	104	24
	Навоз 50 т/га + НРК	593	648	512	584	143	32
Средние фактора А ₂		499	585	462	515	Среднее в опыте – 493	
НСР ₀₅ фактора А		28	27	21			
НСР ₀₅ фактора В и взаимодействия АВ		44	42	33			
НСР ₀₅ частных различий		63	60	47			

сацией использовали метод сравнения с не бобовыми культурами. Для клевера лугового сопоставимой злаковой культурой являлась тимофеевка луговая. Величину азотфиксации определяли по методике Трепачева [12].

Учет массы корневой системы растений проводили рамочным методом: $30.2 \times 33.3 \text{ см} = 0.1 \text{ м}^2$. Взятие образцов производили в 3-х местах каждой делянки каждого повторения на глубину 40–50 см [13].

Содержание азота в растительных образцах определяли по методу Кьельдаля, с пересчетом на сырой протеин (коэффициент 6.25), количество сухого вещества – термостатно-весовым методом, сырую клетчатку, сырой жир и сырую золу – на ИК-анализаторе (методом БИК-спектроскопии). Нитраты определяли ионометрическим методом в свежих образцах зеленой массы. Все анализы растительных образцов были проведены в аккредитованной лаборатории ГЦАС “Вологодский”.

Статистический анализ экспериментальных данных проводили дисперсионным методом по модели двухфакторного полевого опыта.

Метеорологические условия вегетационных периодов (май–сентябрь) в годы проведения исследования различались: 2018 г. характеризовался оптимальным увлажнением (ГТК по Селянинову = 1.5), 2019 и 2020 гг. были избыточно увлажненными (ГТК = 2.2 и 2.5 соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения в последствии оказало значительное влияние на урожайность зеленой массы клевера лугового (табл. 1). Показано, что известкование ранее слабокислой почвы способствовало достоверному повышению урожайности клевера лугового на 6–15%. По своему действию на урожайность последствие ранее внесенного навоза КРС было сопоставимо с внесением минеральных удобрений под покровную культуру (ячмень). Прибавки в вариантах применения органической и минеральной систем удобрения составляли 8–9% на неизвесткованном фоне и 12–15% при внесении CaCO_3 по 1.0 $\text{H}_\text{г}$. Сочетание половинных доз навоза и НРК способствовало некоторому дальнейшему росту урожайности клевера лугового лишь на уровне тен-

Таблица 2. Химический состав сухого вещества клевера лугового при применении удобрений и известковании (среднее за 2018–2020 гг.)

Фактор А (известкование)	Фактор В (удобрения)	Сырой протеин	Сырой жир	Сырая клетчатка	БЭВ	Сырая зола	N-NO ₃ , мг/кг*
		% к сухой массе					
Без известкования (А ₁)	Контроль (без удобрений)	17.6	3.7	24.3	46.1	8.4	121
	Навоз 50 т/га	16.7	3.3	25.2	47.1	7.8	103
	НПК	18.9	3.4	24.7	44.8	8.2	105
	Навоз 25 т/га + 1/2 НПК	18.3	3.0	24.5	46.5	7.8	114
	Навоз 50 т/га + НПК	19.5	3.2	24.1	45.3	7.9	124
Среднее фактора А ₁		18.2	3.3	24.6	45.9	8.0	113
Известь (А ₂)	Контроль (без удобрений)	18.4	3.0	24.11	45.9	8.6	101
	Навоз 50 т/га	17.0	3.6	24.9	46.3	8.3	119
	НПК	18.6	3.1	24.2	46.0	8.1	145
	Навоз 25 т/га + 1/2 НПК	17.6	3.2	25.0	46.1	8.2	115
	Навоз 50 т/га + НПК	17.7	3.4	24.5	45.9	8.5	141
Среднее фактора А ₂		17.8	3.3	24.6	46.0	8.3	124

*На сырую массу.

денции. В то же время сочетание полных доз органического и минерального удобрения существенно повышало урожайность клевера как к контролю, так и другим системам удобрения. При этом наибольшую прибавку урожайности (в среднем за 3 года исследования) обеспечило применение навоза в дозе 50 т/га совместно с минеральными удобрениями в эквивалентном по действующему веществу количеству на фоне известкования – 32% к контролю. Таким образом, следует отметить, что оптимизация реакции почвенного раствора за счет известкования на фоне ранее внесенных органических и минеральных удобрений является действенным приемом повышения урожайности клевера лугового.

Неоднозначно повлияло сочетание удобрений и известкования на химический состав зеленой массы клевера лугового (табл. 2). Если на не известкованном фоне минеральная и органо-минеральные системы способствовали повышению сырого протеина до 18.3–19.5%, при его содержании в контроле 17.6%, то при известковании содержание сырого протеина практически не изменялось в вариантах опыта. Вероятно, это было связано с положительным действием извести на минерализацию почвенного органического вещества, а также мобилизацией остаточных фосфатов, что нивелировало последствие ранее внесенных удобрений. В то же время на известко-

ванном фоне отмечено несколько меньшее содержание сырого протеина в сухом веществе зеленой массы вследствие так называемого эффекта ростового разбавления. Содержание сырого жира (3.0–3.7%), клетчатки (24.1–25.2%), безазотистых экстрактивных веществ (44.8–47.1%), сырой золы (7.8–8.6%) изменялось несущественно и, вероятно, не было обусловлено изученными системами удобрения и известкованием. Внесение органического и минерального удобрения в полной дозе на фоне известкования способствовало незначительному увеличению содержания нитратов до 140 мг/кг сырой массы, но оставалось значительно ниже ПДК (250 мг/кг).

Одностороннее применение минеральных удобрений, а также внесение НПК с навозом КРС в половинных дозах увеличивало сбор сырого протеина с 1.5–1.6 (в контрольном варианте) до 1.8–1.9 т/га, полной дозы – до 2.0–2.1 т/га (рис. 1). Наибольший сбор кормовых единиц – 8.4 т/га, а также выход обменной энергии – 110 ГДж/га отмечены также при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе на фоне CaCO₃, что было на 35% больше, чем в неизвесткованном контроле. Известкование способствовало дополнительному увеличению сбора сырого протеина на 5–6%, кормовых единиц и выходу обменной энергии – на 6–13% по отношению к аналогичным системам удобрения без CaCO₃.

Таблица 3. Влияние различных систем удобрения на биологическую азотфиксацию клевера лугового (среднее за 2018–2020 гг.)

Фактор А (известкование)	Фактор В (удобрения)	Вынос N _{общ} урожаем, кг/га	Содержание N _{биол} в поукосно-корневых остатках, кг/га	K _ф *	Обогащение почвы биологическим азотом, кг/га
Без известкования (А ₁)	Контроль (без удобрений)	263	135	0.84	91.8
	Навоз 50 т/га	279	153	0.84	110
	НРК	306	141	0.86	97.5
	Навоз 25 т/га + 1/2 НРК	313	104	0.86	61.6
	Навоз 50 т/га + НРК	377	159	0.89	116
Известь (А ₂)	Контроль (без удобрений)	300	139	0.86	95.7
	Навоз 50 т/га	329	147	0.86	102
	НРК	371	188	0.88	144
	Навоз 25 т/га + 1/2 НРК	360	184	0.88	141
	Навоз 50 т/га + НРК	364	169	0.88	126

*Коэффициент азотфиксации.

На основании 3-летнего эксперимента была рассчитана эффективность симбиотической азотфиксации (табл. 3). Показано, что за счет создания оптимальной реакции почвенной среды при известковании, а также улучшения питания растений клевера лугового макро- и микроэлементами, поступившими с навозом и минеральными удобрениями, увеличивалось накопление симбиотически фиксированного азота как в надземной массе, так и в поукосно-корневых остатках.

Рост урожайности клевера лугового сопровождался увеличением выноса общего азота с 263–300 кг/га в контрольном варианте до 313–364 кг/га при органо-минеральной системе удобрения. При этом доля симбиотически фиксированного азота менялась от 84 до 88%. Высокую долю связанного азота обеспечило то, что в опыте клевер луговой высевали в чистом виде, а не в составе травосмесей, как, например, в работе [14, 15]. На фоне без известкования увеличение накопления биологического азота отмечено при внесении навоза (в занятом викоовсяном пару) и при его сочетании с минеральными удобрениями в полных дозах. При известковании ранее слабокислой почвы наибольшее накопление N_{биол} в поукосно-корневых остатках клевера лугового было в вариантах с внесением НРК, а также при их сочетании с навозом в полных и половинных дозах. В целом следует отметить, что возделывание клевера лугового в данных условиях приводило к обогащению почвы биологическим азотом в размере 91.8 кг/га даже без внесения удобрений. При этом эффек-

тивность симбиотической азотфиксации находилась на уровне козлятника восточного, возделываемого в схожих условиях [16, 17]. Известкование в целом увеличило поступление в почву биологического азота на 28%. Наибольшее обогащение почвы N_{биол} наблюдали при известковании и внесении НРК, а также при их сочетании с навозом КРС в половинных дозах. Внесение полных доз, вероятно, приводило к угнетению роста и развития клевера лугового в год посева, за счет сильного развития покровной культуры, что в последующем влияло на степень изреженности посевов клевера и снижению его урожайности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение органического и минерального удобрения на фоне известкования дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы способствовало интенсификации процесса симбиотической азотфиксации клевера лугового. Установлено, что доля фиксированного азота составляла 84–89% от общего. Благодаря оптимизации реакции почвенной среды до pH 5.8–5.9 возрастала урожайность зеленой массы клевера на 6–15%, а при внесении навоза в дозе 50 т/га (в занятом вико-овсяном пару) и минеральных удобрений (под покровную культуру – ячмень) – на 32%. Изученные системы удобрения практически не повлияли на качество зеленой массы. Лишь на неизвесткованном фоне применение удобрений способствовало некоторому повышению содер-

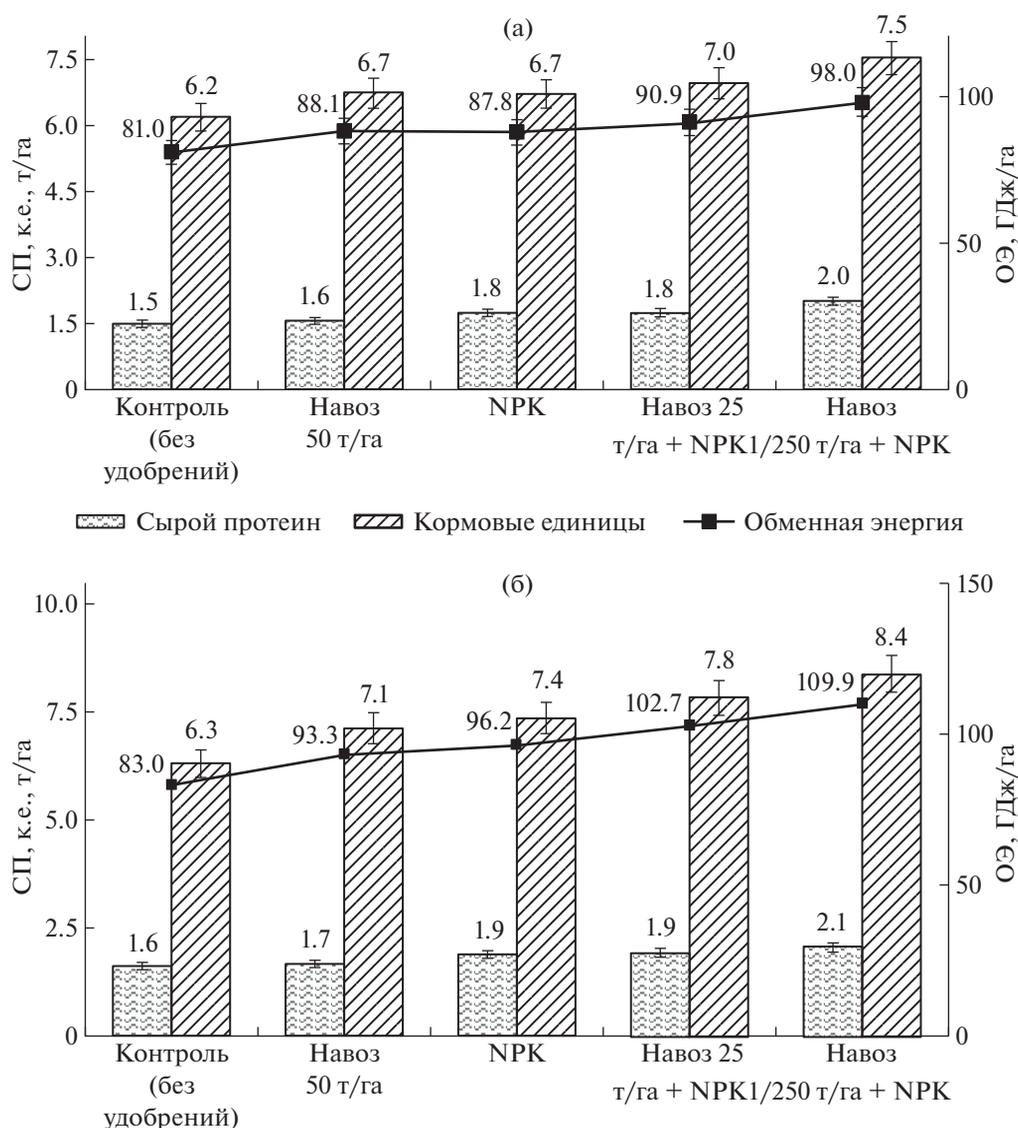


Рис. 1. Влияние удобрений на сбор сырого протеина (СП) и кормовых единиц (т/га) и выход обменной энергии (ОЭ, ГДж/га) (средние за 3 года): (а) – без CaCO₃, (б) – с CaCO₃. “Усиками” показана величина НСР₀₅ частных различий.

жания сырого протеина в сухом веществе. При этом пропорционально увеличивался сбор сырого протеина, кормовых единиц и выход обменной энергии. Наряду с ростом урожайности, за счет накопления биологического азота в поукосно-корневых остатках при распашке клеверного пласта в почву может дополнительно поступить 100–140 кг биологического азота/га, что позволяет возделывать последующую зерновую культуру без внесения азотного удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трещачев Е.П. Значение биологического и минерального азота в проблеме белка // Минеральный и биологический азот в земледелии СССР. М.: Наука, 1985. С. 27–37.
2. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. М.: РАН, 2019. 252 с.
3. Скворцов В.Ф., Стрельников В.Н., Ерохина Е.Н. Влияние доз извести и повторного известкования на урожай многолетних трав на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве // Агрохимия. 1984. № 2. С. 51–62.
4. Трещачев Е.П., Кирпичников Н.А., Ягодина М.С. К вопросу об отношении клевера лугового к кислотности дерново-подзолистой почвы, фосфатному уровню и отзывчивости на фосфорное удобрение // Агрохимия. 1989. № 2. С. 59–69.
5. Скворцов В.Ф., Ерохина Е.Н. Действие извести, молибдена и азотного удобрения на урожай клевера в севообороте // Агрохимия. 1981. № 6. С. 77–83.

6. *Ерохина Е.Н., Собачкина Л.Н., Скворцов В.Ф., Козлова Т.А.* Влияние молибдена на продуктивность культур в севообороте и плодородия почвы // Тр. ВИУА “Эффективность удобрений и других средств химизации на дерново-подзолистых почвах Нечерноземной зоны РСФСР”. М., 1988. С. 106–115.
7. *Жуков Ю.П., Чухина О.В., Токарева Н.В., Куликова Е.И.* Влияние различных доз удобрений на урожайность культур севооборота и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Плодородие. 2015. № 2. С. 14–20.
8. *Мерзлая Г.Е., Понкратенкова И.В.* Эффективность органо-минеральных систем удобрения // Плодородие. 2016. № 2 (89). С. 25–28.
9. *Теймуров С.А.* Влияние симбиотической азотфиксации на плодородие почв и регулирование процессов жизнедеятельности растений // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития. Краснодар: Кубанский ГАУ, 2020. С. 528–534.
10. *Налиухин А.Н., Чухина О.В., Власова О.А.* Почвы опытного поля ВГМХА им. Н.В. Верещагина и их агрохимическая характеристика // Молочн.-хоз. вестн. 2015. № 3 (19). С. 35–46.
11. *Налиухин А.Н., Мерзлая Г.Е., Максимова А.С., Силуянова О.В., Белозеров Д.А., Ерегин А.В.* Эффективность органических и минеральных удобрений при известковании дерново-подзолистой почвы // Плодородие. 2018. № 2 (101). С. 42–45.
12. *Трепачев Е.П.* О методах исследования азотфиксирующей способности бобовых культур // Агрохимия. 1981. № 12. С. 129–141.
13. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 280 с.
14. *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.
15. *Кокорина А.Л., Кожемяков А.П.* Бобово-ризобийный симбиоз и применение микробиологических препаратов комплексного действия – важный резерв повышения продуктивности пашни. СПб.: СПбГАУ, 2010. 50 с.
16. *Капустин Н.И., Налиухин А.Н., Ладухин А.Г., Соболева Н.М., Ханова Н.А.* Влияние микроудобрения “Аквამикс-т” и ризоторфина на продуктивность козлятника восточного // Агрохим. вестн. 2007. № 3. С. 14–16.
17. *Лапинская Э.Б., Мотузене Л.П.* Влияние фосфорно-калийных удобрений на симбиотическую азотфиксацию *Rhizobium galegae* // Агрохимия. 2007. № 9. С. 45–52.

Symbiotic Nitrogen Fixation of Meadow Clover on Application of Fertilizers and Liming

A. N. Naliukhin^{a, b, #} and A. A. Ryzhakova^b

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

^b N.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy
ul. Shmidta 2, Molochnoe–Vologda 160555, Russia

[#] E-mail: naliuhin@yandex.ru

The combination of mineral and biological nitrogen is an important factor in increasing of the productivity of crop rotations and maintaining soil fertility in the Non-Chernozem Earth zone of Russia. Under the conditions of a field experiment on sod-medium podzolic light loamy soil, the influence of organic, mineral and organo-mineral fertilization systems on the yield, chemical composition, and symbiotic nitrogen fixation of meadow clover was studied. It was shown that the neutralization of the reaction of the soil solution to pH_{KCl} 5.8–5.9 contributed to an increase in the yield of the green mass of meadow clover by 6–15%, and when applying manure at a dose of 50 t/ha (in a busy vetch-oat fallow) and mineral fertilizers (for a cover crop – barley) – by 32%. At the same time, no significant effect of various fertilization systems on the nutrient content has been identified. It was found that the share of fixed nitrogen was 84–89% of the total. After plowing the clover layer against the background of mineral and organo-mineral fertilization systems, during liming, 130–140 kg/ha of bound nitrogen is additionally supplied to the soil, which makes it possible to cultivate the subsequent grain crop without applying nitrogen fertilizers.

Key words: meadow clover, yield, fertilization system, symbiotic nitrogen fixation, liming, sod-podzolic soil, crop rotation.

УДК 546.36:631.438.2(470.55)

МИГРАЦИЯ ^{137}Cs В ПОЧВАХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

© 2021 г. В. Г. Граковский¹, А. С. Фрид¹, *¹Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В. В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Профильные распределения содержания ^{137}Cs для 6-ти различных почв Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и сроков миграции 10–25 лет после загрязнения адекватно описываются динамическими моделями диффузии, конвективной диффузии и диффузии с необратимой сорбцией. Оценки диффузионного параметра модели диффузии составили $(0.4–3.8) \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$, а модели диффузии с необратимой сорбцией (фиксацией) – $(2.8–11) \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. Время фиксации 99% радиоцезия почвами при сроке миграции 20 лет оценено в 35–58 лет. Сильно отличается в большую сторону от других почв скорость миграции в лугово-болотной осолоделой почве (площадка 5), что скорее всего связано с повышенной влажностью почвы. Эта же почва – единственная, где наблюдали заметный конвективный перенос вглубь почвы. Внесение на поверхность серой лесной среднесуглинистой почвы (площадка 2) хлористого калия $5 \text{ кг}/\text{м}^2$ увеличивало диффузионный параметр в 3 раза за период 12 лет по сравнению с контролем (без КС1). Диффузионный параметр для 3-х почв не изменялся со временем миграции, а для 3-х других почв увеличивался. Это свидетельствовало о необходимости дальнейшего уточнения моделей. Интерпретация необменной формы ^{137}Cs оказалась различной в зависимости от использованной модели миграции. Обычная диффузионная модель требует, чтобы эта форма обменивалась с обменной формой и почвенным раствором, участвовала в миграции. А по диффузионной модели с кинетикой необменной сорбции эта же форма вполне может быть фиксированной и не участвовать в миграции.

Ключевые слова: ^{137}Cs , миграция вглубь почв, почвы ВУРС, параметры динамических моделей миграции, различные интерпретации необменной формы ^{137}Cs .

DOI: 10.31857/S0002188121110065

ВВЕДЕНИЕ

Описание миграции долгоживущих осколков деления в почвах математическими моделями стало активно развиваться после испытаний ядерного оружия с глобальным загрязнением почвенного покрова. Это направление научных работ стимулировали также техногенные аварии на ядерных объектах с большими ареалами загрязнения территорий. Основным интерес с точки зрения радиационной опасности представляют ^{90}Sr и ^{137}Cs с периодами полураспада ≈ 30 лет [1–16].

Исследования миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs проводили в лабораторных опытах по диффузии [1, 2], лизиметрических опытах [12] и полевых наблюдениях [3–7].

Для описания миграции элементов используют динамические математические модели, в основном – модели диффузии и конвективной

диффузии (в том числе двухкомпонентные [8]). В полевых многолетних условиях при адекватности этих моделей параметры их отражают влияние и многих других процессов, кроме собственно диффузии и переноса с водой: сорбции и десорбции, переноса радионуклида на мелких почвенных частицах, переноса корневыми системами растений, почвенными животными и т.п. [9].

Распространены представления о связи скорости миграции с величиной и прочностью сорбции, с соотношением более “подвижных” и менее “подвижных” форм радионуклидов в почвах [7, 10]. Однако получение прямых (не корреляционных) доказательств этой гипотезы, особенно для полевых условий, затруднительно.

Еще один важный вопрос (особенно для миграции в почвах ^{137}Cs), который практически не обсуждается в литературе – как долго продолжится или может продолжаться вертикальная ми-

грация при наличии признаваемой многими авторами фиксации радионуклида.

Цель работы – изучить распределения ^{137}Cs по глубине различных почв Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) Кыштымской аварии 1957 г., оценить параметры моделей миграции и связать их со свойствами почв и сорбционным поведением ^{137}Cs .

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводили на территории ВУРС через 10–25 лет после загрязнения. Один из авторов данной работы (Граковский В.Г.) много лет работал на опытной станции (ОНИС ПО “Маяк”) как сотрудник Почвенного института им. В. В. Докучаева. В данной работе представлены экспериментальные данные его собственных работ, которые он выполнял параллельно с плановыми работами ОНИС.

Было выделено 6 площадок (примерно по 1000 м²) на различных ландшафтах, и на каждой площадке для каждого срока миграции из почвенных разрезов в 20 повторностях были отобраны образцы почв ненарушенного строения. Образцы почвы были разрезаны на слои по 2 см, в каждом слое определяли содержание ^{137}Cs , влажность, плотность (объемный вес), некоторые физико-химические характеристики почвы.

В образцах из почвенных горизонтов в лабораторных условиях определяли содержание водорастворимого, обменного и необменного ^{137}Cs (при его внесении в почвы) – как традиционные показатели оценки подвижности радионуклидов, а также коэффициенты распределения в суспензии. На базе специальных полевых опытов ОНИС с внесением больших доз радиоцезия на поверхность почв этих площадок с последующим отбором образцов также определяли содержание обменного радиоцезия при миграции в полевых условиях. Содержание ^{137}Cs определяли на гамма-спектрометре по методикам ОНИС.

В данную работу включили один из вариантов другой серии опытов на площадке 2, где через 3 года после загрязнения территории на поверхность почвы внесли 5 кг КСI/м². Изучение профиля проводили еще через 9 лет (12 лет после загрязнения), одновременно в этот же срок изучали также профиль без внесения КСI.

Так как почти все профильные распределения ^{137}Cs имели типичный диффузионный характер, то в основу их модельного описания были положены 2 модели, описывающие миграцию при разовом загрязнении поверхности почвы: обычной

диффузии и диффузии с учетом кинетики необратимой фиксации [11]. Наличие необменной сорбции радиоцезия и необходимость учета ее кинетики является в настоящее время одним из общепринятых подходов при моделировании миграции радиоцезия в почвах, наряду с двухкомпонентной моделью. Только для площадки 5, где намечалось образование ступеньки, использовали дополнительно еще и модель конвективной диффузии. Наличие множества повторностей на каждой площадке (почве) позволило надежно количественно охарактеризовать не только средние содержания элемента в слоях, но и пространственное варьирование профильных распределений, указать допустимые коридоры концентраций при подгонке (подборе) параметров моделей миграции, а также оценить разброс величин параметров.

Базовым допущением во всех модельных расчетах принято, что параметры моделей миграции существенно не менялись ни в зависимости от глубины почвы, ни времени миграции. Это допущение связано с тем, что при многолетнем рассмотрении реальные процессы миграции при периодической смене времен года (температура и влажность почвы, цикличность роста растений и т.п.) происходит усреднение многих даже разнонаправленных отдельных процессов. Насколько оправдалось это допущение, обсуждается ниже.

Напомним, что найденные величины (оценки) параметров моделей миграции являются “кажущимися” постольку, поскольку характеризуют лишь адекватность моделей экспериментальным данным. Физический смысл им придает сопоставление с независимой от данного эксперимента информацией. В дальнейшем тексте определенные “кажущийся” мы опускаем.

Процедура подбора оценок параметров моделей миграции была следующей. Для экспериментально найденных средних концентраций ^{137}Cs (в долях от общего содержания) в отдельных слоях почвы рассчитывали интервал величин (± 1 или ± 0.5 среднеквадратичного отклонения), обусловленный точностью измерения и пространственным варьированием. Если величина параметра модели или сочетания параметров позволяли получить расчетные концентрации, укладывающиеся в этот коридор, то это являлось первым критерием адекватности величин параметров и самих моделей. Естественными дополнительными критериями были: 1 – диффузионный параметр L_1 модели с фиксацией не может быть больше коэффициента диффузии в растворе ($(6-10) \times 10^{-6}$ см²/с) и не может быть меньше коэффициента диффузии по

чисто диффузионной модели (D) в этих же условиях, 2 – диффузионный параметр в конвективно-диффузионной модели (D_k) не должен превышать величину D .

Сопоставимость параметров миграции для 2-х и более сроков позволяет с большей надежностью судить об адекватности моделей миграции и их параметров, чем по одному сроку измерения, что было еще одним критерием адекватности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблицах представлены измеренные свойства почв, показаны коэффициенты вариации плотности почв и содержаний ^{137}Cs в пределах площадок, содержания форм ^{137}Cs ; на рисунках – плотности почв и профили концентраций ^{137}Cs по глубине почв при разных сроках миграции. Для обобщенной характеристики профильных распределений в таблицах рассчитаны медианные величины каждого показателя.

Для каждой площадки и каждого срока оценены интерполяцией глубины, на которых находи-

лось 50 и 95% от общего содержания радиоцезия в профиле, первая величина соответствует так называемому центру тяжести. Эти оценки и оценки параметров моделей миграции представлены в таблицах.

По гранулометрическому составу верхнего горизонта почв (A1) имелись почвы среднесуглинистые (площадки 1, 2, 4), тяжелосуглинистые (площадки 3, 5) и легкосуглинистая (площадка 6). Показаны заметные различия и по содержанию гумуса. Наибольшая влажность почвы соответствовала лугово-болотной осолоделой почве (площадка 5), хотя понятно, что влажность является краткосрочной характеристикой. Наибольшее содержание обменных и водорастворимых Ca и Mg найдено в черноземно-луговой солончаковой почве (площадка 4), наименьшее – в серой лесной среднесуглинистой (площадка 2) и в темно-серой лесной осолоделой (площадка 6) почвах.

Коэффициенты вариации плотности почв (табл. 1, рис. 1), как правило, убывали с глубиной, а содержание радиоцезия – возрастало. Это свидетельствовало о не связанности этих явлений.

Таблица 1. Коэффициенты вариации (%) содержаний ^{137}Cs (% от суммарного содержания в профиле) и плотности (Пл) почвы (кг/дм³)

Глубина, см	Номер площадки																					
	1			2					3					4			5			6		
	Пл	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$	Пл	$^{137}\text{Cs}_{10}$	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$	$^{137}\text{Cs}_{25}$	Пл	$^{137}\text{Cs}_{10}$	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$	$^{137}\text{Cs}_{25}$	Пл	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$	Пл	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$	Пл	$^{137}\text{Cs}_{15}$	$^{137}\text{Cs}_{20}$
0–2	20	20	18	28	12	17	17	16	14	4.5	12	11	16	30	21	3.6	44	23	10	28	24	21
2–4	26	29	25	30	30	34	14	13	12	27	32	15	16	16	30	7.9	32	25	13	20	34	14
4–6	32	46	37	25	33	44	22	13	12	42	48	17	12	22	43	11	22.5	23	11	27	49	16
6–8	29	68	56	22	65	48	20	17	12.5	54	46	13	15	18	51	16	14	25	7.9	29	48	13
8–10	24	85	57	20	46	43	17	19	12.5	40	52	16	18	16	54	13	8.6	35	20	25	60	28
10–12	19	58	76	15	37	39	20	16	10.5	–	46	17	10	15	55	17	6.9	51	50	17	72	19
12–14	17	45	65	14	–	48	18	13	7.4	–	37	15	–	13	48	19	7.8	68	20	14	89	21
14–16	15	50	72	12	–	37	17	15	7.4	–	40	42	–	11	44	18	7.6	78	34	10	70	28
16–18	14	–	63	9.5	–	40	40	16	7.4	–	–	40	12	11	43	10	7.4	68	32	7.6	–	20
18–20	12	–	25	6.5	–	–	40	25	1.4	–	–	80	0	9.3	70	20	7.4	96	41	7.6	–	0
20–22	–	–	–	6.5	–	–	27	22	–	–	–	–	0	4.7	–	10	7.4	55	34	–	–	–
22–24	–	–	–	5.9	–	–	0	40	–	–	–	–	0	4.7	–	15	7.4	50	43	–	–	–
24–26	–	–	–	5.9	–	–	–	30	–	–	–	–	–	4.7	–	30	8.6	45	36	–	–	–
26–28	–	–	–	–	–	–	–	60	–	–	–	–	–	–	–	0	8.4	60	35	–	–	–
28–30	–	–	–	–	–	–	–	50	–	–	–	–	–	–	–	–	8.4	60	27	–	–	–
30–32	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	–	–
32–34	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	–	–
34–36	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	–	–
36–38	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	–	–
38–40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	50	–	–	–
Медиана	19	48	57	14	35	43	20	17	11	40	43	17	14	13	46	14	8.4	51	24	19	55	20

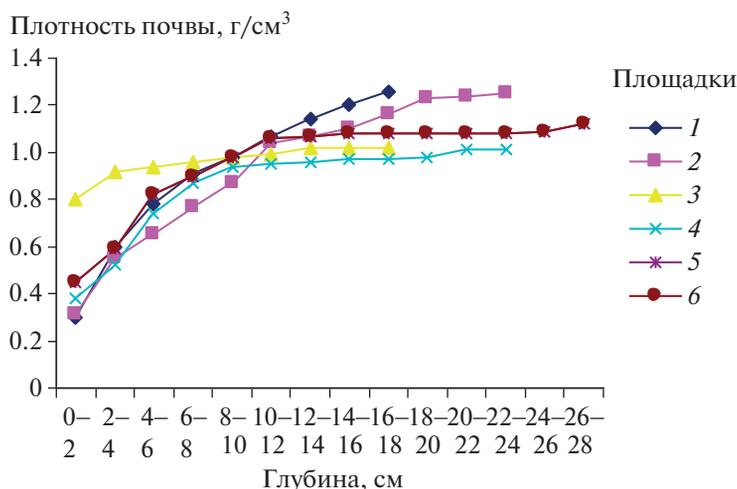


Рис. 1. Профильные распределения плотности почв 6-ти площадок.

Интересно отметить, что почти на всех площадках медианные для профиля коэффициенты вариации содержания радиоцезия уменьшались с ростом срока миграции (рис. 2).

Содержание форм ^{137}Cs мало менялось в зависимости от горизонта почв (табл. 2). В то же время, содержание обменной формы убывало (а не-

обменной – увеличивалось) в ряду площадок (почв): $4 > (3, 5) > 6 > 1 > 2$. Содержание обменной формы в пределах глубин миграции (табл. 3) отчетливо увеличивалось с глубиной примерно в 2 раза, что свидетельствовало в пользу замедленного характера необменной сорбции (чем глубже, тем меньше времени пребывания нуклида в дан-

Таблица 2. Формы ^{137}Cs и коэффициент распределения (Kd) в водной суспензии (1 : 10) для горизонтов почв площадок (лабораторные опыты)

Номер площадки	Почвенный горизонт	Глубина, см	Водорастворимый	Обменный	Необменный	Kd , мл/г
			% от валового			
1	A1	1–20	0.2	7.3	92.5	2900
	B	20–40	0.2	7.5	92.3	2770
	BC	40–56	0.2	5.8	94.0	2000
2	A1	2–23	0.2	6.4	93.4	2800
	B	23–50	0.2	6.9	92.9	2000
	BC	50–65	0.2	4.5	95.3	2300
3	A1	1–37	0.3	16.7	83.0	2500
	AB	37–53	0.2	17.1	82.7	2900
	B	53–83	0.2	16.7	83.1	2800
4	A1	1–35	0.8	20.4	78.8	2220
	A2	35–50	0.6	13.8	85.6	850
	B	50–85	0.7	16.1	83.2	1820
5	A1	1–30	0.5	16.7	82.8	2500
	A2	30–42	0.6	17.2	82.2	2000
	B	42–56	0.4	14.3	85.3	2520
6	A1	3–24	0.6	10.1	89.3	2000
	A2	24–39	0.3	10.8	88.9	1400
	BC1	39–80	0.3	11.2	88.5	2460

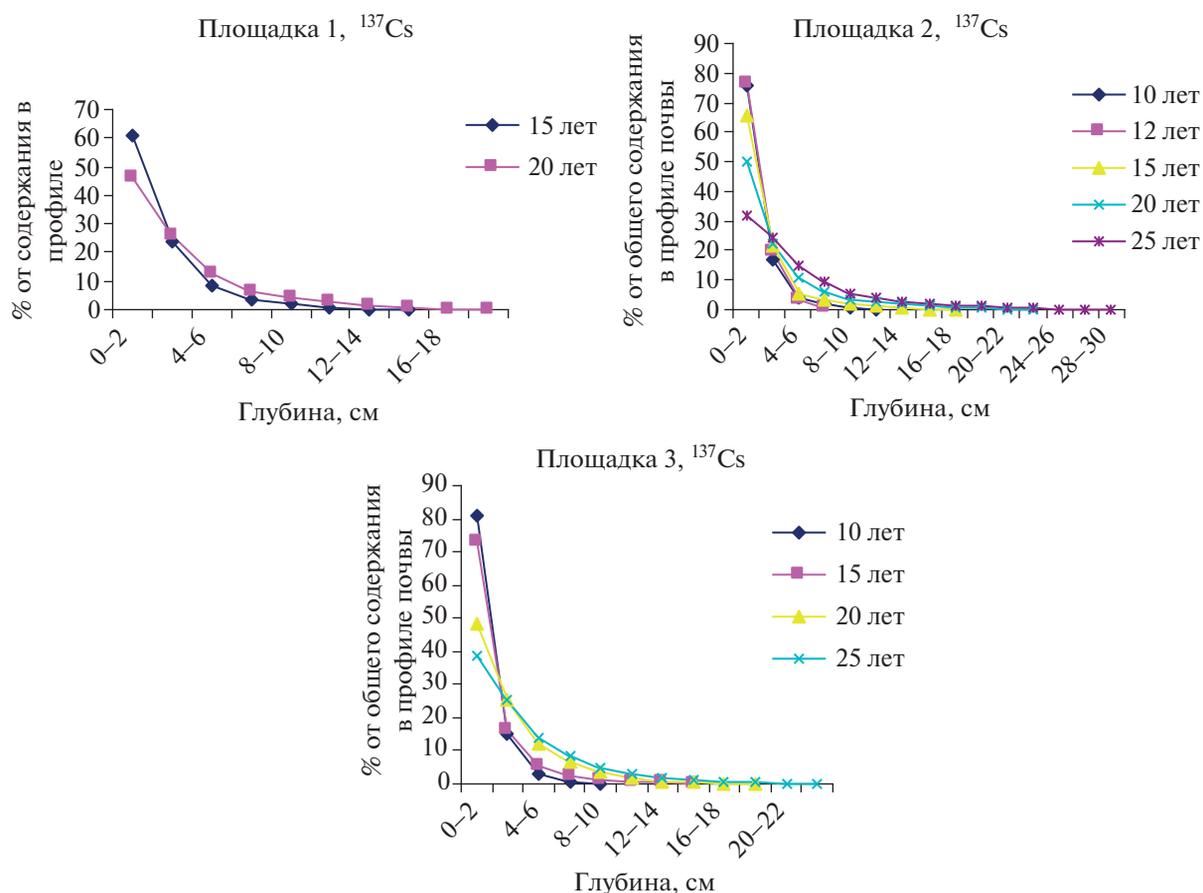


Рис. 2. Средние (из 20-ти повторностей) содержания ^{137}Cs по глубине почв 6-ти площадок.

Таблица 3. Содержание обменного ^{137}Cs на глубину миграции, % от валового (отдельный полевой опыт)

Глубина, см	Площадки					
	1	2	3	4	5	6
0–2	3.1	3.1	7.5	8.3	10.5	3.4
2–4	3.9	3.8	8.1	9.4	10.6	3.8
4–6	4.7	3.8	9	10.7	11.2	4.5
6–8	5.6	4	10.4	11.8	12	5
8–10	6	4.3	11.7	12.6	12.6	5.6
10–12	6.8	5	12.6	13.2	13.1	6.5
12–14	7	5.2	13	13.7	13.5	
14–16		5.6	13.4	14.5	14	
16–18		6.0		15.7	14.6	
18–20				16.6	14.8	
20–22					15.5	
22–24					16.1	
24–26					16.4	
26–28					16.7	
28–30					16.7	
Медиана	5.6	4.3	11.1	12.9	14	4.75

ном слое почвы). Если сравнить медианные величины в этом случае, то получаем ряд площадок: $5 > 4 > 3 > 1 > (2, 6)$. Таким образом, по величине доли обменного ^{137}Cs выявили 2 группы площадок: $(3, 4, 5) > (1, 2, 6)$.

Сравнили площадки по скорости миграции ^{137}Cs , исходя непосредственно из измеренных содержаний (табл. 4, 5). Для этого оценили глубины, ниже которых прошла половина (50%) мигрирующего вещества, 95% и максимальные измеренные глубины (100%). Найдено, что на всех площадках (почвах) глубина миграции увеличивалась со временем вплоть до предельных сроков измерения (20–25 лет), т.е. остановки миграции не зафиксировано. Наибольшее продвижение отмечено для площадки 5, наименьшее – для площадок 1, 3, 6. За исключением площадки 3, это согласовалось с группировкой площадок по обменному ^{137}Cs , показанной выше.

Рассмотрим полученные величины параметров моделей миграции (табл. 6–9). Если сравнивать диффузионный параметр диффузионной модели (D) для всех площадок (почв) и общих для

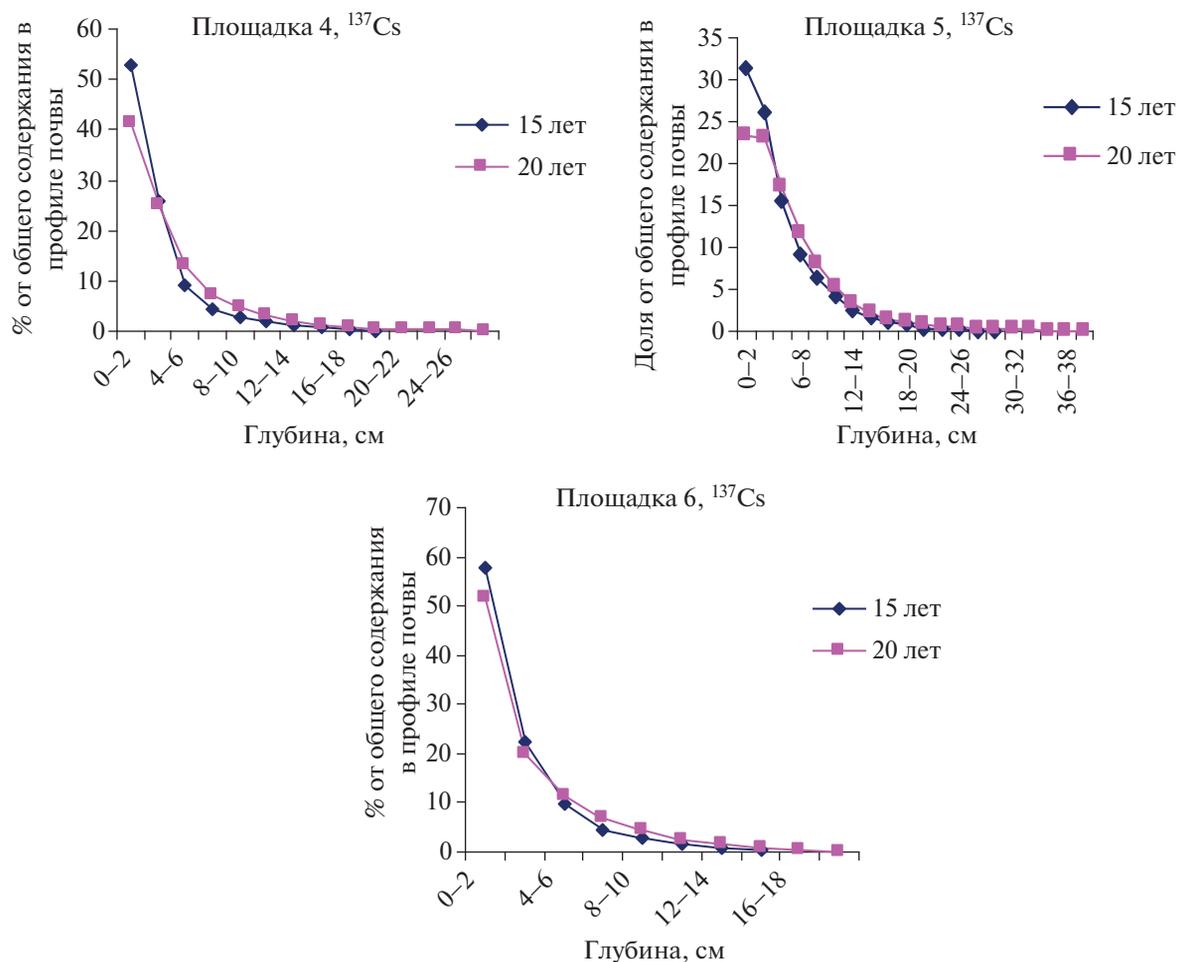


Рис. 2. Окончание.

них сроков миграции 15–20 лет, то получаем ряд $5 > 4 \geq (1, 2, 3, 6)$. Другими словами, заметно быстрее миграция проходила в лугово-болотной осолоделой почве, а для остальных почв различия были незначительными. В целом это согласовалось с порядком почв по глубинам миграции. Для 5-й площадки адекватна и конвективно-диффузионная модель, показавшая вероятность и конвективного переноса вниз, что тоже свидетель-

ствует о большей миграционной подвижности радиоцезия в этой почве.

Хлористый калий вносили на поверхность почвы (площадка 2), зная о большой его десорбирующей способности по отношению к радиоцезию в почвах. Предполагали, что это увеличит миграционную способность последнего. В самом деле, параметр D увеличился в 3 раза (табл. 9).

Таблица 4. Экспериментальная оценка глубины миграции различных долей ^{137}Cs в почвах площадок 1, 4, 5, 6 (см)

Номер площадки	15 лет			20 лет			Размах варьирования		
	50%	95%	100%	50%	95%	100%	50%	95%	100%
1	1.6	7.1	16	2.3	9.95	20	1.6–2.3	7.1–9.95	16–20
4	1.9	9.8	20	2.7	12.3	28	1.9–2.7	9.8–12.3	20–28
5	3.4	13.7	30	4.4	17.1	40	3.4–4.4	13.7–17.1	30–40
6	≈1.7	8.45	16	≈1.9	10.5	20	1.7–1.9	8.45–10.5	16–20

Таблица 5. Экспериментальная оценка глубины миграции разных долей ^{137}Cs в почвах площадок 2 и 3 (см)

Время миграции	Площадка 2			Площадка 3		
	50%	95%	100%	50%	95%	100%
10 лет	≈1.3	4.95	12	≈1.2	≈3.9	10
12 лет	≈1.3	3.9	8	—	—	—
12 лет – КС1	2	7.9	12	—	—	—
15 лет	≈1.5	7.4	18	≈1.4	6	16
20 лет	2	11.4	24	2.1	9.3	20
25 лет	3.5	15.4	30	2.9	12.4	24
Размах	1.3–3.5	3.9–15.4	8–30	1.2–2.9	3.9–12.4	10–24

Таблица 6. Параметры моделей миграции ^{137}Cs в почвах площадок 1, 4, 6 для сроков миграции 15 и 20 лет

Площадка	15 лет			20 лет (15 и 20 лет вместе для площадки 1)		
	модель диффузии	модель диффузии с фиксацией		модель диффузии	модель диффузии с фиксацией	
	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$
1	0.55–0.75	≥3	≥(4.1–12) (ф)	0.75–0.87	≥3	≥4 (ф)
		1	0.7–4		2.9	3.5–4.8
		0.8	≤		2.5	2.8–3.8
		0.7	≤1		2	2.1–3
					1	0.2–1.0
			0.9	≤0.7		
4	0.85–1.2	≥5	≥(5–10) (ф)	1.4–1.5	≥8	≥(4.5–8) (ф)
		4	4–7		6	3.5–6
		2	1.5–4		4	2–3.6
		1	≤1		3.5	2–3
					2	0.5–1.5
6	0.7–0.9	≥4	≥(5–10) (ф)	≈0.95	≥4	≥3.5–6 (ф)
		3	4–8		3.5	3.1–5
		2	1.8–5		3	2.7–4
		1	≤2		2	1.4–3

Примечание. (ф) – при данных величинах параметров и данном времени радиоцезий фиксируется практически полностью. То же в таблицах 7–9.

Таблица 7. Параметры моделей миграции ^{137}Cs в почве площадки 5 для сроков миграции 15 и 20 лет

15 лет					20 лет				
модель диффузии	модель конвективной диффузии		модель диффузии с фиксацией		модель диффузии	модель конвективной диффузии		модель диффузии с фиксацией	
$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$D_k \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$V \times 10^9, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$
2.4–3.9	3 2.5*	–2...+2 –0.2...+2*	≥20	≥(6.5–12) (ф)	3–4.5	4.4 4 3* 2.5*	–4...+0.3 –3...+0.8 –0.4...+2.5* 2*	≥15	≥(3–4.5) (ф)
			10	3–5.8				11	2–3
			5	0.8–2.5				5	0.2–1.0
			4	0.2–2				4	≤0.8

*Сочетания параметров D_k и V , которые лучше соответствуют качественной картине профиля концентрации радиоцезия (рис. 2д).

Таблица 8. Параметры моделей миграции ^{137}Cs в почве площадки 3 для различных сроков миграции

10 лет			15 лет			20 лет			25 лет		
$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$
0.27–0.46	≥ 5 1 0.5	$\geq (25-45)(\text{ф})$ 4–10 ≤ 4	0.35–0.45	≥ 5 1 0.5	$\geq (15-30)(\text{ф})$ 2.5–7 0.2–2.7	0.8–1.0	≥ 5 2.75 2 1	$\geq (4-7)(\text{ф})$ 2–4.5 1–3 ≤ 0.9	1.1–1.6	≥ 10 5 3 2	$\geq (4.5-9)(\text{ф})$ 2–4.5 1–2.5 0.3–1.5

Таблица 9. Параметры моделей миграции ^{137}Cs в почве площадки 2 для различных сроков миграции

10 лет			12 лет			12 лет (KCl)		
$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$
0.35–0.6	≥ 2 1 0.8 0.6	$\geq (7-15)(\text{ф})$ 3–6 1.5–5.5 ≤ 3	0.3–0.5	≥ 2 1 0.6 0.5	$\geq (7-15)(\text{ф})$ 3–4 1–3 ≤ 2	1–1.5	≥ 5 3 2	≥ 7 4.5–5 1.5–3
15 лет			20 лет			25 лет		
0.4–0.6	≥ 3 2 1 0.8 0.6	$\geq (5.5-12)(\text{ф}) \approx 1$ 3.5–8 1.5–4 0.8–3 ≤ 1.5		≥ 4 3.8 3 2 1	$\geq (3-6)(\text{ф})$ 3–5 2.5–4.5 1.5–3 ≤ 0.01	1.7–2.5	≥ 10 5 3	$\geq (2.7-6)(\text{ф})$ 1.4–3 0.2–1.5

К сожалению, измерения были проведены только для одного срока миграции (12 лет).

Проследим изменение параметра D со временем. Для 1-й, 5-й и 6-й площадок от 15 до 20 лет параметр был постоянным, для остальных площадок отмечен его рост со временем: на площадке 4 – от 15 к 20 годам, на площадках 2 и 3 – от 15 к 20 и 25 годам. Напомним, что изменение диффузионного параметра со временем свидетельствует либо о недостаточной адекватности соответствующей модели, либо о неоправданности некоторых ее предпосылок, описанных выше.

Рассмотрим теперь результаты при использовании модели диффузии с кинетикой необменной сорбции. Так как адекватные по вышеуказанным критериям оценки параметров составляют целую полосу возможных величин, то для сравнения площадок (почв) использовали в первую очередь пороговые величины сочетаний параметров, разделяющие полную и неполную фиксацию диффундирующего вещества за конкретные сро-

ки миграции. Для сроков миграции 10–20 лет пороговые величины диффузионного параметра (L_1) составили для всех площадок от 2×10^{-8} до $20 \times 10^{-8} \text{см}^2/\text{с}$, а для срока миграции 25 лет (площадки 2 и 3) – $10 \times 10^{-8} \text{см}^2/\text{с}$. При этом для всех площадок (почв) эти оценки были в несколько раз больше соответствующих величин D из чисто диффузионной модели. Следовательно, при учете фиксации собственно диффузия может оказаться значительно быстрее, но она захватывает не все фазы почвы. Для пороговых величин L_1 получается следующий ряд площадок: $5 > 4 > 3 > (1, 2, 6)$, который мало отличается от соответствующего ряда для оценок D .

Сравнение почв по пороговым величинам кинетического параметра β нагляднее проводить, рассчитав время, требуемое для фиксации, например, 99% от общего количества радиоцезия. Использовали модель кинетики необменной сорбции, примененную в данной модели мигра-

Таблица 10. Оценки максимального (порогового) времени фиксации (t_p) 99% внесенного на поверхность почвы ^{137}Cs

Площадка	Срок миграции, лет	t_p , лет
1	15–20	37
2	10–15	21
	20–25	52
3	10	6
	15	10
	20–25	35
4	15–20	30
5	15	23
	20	49
6	15	29
	20	42

ции – $C_1/C_0 = \exp(-\beta t)$, где C_1 – текущая концентрация несорбированной части вещества, C_0 – начальная (общая) концентрация вещества. Тогда при сорбции 99% вещества имеем: $0.01 = \exp(-\beta t_p)$, где t_p – соответствующее пороговое время. Отсюда $t_p = \ln(0.01)/(-\beta) = 4.605/\beta$. Результаты расчета показаны в табл. 10: 1 – на большинстве площадок с увеличением времени миграции пороговая скорость миграции уменьшалась (период почти полной фиксации увеличивался), при этом при меньших сроках миграции период фиксации был близок к самим срокам миграции, 2 – быстрее всего пороговая фиксация достигалась в почве площадки 3, медленнее всего – на площадках 2, 5, 6. Необходимо отметить, что речь идет не о реальной скорости фиксации, а о пороговой. Поскольку миграция продолжалась в исследованные сроки, то реальные величины параметров L_1 и β были меньше пороговых.

Интересно было проверить предполагаемую связь скорости миграции в почве с формами нахождения в ней радиоцезия. Обычно в таком случае выводы делают на основе корреляций или ссылок на мнения других авторов. Попробуем применить для этого модельные представления о процессах, происходящих при миграции. Например, модельное представление о коэффициенте диффузии в условиях сорбционного равновесия между фазами почвы имеет вид (трехфазная среда, третья фаза – нейтральна) [12, 13]:

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1 + D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K}{\Theta_1 + \Theta_2K} = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1}{\Theta_1 + \Theta_2K} + \frac{D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K}{\Theta_1 + \Theta_2K} = D(\text{I}) + D(\text{II}),$$

где D – коэффициент диффузии для среды в целом (то, что обычно определяют из эксперимента), D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии в жидкой фазе и в адсорбированном состоянии, Θ_1 и Θ_2 – объемные доли жидкой и адсорбирующей фаз, $(l_0/l_1)^2$ и $(l_0/l_2)^2$ – коэффициенты извилистости диффузии в обеих фазах, K – безразмерный коэффициент распределения между твердой (адсорбирующей) и жидкой фазами. Отметим, что величина D_2 отражает в том числе прочность сорбции диффундирующего вещества. Как видно, основная характеристика сорбции в этом случае – коэффициент распределения (K), его и надо оценить из имеющихся экспериментальных данных. Величина K_d (коэффициент распределения в суспензии почвы) для данных целей не годится, она завышена, т.к. ее определяют при слишком высоких отношениях между твердой и жидкой фазами [14].

Из представленной модели для D следует, что каждая его составляющая ($D(\text{I})$ и $D(\text{II})$) должна быть меньше, чем D . При этом $D(\text{I})$ может быть оценено из имеющихся экспериментальных и литературных данных. Применяя этот подход, использовали величину D_1 , равную $6.3 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ [2], величины $(l_0/l_1)^2$ на основе работы [15], величины Θ_1 и Θ_2 из наших экспериментальных данных влажности и плотности почв (медианные показатели). Результаты расчетов K и $D(\text{I})$ представлены в табл. 11. Показано, что только 3-й вариант оценки K (наибольшие величины) соответствовал условию $D(\text{I}) < D$ для площадок 1, 2, 6 и сравнительно близко к нему – для остальных площадок. В рамках данной диффузионной модели это означало, что не только обменная, но и необменная форма радиоцезия полностью участвует в процессе миграции.

Рассмотрим этот же вопрос с точки зрения модели диффузии с кинетикой необменной сорбции (фиксацией). В модель заложено наличие 3-х активных фаз: водорастворимой, обменной (они находятся в равновесии между собой) и фиксированной (необменной). Диффузионный параметр L_1 относится к миграции в первых 2-х фазах, а доля фазы с фиксацией рассчитывают через кинетический параметр β ; соотношение между диффундирующим веществом в первых 2-х фазах определяется коэффициентом распределения. Таким образом, в этой модели необменная (фиксированная) форма не может участвовать в расчетах параметра K .

Так как долю радиоцезия в фиксированном состоянии рассчитывают в модели, то ее можно сопоставить с измеренным экспериментально содержанием необменной формы. Для этого для одного из сроков миграции (20 лет) подбирали такие сочетания параметров миграции L_1 и β , кото-

Таблица 11. Оценки безразмерного коэффициента распределения (K) и величины $D(I)$ для ^{137}Cs

Площадка	K			Θ_1	Θ_2	$(l_0/l_1)^2$	$D(I) \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$			$D \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$ (15–20 лет)
	обменный водорастворимый (1)	необменный обменный + водорастворимый (2)	Необменный + обменный водорастворимый (3)				(1)	(2)	(3)	
1	36.5	12/17	500	0.18	0.31	0.3	3.8	11/7.9*	0.28	0.75–0.87
2	32	14/22	500	0.20	0.36	0.3	4.1	9.0/5.9	0.27	0.5–1
3	56	4.9/8.0	330	0.43	0.38	0.55	8.8	83/55	1.5	0.4–0.9
4	25.5	3.7/6.8	120	0.30	0.30	0.45	14	82/53	2.9	1.0–1.45
5	33	4.8/6.1	200	0.43	0.40	0.55	14	81/66	2.4	3.1–3.8
6	17	8.3/20	170	0.34	0.40	0.5	19	37/16	2.0	0.8–0.95

Примечания. 1. Над чертой – фактические данные, под чертой – величины K и $D(I)$, рассчитанные по медианным величинам обменного радиоцезия из табл. 3, предполагая отсутствие водорастворимой формы. 2. Величина D_1 из справочных данных равна $8 \times 10^{-6} \text{см}^2/\text{с}$. 3. Величины коэффициентов извилистости взяты из работы [9], используя показатели Θ_1 .

Таблица 12. Оценки параметров модели диффузии с кинетикой необменной сорбции, соответствующие экспериментальным данным содержания обменной и необменной форм ^{137}Cs

Площадка	$L_1 \times 10^8, \text{см}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^9, 1/\text{с}$	Измерено		Рассчитано		Время фиксации 99%, лет
			доля обменной формы	доля необменной формы	доля обменной формы	доля необменной формы	
			%				
1	2.9	4.15	5.3–7.6	92.5–94.4	7	93	35
2	3.8	4	4.3–6.4	93.4–95.7	7	93	37
3	2.75	3.25	11–16.7	83–89	12	88	45
4	3.5	2.5	12.9–20.4	78.8–87.1	19	81	58
5	11	2.5	14–16.7	82.8–86	16	84	58
6	3.5	4.05	4.7–10.1	89.3–95.3	7	93	36

рые давали долю фиксированного радиоцезия, близкую к измеренной необменной (табл. 12). Для всех площадок (почв) это удалось сделать, причем везде эти сочетания параметров были меньше пороговых, соответствующих полной фиксации. Такой подход позволил дать дополнительный критерий к конкретизации оценок параметров модели в рамках полосы адекватных величин. Тогда для параметра L_1 получили ряд $5 > (2, 4, 6) > (1, 3)$, а для параметра β ряд $(1, 2, 6) > 3 > (4, 5)$. Первый ряд приблизительно соответствует ряду для D , а второй ряд приблизительно обратен первому. Другими словами, чем меньше скорость фиксации, тем больше величина диффузионного параметра.

Данная модель позволяет рассчитывать и 2 другие формы диффундирующего вещества, од-

нако в данном случае доля водорастворимой формы мала (в пределах точности расчетов) и можно ограничиться оценкой 2-х форм (обменной и фиксированной), не используя величину K (табл. 12).

Таким образом, 2 адекватные модели миграции радиоцезия показали противоположные результаты с точки зрения участия необменной формы радиоцезия в почвах в процессе миграции.

Надежных корреляционных связей между показателями миграции и свойствами почв в этом случае не получили, возможно из-за малости выборки. Однако площадка 5 (лугово-болотная осолодевшая почва) резко выделилась повышенной скоростью миграции по всем показателям, и это соответствовало наибольшей влажности (табл. 13, 14) и наибольшему содержанию валового калия (табл. 15).

Таблица 13. Некоторые свойства почв экспериментальных площадок в пределах глубин миграции (15 лет после загрязнения)

Глубина, см	Влажность весовая	Влажность объемная	Водорастворимые		Обменные	
	%		Ca	Ca + Mg	Ca	Ca + Mg
			мг-экв/кг			
Площадка 1. Почва темно-серая лесная на дресве плотных пород, южный склон пологого холма, луг ковыльно-разнотравный						
0–2	59.6	17.9	–	–	–	–
2–4	47.5	28.5				
4–6	32.0	25.0				
6–8	25.8	23.5				
8–10	19.6	19.2				
10–12	15.0	16.1				
12–14	11.9	13.6				
14–16	10.5	12.6				
16–18	10.2	12.9				
Медиана	20	18				
Площадка 2. Почва серая лесная среднесуглинистая, лес						
0–2	70.0	21.7	17.2	19.4	357	457
2–4	50.0	27.5	8.0	9.4	270	360
4–6	35.5	23.1	3.4	4.6	200	250
6–8	25.8	19.9	3.0	4.2	180	220
8–10	21.5	18.7	2.6	3.6	180	210
10–12	18.2	18.9	2.4	3.4	180	210
12–14	15.8	16.9	2.3	3.0	180	210
14–16	14.4	15.8	2.3	3.0	170	200
16–18	14.0	16.2	2.3	3.0	160	180
18–20	14.0	17.2	2.3	3.0	160	180
20–22	14.2	17.6	2.3	3.0	170	190
22–24	14.7	18.4	2.3	3.0	180	200
Медиана	17	19	2.4	3.2	180	210
Площадка 3. Почва – чернозем выщелоченный, залежь						
0–2	21.7	17.4	6.7	10.0	320	410
2–4	22.1	20.3	5.6	7.7	300	350
4–6	22.3	21.0	4.8	6.8	300	350
6–8	22.2	21.3	4.0	5.6	300	350
8–10	21.4	21.0	4.0	5.3	300	350
10–12	20.3	20.1	4.0	5.0	300	350
12–14	19.1	19.5	3.9	4.9	300	350
14–16	18.0	18.4	3.9	4.9	300	350
16–18	17.2	17.5	3.8	4.8	300	350
Медиана	21	20	4.0	5.3	300	350
Площадка 4. Почва черноземно-луговая солончаковатая						
0–2	65.0	24.7	10.0	15.4	692	890

Таблица 13. Окончание

Глубина, см	Влажность весовая	Влажность объемная	Водорастворимые		Обменные	
	%		Ca	Ca + Mg	Ca	Ca + Mg
			мг-экв/кг			
2–4	57.3	29.8	9.5	14.2	452	547
4–6	48.7	36.0	6.8	10.0	446	525
6–8	40.6	35.3	6.0	8.4	434	482
8–10	36.8	34.6	5.2	7.6	408	464
10–12	34.7	33.0	5.2	7.6	400	455
12–14	33.9	32.5	5.0	7.0	400	455
14–16	33.4	32.4	5.0	7.0	400	455
16–18	33.1	32.1	5.0	7.0	400	455
18–20	33.1	32.4	5.0	7.0	400	455
20–22	33.0	33.3	5.0	7.0	400	455
22–24	33.0	33.3	5.0	7.0	400	455
Медиана	33	32	5.0	7.0	400	455
Площадка 5. Почва лугово-болотная осолодевшая						
0–2	140	63.0	6.8	8.1	409	490
2–4	99.0	58.4	6.0	8.1	232	284
4–6	74.8	61.3	4.2	5.5	215	264
6–8	61.7	55.5	3.7	5.0	198	244
8–10	54.2	53.1	3.6	4.7	200	240
10–12	48.3	51.2	3.6	4.7	179	223
12–14	43.6	46.7	2.5	3.0	152	182
14–16	40.1	43.3	2.5	3.0	191	231
16–18	37.5	40.5	2.5	3.0	215	266
18–20	35.5	38.3	2.5	3.0	230	277
20–22	33.6	36.3	2.5	3.0	230	277
22–24	32.0	34.6	2.5	3.0	230	277
24–26	30.7	33.5	2.5	3.0	230	277
26–28	29.5	33.0	2.5	3.0	230	277
Медиана	42	45	2.5	3.0	220	270
Площадка 6. Почва темно-серая лесная осолодевшая						
0–2	110	31.9	10.4	12.6	471	542
2–4	76.0	38.8	5.9	7.6	235	286
4–6	52.6	40.5	3.7	4.3	176	233
6–8	44.0	37.0	3.2	3.8	162	219
8–10	37.9	35.3	2.6	3.2	150	200
10–12	32.7	33.0	2.6	3.2	101	141
12–14	28.3	29.2	2.2	2.8	83	120
14–16	25.2	26.7	2.2	2.8	75	98
16–18	23.5	25.4	2.2	2.8	71	93
Медиана	38	33	2.6	3.2	150	200

Таблица 14. Влажность почвы в пределах глубин миграции, % от полной влагоемкости (ПВ)

Слой, см	Площадка					
	1	2	3	4	5	6
0–2	20.1	25.6	26.2	30.8	65.9	34.3
2–4	28.6	31.6	28.8	34.3	71.9	44.0
4–6	32.6	34.4	29.8	39.4	79.6	51.2
6–8	33.3	34.4	30.6	43.0	81.3	52.5
8–10	32.7	34.5	31.1	45.0	81.9	52.4
10–12	31.8	33.9	31.3	46.0	82.5	52.0
12–14	30.6	33.0	31.3	46.7	82.5	51.1
14–16	29.6	32.3	31.2	47.3	81.3	50.4
16–18	28.9	31.9	30.9	47.8	79.9	49.7
18–20	28.4	31.9	30.4	48.2	78.3	49.0
20–22	–	32.0	–	48.7	76.8	–
22–24	–	32.3	–	49.2	75.2	–
24–26	–	32.6	–	49.6	73.8	–
26–28	–	–	–	–	72.6	–
28–30	–	–	–	–	71.6	–
Медиана	30.1	32.3	30.75	46.7	78.3	50.75

Сопоставим полученные результаты с имеющимися в литературе. Сначала сравним с лабораторными диффузионными опытами с ^{137}Cs . Для 2-х исследованных в работе почв (серая лесная среднесуглинистая – площадка 2 и чернозем выщелоченный – площадка 3) одним из авторов были получены оценки D $(0.1–0.37) \times 10^{-8}$ и $(0.2–0.85) \times 10^{-8}$ $\text{см}^2/\text{с}$ соответственно в интервале температур 2–50°C [1]. Это практически совпадает с величинами сроков миграции 10–15 лет в настоящей работе. В работе [4] при анализе распределения в почвах глобальных выпадений радиоцезия с помощью конвективно-диффузионной модели найдены для серой лесной почвы и чернозема средние показатели D 0.25×10^{-8} и 0.41×10^{-8} $\text{см}^2/\text{с}$ и отсутствие конвективного переноса (это совпадало с нашими результатами). Для более влажных пойменных почв лесостепной зоны величины D заметно больше – $(2.2–2.5) \times 10^{-8}$ $\text{см}^2/\text{с}$ и существует заметный конвективный перенос вглубь почвы, что тоже соответствует нашим данным для более влажной лугово-болотной почвы (площадка 5). В работе [16] также изучали глобальные выпадения и на легкосуглинистых почвах Белорус-

сии получили величины D $(6–12) \times 10^{-8}$ $\text{см}^2/\text{с}$, что значительно превышало наши оценки для лесостепной зоны Урала.

Значительная часть публикаций посвящена миграции радиоцезия в почвах Чернобыльского следа, причем с использованием двухкомпонентной модели. Хотя эта модель неплохо описывает многие экспериментальные данные, мы считаем ее теоретически необоснованной и предложили заменить ее моделью с кинетикой необменной сорбции [11], использованной в настоящей работе. Сводки полученных оценок параметров моделей миграции для Чернобыльского следа по этим 2-м моделям имеются в работах [2, 5, 7].

ВЫВОДЫ

1. Профильные распределения ^{137}Cs для 6-ти различных почв ВУРС и сроков миграции 10–25 лет после загрязнения адекватно описываются динамическими моделями диффузии, конвективной диффузии и диффузии с необратимой сорбцией. Оценки диффузионного параметра модели диффузии составили $(0.4–3.8) \times 10^{-8}$ $\text{см}^2/\text{с}$, модели диффузии с необратимой сорбцией (фиксацией) – $(2.8–11) \times 10^{-8}$ $\text{см}^2/\text{с}$. Время фиксации 99% радиоцезия почвами при сроке миграции 20 лет оценено в 35–58 лет.

2. Сильно отличается в большую сторону от других почв скорость миграции в лугово-болотной осолоделой почве (площадка 5), что скорее всего связано с повышенной влажностью почвы. Эта же почва – единственная, где наблюдали заметный конвективный перенос цезия вглубь почвы.

3. Внесение на поверхность серой лесной среднесуглинистой почвы (площадка 2) хлористого калия 5 $\text{кг}/\text{м}^2$ увеличивало диффузионный параметр в 3 раза за период 12 лет по сравнению с контролем (без KCl).

4. Диффузионный параметр для 3-х почв не изменялся со временем миграции, а для 3-х других почв увеличивался. Это свидетельствовало о необходимости дальнейшего уточнения моделей.

5. Интерпретация необменной формы ^{137}Cs оказалась различной в зависимости от использованной модели миграции. По обычной диффузионной модели эта форма обменивалась с обменной формой и почвенным раствором, участвовала в миграции. По диффузионной модели с кинетикой необменной сорбции эта же форма вполне могла быть фиксированной и не участвовать в миграции.

Таблица 15. Характеристики почв площадок по генетическим горизонтам

Номер площадки	Горизонт	Глубина, см	Ил	Физическая глина	Валовое содержание на прокаленную навеску			Водная вытяжка			Обменные				H _T	pH _{H2O}	Гумус, %	Обменная влажность, доли
					K ₂ O	CaO	CaO	Ca ²⁺	K ⁺	Ca	Mg	K						
													мг-экв/кг					
%																		
1	A1	1-20	17.0	42.6	0.58	6.55	6.0	0.3	210	70	3.2	89	6.2	3.0	0.28			
	B	20-40	18.2	40.2	0.48	6.41	2.8	0.1	146	48	1.7	22	6.0	2.2	0.28			
	BC	40-56	16.9	38.3	0.60	5.91	4.0	0.2	126	49	1.5	7	6.0	0	0.26			
2	A0	0-2	-	-	-	-	18.0	1.5	360	100	5.6	53	5.7	-	-			
	A1	2-23	21.6	43.4	1.11	4.44	5.6	0.3	220	80	3.0	31	5.7	3.4	0.32			
	B	23-50	32.5	51.7	1.54	5.02	2.6	0.1	206	52	3.6	27	5.8	1.0	0.38			
	BC	50-65	19.0	54.5	1.66	6.91	2.5	0.1	126	40	1.3	21	5.6	0.4	0.29			
	C	65-140	12.7	32.3	0.9	11.4	2.0	0.1	202	56	1.3	14	5.8	-	0.23			
3	A0	1-5	31.8	47.5	-	-	7.0	1.5	330	80	11.8	31	6.0	7.6	-			
	A1	5-37	33.0	47.2	1.80	3.17	5.2	0.2	290	90	5.1	30	6.6	6.8	0.43			
	A1B	37-53	31.7	47.2	-	-	4.0	0.2	368	53	5.4	13	6.7	2.3	0.42			
	B	53-83	30.1	46.6	1.45	2.81	4.6	0.2	339	61	4.6	7	7.0	1.1	0.40			
	Bк	83-128	32.8	55.0	1.30	12.1	6.2	0.2	340	63	4.9	3	8.0	0.3	0.43			
	Cк	128-150	22.9	40.6	-	-	5.6	0.2	233	52	1.4	3	8.4	-	0.34			
	Cк	150-180	13.7	28.5	0.73	8.81	4.6	0.2	277	55	1.3	3	8.0	-	-			
	A0	1-3	13.1	26.8	-	-	11.8	2.8	315	67	14.8	100	5.5	7.8	-			
4	A1	3-35	20.0	41.1	1.64	3.02	6.5	0.3	250	70	4.4	18	7.0	6.4	0.30			
	A2	35-50	12.6	31.0	1.46	2.53	2.9	0.3	34	11	2.0	5	7.3	1.1	0.26			
	B	50-85	29.4	42.4	1.55	2.60	2.6	0.3	91	29	5.6	10	7.0	0.7	0.36			
	BC	85-130	16.9	35.4	-	-	2.0	0.3	97	40	5.9	9	6.9	0.6	0.27			
	C	130-140	16.5	29.2	1.44	2.91	2.1	0.6	57	28	4.6	13	6.3	0.3	-			
	A0	0-1	29.4	50.5	-	-	53.8	5.4	655	129	14.3	48	5.8	15.1	-			
	A1	1-30	31.6	49.9	2.15	2.54	3.8	0.2	250	100	4.4	32	6.6	7.9	0.42			
	A2	30-42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41			
5	B	42-56	31.3	46.9	1.93	2.07	2.8	0.2	186	110	5.9	6	7.3	1.6	0.28			
	Bк	56-82	15.8	34.5	-	-	5.0	0.2	115	102	2.0	2	8.3	0.6	0.23			
	C1	82-100	11.1	29.8	-	-	5.3	0.2	80	60	2.1	2	8.4	0.2	-			
	C2	100-150	6.6	18.2	2.40	2.92	2.2	0.3	49	33	1.3	1	8.7	0.1	-			
	A0	0-3	-	-	-	-	41.1	3.1	430	80	16.7	82	6.0	-	-			
	A1	3-24	26.3	64.5	1.11	1.22	4.3	1.5	135	45	9.4	73	6.0	4.6	0.36			
6	A2	24-39	22.4	48.9	1.11	1.22	1.0	0.4	43	8	5.9	36	5.8	1.1	0.32			
	BC1	39-80	25.3	62.8	-	-	0.7	0.2	71	10	6.2	48	5.4	0.8	0.35			
	C	80-115	13.8	52.8	-	-	0.6	0.1	71	31	5.1	32	5.8	0.6	0.30			
	C	115-135	15.5	54.0	0.08	0.12	1.0	0.2	48	16	2.8	16	6.0	0.4	-			

Примечание. H_T – гидролитическая кислотность, прочерк – отсутствие данных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Граковский В.Г. Диффузия ионов в почвах // Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. Научн. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1991. С. 44–53.
2. Фрид А.С. Механизмы и модели миграции ^{137}Cs в почвах // Радиационная биология. Радиозэкология. 1999. Т. 39. № 6. С. 667–674.
3. Махонько К.П., Чумичев В.Б. О проникновении некоторых продуктов деления в почву // Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сб. тр. по агроном. физике. Вып. 18. Л.: Колос, 1969. С. 57–74.
4. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Миграция цезия-137 в почвах ЕТ СССР // Тр. ин-та эксп. метеорологии “Загрязнение атмосферы, почвы и растительного покрова”. М.: Гидрометиздат, 1980. Вып. 10(86). С. 47–51.
5. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. Мат-лы 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 2000. 268 с.
6. Казаченок Н.Н. Геоэкология техногенных радиоактивных изотопов: Монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 283 с.
7. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
8. Константинов И.Е., Скотникова О.Г., Солдаева Л.С., Сисицина Т.И. Прогнозирование миграции Cs-137 в почве // Почвоведение. 1974. № 5. С. 54–58.
9. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические процессы и моделирование / Под. ред. Р.М. Алексахина. М.: Энергоатомиздат, 1981. 98 с.
10. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. М.: Атомиздат, 1974. 215 с.
11. Фрид А.С., Граковский В.Г. Диффузия ^{137}Cs в почвах // Почвоведение. 1988. № 2. С. 78–86.
12. Прохоров В.М., Фрид А.С. Количественные закономерности диффузии ионов в почве как пористой адсорбирующей среде // Вопросы энерго- и массообмена в системе почва–растение–атмосфера. Тр. по агроном. физике. Л., 1971. Вып. 32. С. 80–89.
13. Фрид А.С. Диффузия в каналах переменного сечения. Деп. ВИНТИ № 3365-79. Минск, 1979. 12 с. (Миграция в почве и ее моделирование. Научн. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 185–192)
14. Фрид А.С., Прохоров В.М. Об измерении коэффициента распределения радиоизотопов во влажной почве // Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сб. тр. по агроном. физике. Л.: Колос, 1969. Вып. 18. С. 20–31.
15. Розен Г.А. Использование радиоактивного хлора при определении геометрических характеристик диффузии ионов в почвах // Физико-химические аспекты плодородия почв Нечерноземной зоны. Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1984. Вып. XXXI. С. 36–40.
16. Шагалова Э.Д., Павлоцкая Ф.И., Мазурова М.Д. Миграция ^{90}Sr и ^{137}Cs в автоморфных дерново-подзолистых почвах Белоруссии // Почвоведение. 1986. № 10. С. 114–121.

Migration of ^{137}Cs in the Soils of the East-Ural Radioactive TraceV. G. Grakovskiy^a and A. S. Frid^{a, #}^a Federal Research Center “V. V. Dokuchaev Soil Institute”
Puzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia[#]E-mail: asfrid@mail.ru

The profile distributions of the ^{137}Cs content for 6 different soils of the East-Ural radioactive trace (EURT) and migration periods of 10–25 years after contamination are adequately described by dynamic models of diffusion, convective diffusion and diffusion with irreversible sorption. The estimates of the diffusion parameter of the diffusion model were $(0.4–3.8) \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, and the diffusion models with irreversible sorption (fixation) were $(2.8–11) \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$. The time of fixation of 99% of radiocesium by soils with a migration period of 20 years is estimated at 35–58 years. The migration rate in the meadow-swamp salted soil (site 5) differs significantly from other soils, which is most likely due to increased soil moisture. This same soil is the only one where a noticeable convective transfer deep into the soil was observed. The application of 5 kg/m^2 of potassium chloride to the surface of gray forest medium loamy soil (site 2) increased the diffusion parameter by 3 times over a period of 12 years compared to the control (without KCl). The diffusion parameter for 3 soils did not change with the migration time, and for 3 other soils it increased. This indicated the need for further refinement of the models. The interpretation of the non-exchange form of ^{137}Cs turned out to be different depending on the migration model used. The usual diffusion model requires that this form is exchanged with the exchange form and the soil solution, and participates in migration. And according to the diffusion model with the kinetics of non-exchange sorption, the same form may well be fixed and not participate in migration.

Key words: ^{137}Cs , migration deep into the soil, soils of EURT, parameters of dynamic migration models, various interpretations of the non-exchange form of ^{137}Cs .

УДК 546.74:576.851.13:633.11“321”

ВЛИЯНИЕ СТИМУЛИРУЮЩИХ РОСТ РАСТЕНИЙ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ К ТОКСИЧЕСКОМУ ДЕЙСТВИЮ НИКЕЛЯ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ¹

© 2021 г. В. П. Шабаев^{1,*}, В. Е. Остроумов¹

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: VPSH@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

В вегетационном опыте исследовано влияние ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы при искусственном загрязнении никелем агросерой почвы. Установлено повышение устойчивости растений к токсическому действию тяжелого металла при внесении бактерий. Определены элементный химический состав растений и вынос никеля и биофильных элементов вегетативной массой и корневой системой растений. Предположено, что увеличение выноса биофильных элементов растениями, инокулированными бактериями, является их ответной протекторной реакцией на загрязнение почвы никелем.

Ключевые слова: бактерии рода *Pseudomonas*, *Triticum aestivum* L., $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, агросерая почва, химический состав растений.

DOI: 10.31857/S0002188121090106

ВВЕДЕНИЕ

Избыток никеля в растительной продукции представляет серьезную опасность для человека и животных. Основными антропогенными источниками загрязнения биосферы Ni являются сжигание различных видов топлива, поступление из разных отраслей промышленности, осадки сточных вод и свалки. В сельском хозяйстве источником загрязнения почвы Ni могут быть минеральные и органические удобрения и средства защиты растений. При повышенном содержании Ni в почве происходит угнетение роста и развития растений, снижается содержание хлорофилла в листьях [1]. В качестве одной из стратегий ремедиации загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) почв многими исследователями рассматривается возможность использования стимулирующих рост растений ризосферных бактерий (PGPR) [2–6]. Среди PGPR особое внимание привлекают представители рода *Pseudomonas* благодаря широкой распространенности и присущей им сово-

купности полезных для растений свойств [7]. Применение PGPR [8], в том числе бактерий рода *Pseudomonas* [5, 9, 10] существенно уменьшало фитотоксичность Ni и повышало устойчивость растений к токсическому действию ТМ. Ранее была установлена высокая эффективность применения стимулирующих рост растений бактерий рода *Pseudomonas*, которые значительно уменьшали поступление свинца и кадмия из загрязненной агросерой почвы в вегетативную массу растений ячменя на ранних стадиях их развития, повышая устойчивость растений к токсическому действию ТМ [11, 12]. Установлено, что стимулирование роста растений при применении бактерий рода *Pseudomonas* происходит в том числе вследствие улучшения минерального питания растений [13]. Исследований по влиянию ростстимулирующих бактерий на минеральное питание растений при загрязнении почвы ТМ проведено недостаточно.

Цель работы – изучение влияния ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание в них Ni, при загрязнении почвы ТМ.

¹ Работа выполнена в рамках госзадания “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах АААА-А18-118013190180-9 и ААА-А18-118013190181-6”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили при выращивании растений яровой пшеницы *T. aestivum* L., сорта Злата (Московский НИИСХ “Немчиновка”) на агросерой почве юга Московской обл. в вегетационном опыте при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Ni. В сосудах диаметром 10 см и высотой 11 см, наполненных 800 г почвы, выращивали по 10 растений до фазы трубкования в течение 26 сут. Испытывали влияние 20-го штамма бактерии *P. fluorescens*, 21-го штамма бактерии *P. fluorescens* и 23-го штамма бактерии *P. putida* на рост растений, содержание в них Ni и элементный химический состав растений. Известно, что эти бактерии стимулируют рост и повышают урожай зерновых, бобовых, корнеплодных культур, ярового рапса [14] и сахарной свеклы [15]. В контрольном варианте растения выращивали без внесения Ni и бактерий, в другом варианте — с внесением Ni без бактерий, в остальных вариантах на фоне загрязнения почвы Ni — с внесением каждой из вышеупомянутых бактерий. В опытах была использована пахотная среднесуглинистая агросерая почва (Luvisol) (слой 0–20 см), на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Почва имела следующие агрохимические показатели: pH_{KCl} 6.34, $C_{орг}$ — 0.17%, $N_{вал}$ — 136 мг, Ca и Mg (1 н. KCl) — 13.4 и 1.7 мг-экв/100 г, N-NH_{4обм} и N-NO₃ (0.1 н. Na₂SO₄) — 0.66 и 0.36 мг, подвижные P₂O₅ и K₂O (0.2 н. HCl) — 14.7 и 23.5 мг/100 г почвы соответственно. В почву вносили NiCl₂ · 6H₂O (квалификации “хч”, Реахим, Россия) из расчета 300 мг Ni/кг почвы за 10 сут до посева семян на фоне внесения NPK-удобрений по 100 мг действующего вещества на 1 кг почвы соответственно в виде азотно-кислого аммония, двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия. При посеве стерилизованные, пророщенные семена раскладывали на почву и инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10⁸ кл./растение и засыпали 3-см слоем почвы. В варианте без инокуляции бактериями вносили аналогичным образом адекватное количество автоклавированных бактериальных суспензий. Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне ≥60% ПВ. Повторность опыта пятикратная.

Вегетативную массу (листья и стебли) после срезания растений и корни высушивали при 70°C и взвешивали. Корни отмывали от почвы водопроводной, а затем дистиллированной водой. Растительный материал (0.5 г) после сжигания в

смеси концентрированных кислот HNO₃ : HClO₄ = 2 : 1 анализировали на содержание Ni и других зольных элементов. После сжигания растительного материала (0.05–0.1 г) в разбавленной серной кислоте (1 : 2) с катализатором (K₂SO₄ : Zn : Se : CuSO₄ · 4H₂O = 100 : 24 : 2 : 0.2) определяли содержание в растениях валового азота феноловым методом. В конце опыта определяли pH_{KCl} почвенной суспензии (почва : раствор = 1 : 2.5) [16]. Содержание Ni и других зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5300 DV (Perkin Elmer, США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (BWB, Великобритания), pH — на приборе pH 325-B (WTW, Германия). Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При загрязнении почвы Ni происходило ингибирование роста яровой пшеницы в фазе выхода в трубку (табл. 1, рис. 1). Это выражалось в уменьшении в 2 раза массы вегетативных органов и целых растений относительно контроля — варианта без загрязнения ТМ и бактериальных инокуляций. Масса корней в условиях Ni-стресса уменьшилась более, чем в 2 раза. Внесение всех бактерий уменьшало токсическое действие ТМ на растения. При внесении бактерии *P. fluorescens* 20 вегетативная масса растений, подвергнутых Ni-стрессу, была более, чем в 1.5 раза больше в сравнении с вариантом с загрязнением почвы металлом без инокуляции бактериями. При этом растения, инокулированные *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23, имели на 44–47% большую вегетативную массу. Внесение бактерий при загрязнении Ni также способствовало лучшему росту корневой системы. Масса корней, загрязненных ТМ растений, при инокуляции *P. fluorescens* 21 увеличилась на 86%, а при инокуляции *P. fluorescens* 20 и *P. putida* 23 — на 70% и 16% соответственно. При применении наиболее эффективной бактерии *P. fluorescens* 20 вегетативная масса растений достигала 82%, остальных 2-х бактерий — 71–72% в сравнении с незагрязненными неинокулированными растениями — контролем. Корневая масса растений, инокулированных *P. fluorescens* 20 и *P. fluorescens* 21, составляла 68% и 74% соответственно, при инокуляции *P. putida* 23 — 46% относительно контрольного варианта.

В табл. 2 представлено содержание Ni в вегетативной массе и корневой системе растений. При-

менение бактерии *P. fluorescens* 20 не оказало существенного влияния на этот показатель в вегетативной массе, однако он увеличился на 28% в варианте с *P. fluorescens* 21 и, в особенности, с *P. putida* 23 – до 55% в сравнении с неинкулированными растениями. Содержание Ni в корневой системе растений под влиянием инокуляции бактерией *P. fluorescens* 20, существенно не изменилось, а при внесении *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 – увеличилось на 12–13%. При этом в корнях содержалось в десятки раз больше Ni, чем в надземной части растений. Применение бактерий увеличило вынос Ni (в мкг/сосуд) вегетативной массой растений в 1.3–2.1 раза из загрязненной тяжелым металлом почвы, причем в наибольшей степени – при инокуляции *P. fluorescens* 21 (табл. 3). Вынос Ni корнями в вариантах опыта был значительно больше по сравнению с вегетативной массой. Доля Ni в суммарной массе растений, составляла 1.9–3.8% от внесенного количества, увеличиваясь при инокуляции бактериями.

В табл. 4 представлены данные по содержанию биофильных элементов в растениях в фазе трубкования после завершения опыта. Внесение бактерий на фоне загрязнения почвы Ni не оказало

Таблица 1. Масса растений яровой пшеницы в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
	сухое вещество, г/сосуд		
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	2.44	1.08	3.52
Ni без инокуляции	1.20	0.43	1.63
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2.00	0.73	2.73
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	1.73	0.80	2.53
Ni + <i>P. putida</i> 23	1.76	0.50	2.26
<i>HCP</i> ₀₅	0.37	0.12	0.60

существенного влияния на содержание всех изученных макро- и микроэлементов в вегетативных органах и корневой системе растений по сравнению с вариантом без бактериальных инокуляций в загрязненных условиях. Относительно контрольного варианта (без внесения Ni и бактерий) при загрязнении почвы Ni как без внесения, так и при внесении бактерий, установлено увеличение в вегетативной массе содержания Mg – в 3.2–3.3,



Рис. 1. Вид растений пшеницы при инокуляции ризосферными бактериями и загрязнении почвы Ni: 1 – Без Ni и инокуляции бактериями (контроль), 2 – Ni без инокуляции, 3 – Ni + *P. fluorescens* 20, 4 – Ni + *P. fluorescens* 21, 5 – Ni + *P. putida* 23.

Таблица 2. Содержание Ni в растениях в фазе трубкования

Вариант	Содержание Ni	
	Вегетативная масса	Корни
	мкг/кг	%
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	8	0.02
Ni без инокуляции	254	1.21
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	265	1.27
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	325	1.37
Ni + <i>P. putida</i> 23	395	1.35

Примечание. Ошибки определения содержания Ni не превышали 15%.

Zn – в 1.7–2.1, Cu – в 1.8–2.3, фосфора – в 1.5–1.6 раза. Содержание Mn при этом увеличилось в меньшей степени. Напротив, в отличие от вышеупомянутых элементов, содержание Ca в вегетативной массе в загрязненных условиях уменьшилось до 2.1–2.5 раза. В корневой системе, как и в вегетативных органах загрязненных Ni растений, при этом установлено также значительное, в 2.1–2.4 раза, увеличение содержания Mg по сравнению с контролем. При загрязнении почвы Ni для Ca в корнях, напротив, в отличие от надземной части растений, во всех вариантах опыта, в том числе без бактерий, обнаружено увеличение содержания этого элемента в среднем больше, чем в 3 раза. Кроме того, при этом в корнях загрязненных Ni растений более значительно, в 1.7–2.0 раза, увеличилось содержание Fe, содержание P, Zn и Cu изменялось менее существенно, Mn – увеличилось примерно в такой же степени, как и в вегетативных органах. Под влиянием загрязнения Ni концентрация K в корнях, как и в вегетативной массе, во всех вариантах опыта изменялась незначительно. При загрязнении почвы Ni

как при бактериальных инокуляциях, так и без них, установлены лишь некоторые изменения содержания азота в надземной части растений, при некотором уменьшении этого показателя в корнях при инокуляции бактериями относительно контрольного варианта.

Применение бактерий в условиях Ni-стресса увеличило поступление всех элементов в вегетативные органы в среднем в 1.5–2.0 раза относительно варианта с загрязнением ТМ без инокуляции. Под влиянием внесения всех бактерий на фоне загрязнения почвы Ni также увеличился вынос корнями большинства элементов. Кроме этого, данный показатель изменился незначительно для N, K и Ca в варианте с *P. putida* 23 и для K в варианте с *P. fluorescens* 21 (табл. 5). Загрязнение почвы Ni без применения бактерий значительно уменьшило вынос (в мг/сосуд и мкг/сосуд) вегетативной массой растений большинства элементов, за исключением Mg, Zn и Cu по сравнению с контролем. При внесении Ni количество Mg в вегетативных органах не инокулированных бактериями растений, напротив, увеличилось в 1.5 раза, а Zn и Cu – не изменилось. Для корней неинокулированных растений при загрязнении почвы Ni для большинства элементов обнаружены аналогичные закономерности, кроме того, что в отличие от вегетативной массы происходило уменьшение выноса корнями Mg, Zn и Cu и некоторое увеличение этого показателя для Ca.

Внесение бактерий при загрязнении почвы Ni не оказывало существенного влияния на реакцию почвенной среды после срезания растений в фазе трубкования, а также по сравнению с исходной почвой (табл. 6). Некоторое уменьшение величины рН_{KCl} (на 0.18–0.20 ед.) было отмечено при внесении всех бактерий в загрязненных условиях относительно контрольного варианта.

Таблица 3. Вынос Ni растениями в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение	
	вынос Ni			
	мкг/сосуд			% от внесенной дозы
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	Следы	216	216	–
Ni без инокуляции	305	5200	5510	1.9
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	530	9270	9800	3.3
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	562	11 000	11 500	3.8
Ni + <i>P. putida</i> 23	695	6800	7450	2.5
HCP ₀₅	210	1300	1800	

Таблица 4. Содержание биофильных элементов в растениях яровой пшеницы

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	
	%				мкг/кг					
Вегетативная масса										
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	3.90	0.40	0.41	0.47	215	159	42	22	12	
Ni без инокуляции	4.05	0.60	0.36	0.19	685	180	54	45	22	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	4.10	0.59	0.38	0.20	710	179	57	45	23	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	4.30	0.60	0.34	0.22	694	183	45	38	25	
Ni + <i>P. putida</i> 23	4.30	0.63	0.31	0.22	684	175	50	38	28	
Корни										
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	3.11	0.58	2.12	0.54	663	0.23	277	89	144	
Ni без инокуляции	3.09	0.69	2.10	1.72	1380	0.39	333	103	144	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2.61	0.60	2.02	1.68	1380	0.42	420	99	162	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	2.91	0.70	1.78	1.90	1460	0.47	367	121	163	
Ni + <i>P. putida</i> 23	2.78	0.73	2.10	1.96	1590	0.47	378	110	166	

Примечания. 1. Содержание Fe в корнях дано в %. 2. Средние из 5-ти повторностей. 3. Ошибки определения макро- и микроэлементов в вариантах не превышали соответственно 5 и 15%.

Проведенное исследование показало, что применение стимулирующих рост растений бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 при внесении водорастворимого соединения Ni в агросерую почву в дозе 300 мг/кг почвы значительно уменьшило токсическое действие ТМ на растения яровой пшеницы в фазе трубкования. При этом установлена стимуляция роста растений и увеличение как массы вегетативных органов, так и корней, в загрязненных условиях. Бактериальные инокулянты, состоящие из бактерий рода *Pseudomonas*, обеспечивали увеличение массы растений нута в вегетационном опыте при концентрации 2 mM Ni [17]. Применение *Pseudomonas* sp. значительно увеличило массу горчицы сарептской (*Brassica juncea*) при выращивании на загрязненной Ni почве [18]. Установлено, что инокуляция ростстимулирующими псевдомонадами, в том числе обладающими способностью мобилизовать Ni в почве, значительно увеличила массу надземной части и корней 2-х видов растений рода *Brassica* [19]. Ранее, в результате проведения вегетационных опытов было установлено, что при загрязнении агросерой почвы соединениями Pb и Cd соответственно из расчета 200 мг Pb и 10 мг Cd/кг почвы внесение ростстимулирующих бактерий рода *Pseudomonas* полностью устраняло токсическое действие ТМ на растения ячменя. При этом применение бактерий обеспечивало получение такой же массы растений, как и выращенных без загрязнения почвы тяжелыми метал-

лами [11, 12]. Инокуляция исследованными бактериями при загрязнении Ni из расчета 300 мг/кг агросерой почвы, несмотря на значительное уменьшение негативного эффекта металла на растения яровой пшеницы, не устраняло его полностью. Вероятно, это было связано с использованием высокой дозы Ni, а также с большей чувствительностью к ТМ яровой пшеницы, чем ячменя.

Оказывая положительное влияние на рост растений яровой пшеницы, испытанные бактерии неоднозначно влияли на массу и содержание Ni в растениях. Внесение стимулирующей рост растений бактерии *Pseudomonas* sp. в загрязненную Ni почву увеличило биомассу горчицы сарептской и не оказывало влияния на содержание ТМ в растениях [18]. Инокуляция индийской горчицы (Indian mustard) бактерией *Pseudomonas* Ps29C, устойчивой к Ni и стимулирующей рост растений, защищала растения от металла, внесенного в различных концентрациях в почву, не влияя при этом на аккумуляцию Ni в побегах и корнях [20]. В наших исследованиях максимальные прибавки массы растений в загрязненных условиях были получены при применении бактерии *P. fluorescens* 20, без существенных изменений концентрации Ni в вегетативных органах и корневой системе. Применение этой бактерии увеличило вынос Ni вегетативными органами и корневой системой растений вследствие увеличения их массы, практически не оказывая влияния на содержание в растениях ТМ. В отличие от *P. fluorescens* 20 при

Таблица 5. Вынос биофильных элементов растениями яровой пшеницы

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	
	мг/сосуд				мкг/сосуд					
Вегетативная масса										
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	95	10	10	12	549	388	103	54	29	
Ni без инокуляции	49	7	4	2	822	216	65	54	26	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	82	12	8	4	1420	358	114	90	46	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	75	10	6	4	1200	317	78	62	43	
Ni + <i>P. putida</i> 23	77	11	6	4	1200	308	88	64	49	
Корни										
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	34	6	23	6	716	2500	299	96	155	
Ni без инокуляции	13	3	12	7	593	1690	143	44	62	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	19	4	15	12	1010	3640	268	72	118	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	23	6	12	10	729	2320	184	61	82	
Ni + <i>P. putida</i> 23	14	4	12	7	906	2700	216	63	95	
Целое растение										
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	129	16	33	18	1270	2890	402	150	184	
Ni без инокуляции	62	10	16	9	1420	1920	208	98	88	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	101	16	23	16	2430	3990	382	162	164	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	98	16	18	14	1930	2640	262	123	125	
Ni + <i>P. putida</i> 23	91	15	18	11	2110	3010	304	127	144	

инокуляции бактерией *P. fluorescens* 21 или *P. putida* 23 при несколько меньших прибавках вегетативной массы растений вынос Ni надземной массой увеличился в основном вследствие увеличения концентрации ТМ в вегетативных органах. Внесение всех бактерий, увеличивая вынос Ni вегетационной массой растений из загрязненной почвы, усиливало процесс фитоэкстракции, способствуя очистке почвы от ТМ. Этот процесс был

Таблица 6. Реакция почвенной среды после выращивания растений

Вариант	pH _{KCl}
Без Ni и инокуляции бактериями (контроль)	6.50 ± 0.07
Ni без инокуляции	6.42 ± 0.11
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	6.32 ± 0.08
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	6.30 ± 0.10
Ni + <i>P. putida</i> 23	6.31 ± 0.09
Исходная почва	6.34 ± 0.08

Примечание. Представлены средние из 5-ти повторностей ± отклонение от средней.

выражен в наибольшей степени при применении бактерии *P. putida* 23.

Увеличение поступления Ni в растения под влиянием бактерий происходило без существенных изменений реакции почвенной среды и, вероятно, было обусловлено экзометаболитами-сидерофорами, продуцируемыми бактериями. Бактериальные сидерофоры способны влиять на подвижность и биодоступность металлов в результате процессов подкисления, комплексообразования, осаждения и восстановления. В зависимости от состава и концентрации продуцируемых сидерофоров ризосферными микроорганизмами, а также свойств металла, возможно как увеличение, так и уменьшение его подвижности [21].

Положительное влияние испытанных бактерий на рост растений в условиях загрязнения почвы Ni и повышение устойчивости растений к токсическому действию ТМ при внесении бактерий можно объяснить увеличением накопления (в мг/сосуд и мкг/сосуд) биофильных элементов в вегетативной массе и корневой системе инокулированных растений и, следовательно, улучшением их минерального питания. Микроорганизмы, ассоциированные с растениями, могут стимули-

ровать их рост, оказывая положительное влияние на минеральное питание растений в условиях загрязнения ТМ [6]. Вынос биофильных элементов вегетативными органами и корневой системой загрязненных Ni растений в фазе трубкования при инокуляции бактериями увеличился вследствие увеличения массы растений, следовательно, в результате стимуляции ростовых процессов растений в целом без существенных изменений содержания элементов в вегетативных органах и корневой системе. Наши исследования показали, что под влиянием бактериальных инокуляций в условиях Ni-стресса происходило увеличение выноса растениями биофильных элементов из загрязненной почвы, в том числе Mg, который входит в состав хлорофилла и непосредственно участвует в процессе фотосинтеза, что вероятно, является ответной протекторной реакцией инокулированных бактериями растений на внесение Ni. Загрязнение почвы Ni без бактериальных инокуляций ингибировало рост растений, уменьшило массу растений и увеличило содержание Mg и ряда других элементов в вегетативной массе и корнях не инокулированных бактериями растений.

ВЫВОДЫ

1. Внесение ростстимулирующих ризосферных бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 в искусственно загрязненную Ni агропесчаную почву уменьшило фитотоксичность металла, стимулировало рост и увеличило массу вегетативных органов и корневой системы растений яровой пшеницы в фазе трубкования. Инокуляция бактериями не устраняла полностью токсическое действие на растения тяжелого металла, внесенного в дозе 300 мг/кг почвы. Максимальный эффект был обнаружен для *P. fluorescens* 20.

2. Внесение бактерий увеличило вынос Ni вегетативными органами растений из загрязненной почвы – усилило процесс фитоэкстракции в максимальной степени при применении *P. putida* 23. Бактерия *P. fluorescens* 20 увеличила вынос Ni вегетативными органами растений вследствие увеличения массы растений, не оказывая влияния на содержание в них тяжелого металла. Действие бактерий *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 проявилось вследствие как увеличения содержания Ni в вегетативных органах, так и массы растений.

3. Внесение бактерий увеличило вынос Ni корневой системой растений из загрязненной почвы, не влияя существенно на содержание тяжелого металла в корнях.

4. Повышение устойчивости растений к токсическому действию Ni при бактериальных ино-

куляциях было обусловлено улучшением минерального питания растений – увеличением выноса вегетативной массой и корневой системой из загрязненной почвы макроэлементов N, P, K, Ca и Mg, Fe и микроэлементов Mn, Zn и Cu и выноса большинства элементов корневой системой растений.

5. Увеличение выноса биофильных элементов растениями, инокулированными бактериями, из загрязненной почвы происходило вследствие стимуляции ростовых процессов, в целом без существенных изменений содержания элементов в растениях и, вероятно, было обусловлено ответной протекторной реакцией растений на загрязнение почвы Ni.

6. Загрязнение почвы Ni уменьшило вынос вегетативными органами неинокулированных растений большинства элементов и увеличило их вынос корневой системой, ингибируя рост растений по сравнению с контролем, а также оказывая влияние на содержание отдельных элементов (Mg, Ca, P, Fe, Mn, Zn и Cu) в растениях.

7. Загрязнение почвы Ni без бактериальных инокуляций в одинаковой степени с применением бактерий в загрязненных условиях увеличило содержание Mg в вегетативной массе растений при одновременном уменьшении содержания этого элемента в корнях. Применение бактерий увеличило вынос Mg из загрязненной почвы вегетативной массой и корневой системой растений.

8. Внесение бактерий в загрязненных условиях не сопровождалось существенными изменениями реакции почвенной среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почвы и определение зольных элементов в растениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейтрализация загрязненных почв // под ред. Мажайского Ю.А. Рязань: Мешерский ф-л ВНИИГиМ РАСХН, 2008. 528 с.
2. Назаров А.В., Иларионов С.А. Потенциал использования микробно-растительного взаимодействия для биоремедиации // Биотехнология. 2005. № 5. С. 54–62.
3. Khan M.S., Zaidi A., Wani P.A., Oves M. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils // Environ. Chem. Lett. 2009. V. 7. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0155-0>
4. Handsa A., Kumar V., Anshumali A., Usmani Z. Phytoremediation of heavy metals contaminated soil using plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A cur-

- rent perspective // Recent Research in Science Technology. 2014. V. 6. Issue 1. P. 131–134.
5. Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробитехнологиях // Агрехимия. 2018. № 10. С. 54–66. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100034>
 6. Chandel A.K., Chen H., Sharma H.Ch., Adhikari K., Gao B. Beneficial Microbes for Sustainable Agriculture // Microbes for Sustainable Development and Bioremediation. Chapter 15 / Eds. Chandra R., Solti R.C. Boca Raton: CRC Press, 2020. 386 pp. <https://doi.org/10.1201/9780429275876>
 7. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // Inter. J. Curr. Microbiol. Appl. Scis. 2017. V. 6. № 7. P. 1335–1344. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2017.602.160>
 8. Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R. A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings // Appl. Environ. Microbiol. 1998. V. 64. № 10. P. 3663–3668.
 9. Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., McCormack K., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R. The use of transgenic canola (*Brassica napus*) and plant growth-promoting bacteria to enhance plant biomass at a nickel-contaminated field site // Plant and Soil. 2006. V. 288. № 1–2. P. 309–318. doi: 1007/s11104-006-9119-y
 10. Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., McCormack K., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R. Tolerance of transgenic canola plants (*Brassica napus*) amended with plant growth-promoting bacteria to flooding stress at a metal-contaminated field site // Environ. Pollut. 2007. V. 147. № 3. P. 540–545. doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.014 <https://doi.org/10.1016/j.envpol>
 11. Шабает В.П. Почвенно-агрехимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // Почвоведение. 2012. № 5. С. 601–611. <https://doi.org/10.1134/S1064229312050134>
 12. Шабает В.П., Бочарникова Е.А., Остроумов В.Е. Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // Почвоведение. 2020. № 6. С. 738–750. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060118>
 13. Шабает В.П. Минеральное питание растений при инокуляции ростстимулирующими ризосферными бактериями рода *Pseudomonas* // Усп. совр. биол. 2012. Т. 132. № 3. С. 268–281.
 14. Шабает В.П. Микробиологическая азотфиксация и рост растений при внесении ризосферных микроорганизмов и минеральных удобрений // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 195–211.
 15. Шабает В.П. Отзывчивость сахарной свеклы на инокуляцию не фиксирующими азот и азотфиксирующими бактериями рода *Pseudomonas* на черноземе выщелоченном // Сел. биол. 2005. № 3. С. 55–59.
 16. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
 17. Tank N., Saraf M. Enhancement of plant growth and decontamination of nickel-spiked soil using PGPR // J. Basic Microbiology. 2009. V. 49. Iss. 2. P. 195–204. <https://doi.org/10.1002/jobm.200800090>
 18. Ma Y., Rajkumar M., Luo Y., Freitas H. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-effects on plant growth and Ni uptake // J. Hazard Mater. 2011. V. 195. P. 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.034>
 19. Ma Y., Rajkumar M., Freitas H. Isolation and characterization of Ni mobilizing PGPB from serpentine soils and their potential in promoting plant growth and Ni accumulation by *Brassica* sp. Chemosphere. 2009. V. 75. Iss. 6. P. 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.056>
 20. Rajkumar M., Freitas H. Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard // Bioresource Technol. 2008. V. 99. Iss. 9. P. 3491–3498. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.046>
 21. Mishra J., Singh R., Arora N.K. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms // Front. Microbiology. 2017. V. 8. Art. 1706. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>

Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Resistance of Spring Wheat to Ni Toxicity of Heavy Metal Contaminated Soil

V. P. Shabayev^{a, #} and V. E. Ostroumov^a

^a Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

[#]E-mail: VPSH@rambler.ru

The effects of plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Pseudomonas* on the growth of spring wheat plants under artificial Ni contamination of agrogray soil were studied in pot experiment. An increase in the resistance of plants to the toxic effect of metal at application of bacteria was found. Elemental composition of plants and uptake of nickel and biofilic elements in the shoots and roots of plants were studied. It is assumed that an increase in the uptake of biofilic elements in bacterially inoculated plants is a protective response of plants to soil contamination with Ni.

Key words: *Pseudomonas* sp., spring wheat plants, NiCl₂ · 6H₂O, agrogray soil, chemical composition of plants.

Ю.М. Логинов, Е.В. Газов, С.М. Кривенков. Определение агрохимических и химических показателей почв, растений и водных сред с использованием поточно-декадной технологии анализа / Под ред. Р.Ф. Байбекова. М., 2021 г. 350 с.

DOI: 10.31857/S0002188121110053

В 2021 г. вышла в свет книга авторов Ю.М. Логинова, Е.В. Газова, С.М. Кривенкова “Определение агрохимических и химических показателей почв, растений и водных сред с использованием поточно-декадной технологии анализа” под редакцией академика РАН Р.Ф. Байбекова. В данной публикации подробно описаны новые методы агрохимических исследований и методики определения химического состава почв, растений, растительных кормов, а также водных сред.

Определение этих показателей выполняется по поточно-декадной технологии, позволяющей обеспечивать высокую производительность и требуемую точность аналитических работ с использованием технологического оборудования и аналитических приборов, приведенных в отдельном разделе книги.

В публикации описываются новые методики анализов фосфора и калия, которые более правильно оценивают содержание подвижного фосфора, доступного для растений. Приведен усовершенствованный метод количественного определения органического вещества в почве. Предложен новый высокопроизводительный метод определения сульфатов в водной вытяжке из почв и в водных средах. Представлена новая методика и технология массового определения магния в одномолярной хлор-калиевой вытяжке (1 М КСl) из почв. Дано описание унифицированного высокопроизводительного метода определения кальция в 1 М КСl-вытяжке из почв, насыщенных и не насыщенных основаниями.

Предложены другие разработки и усовершенствования методов анализа различных показателей в почвах, растениях и водных средах.

Все описанные методы химических анализов объектов базируются на новейших аналитических исследованиях, а также на разработках аналитического и технологического оборудования, выполненных в России в последние годы, которые поставляются как в российские аналитические лаборатории, так и в лаборатории других стран. Основные разработки описанных технологий, методов анализа и оборудования защищены патентами и свидетельствами на изобретения в России. В приложении к книге приведен список и количество реактивов, необходимых для определения химического состава многих объектов и соответствующих методов анализа.

Книга будет представлять интерес для специалистов и организаций, занимающихся оценкой плодородия почв и определением качества растениеводческой продукции, контролем аналитических показателей в водных средах с целью оценки безопасности для людей и животных, а также для организаций, занимающихся рекультивацией земель.

Финансирование публикации книги осуществило ООО “КИНЖ-АГРО” в лице генерального директора В.А. Газова. Сайт: www.kinzh-agro.ru. Для приобретения книги следует обратиться по указанным координатам.

Р. Ф. Байбеков

Памяти Монастырского Олега Александровича (1936–2021)

DOI: 10.31857/S000218812108010X



После продолжительной болезни 27 марта 2021 года ушел из жизни старейший сотрудник Федерального научного центра биологической защиты растений Олег Александрович Монастырский. Вся его научная деятельность была связана с исследованиями в области защиты сельскохозяйственных растений. Он работал в институте с 1972 г. сначала в должности заведующего отделом, а с 1981 г. — заведующим лабораторией молекулярной биологии и генетики. Затем, в связи с изменением наименования и профиля работы института О.А. Монастырский стал заведующим лабораторией токсигенных микроорганизмов и биобезопасности сельскохозяйственной продукции. Под руководством О.А. Монастырского и при его ведущем участии были разработаны и опубликованы стратегия создания защитных биопрепаратов, теория интегрированной токсичности, созданы и запатентованы защитные биопрепараты дизофунгин, дизофунгин плюс, батан и пролам. Под его руководством были созданы промышленные регламенты производства оригинальных средств биологической защиты растений и совместно с фирмой ООО “Биотехагро” на-

лажен полупроизводственный выпуск препаратов и их производственное испытание в ведущих хозяйствах Южного федерального округа. Разработки Олега Александровича были отмечены наградами на Всероссийском и региональном уровнях. На 3-м Московском международном салоне инноваций и инвестиций в 2003 г. его разработка была отмечена большой серебряной медалью. В 2005 г. Олегу Александровичу присвоено звание Заслуженного деятеля науки Кубани.

Под его руководством проводилась большая работа по мониторингу пораженности токсигенными микроорганизмами и загрязнения опасными микотоксинами зерна и продуктов его переработки в крупных зернопроизводящих хозяйствах, а также зернохранилищах крупных животноводческих комплексов и птицефабрик. Им ежегодно проводились всероссийские семинары по защите от токсигенных организмов и биобезопасности.

О.А. Монастырским опубликовано более 250 научных работ, получено 12 авторских свидетельств и патентов, в соавторстве опубликовано 4 монографии. В разные годы печатные работы Олега Александровича публиковались в таких уважаемых журналах как “Защита и карантин растений”, “Агрохимия”, “Агро XXI”, “Сельскохозяйственная биология”, “Вестник российской сельскохозяйственной науки”, “Информационный бюллетень Министерства сельского хозяйства Российской Федерации” и др.

О.А. Монастырский являлся членом редколлегии ряда научных журналов. Под его руководством подготовлены и защищены три кандидатских диссертации.

Выражаем соболезнования родным и близким О.А. Монастырского. Светлая память об Олеге Александровиче будет жить в сердцах его коллег, учеников и друзей, всех, кто его знал и ценил.

*Федеральный научный центр биологической
защиты растений
Редакция журнала “Агрохимия”*