ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ Плодородие почв

Влияние длительного применения минеральных удобрений на экофизиологические показатели микробоценозов дерново-подзолистой почвы Предуралья	
Н. Е. Завьялова, Н. П. Ковалевская, Д. Ю. Шаравин	3
Сорбция гуминовых веществ черноольхового низинного торфа на монтмориллонитсодержащих глинах	
В. Т. Каримова, Е. Д. Дмитриева, К. В. Сюндюкова	9
Изменение содержания и состава органического вещества черноземов Приазовья при использовании технологии прямого посева	
Г. В. Мокриков, Т. В. Минникова, М. А. Мясникова, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников	18
Изменение свойств песчаной почвы после конверсии пахотных угодий в другие виды землепользования	
А. Казлаускайте-Ядзявиче, Л. Трипольская, Й. Волунгевичюс, Е. Бакшене	25
Удобрения	
Влияние различных систем удобрения и известкования на урожайность, технологические и хлебопекарные качества зерна озимой пшеницы в условиях Северного Нечерноземья	
А. Н. Налиухин, Д. А. Белозёров	33
Продуктивность звена зерносвекловичного севооборота при длительном применении удобрений (1936—2017 гг.)	
О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина, В. М. Вилков	43
Агроэкология	
- Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва—растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой	
С. Е. Витковская, К. Ф. Шаврина, О. Н. Яковлев	50
Потери Ca, Mg, K, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювиирования (по данным лабораторного опыта)	
А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре	58
Оценка дыхания лугово-болотных почв дельты р. Селенги (Западное Забайкалье)	
Е. Ю. Мильхеев	70
Экотоксикология	
Биовынос ¹³⁷ Cs и нитратов многолетними травами при известковании дерново-подзолистых песчаных почв	
С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский	75
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	
Модернизированный метод определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из почв с использованием технологии массовых анализов	
Ю. М. Логинов	81
Правила для авторов	94
A	

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Effect of Prolonged Application of Mineral Fertilizers on the Physiological Indices of Microbiocenosis of Sod-Podzolic Soils of the Cis-Urals	
N. E. Zavyalova, N. P. Kovalevskaya, D. Yu. Sharavin	3
Sorption of Humic Substances of Black Alder Low-Lying Peat on Montmorillonite Containing Clays V. T. Karimova, E. D. Dmitrieva, K. V. Siundiukova	9
Changes in the Content and Composition of Organic Matter of Chernozems of the Azov Region with the Use of Direct Seeding Technology	
G. V. Mokrikov, T. V. Vinnikova, M. A. Myasnikova, K. S. Kazeev, S. I. Kolesnikov	18
Changes of Loamy Sand Soil Properties Following Conversion of Arable Soils to Other Land Use Types	
A. Kazlauskaite-Jadzevice, L. Tripolskaja, J. Volungevicius, A. Baksiene	25
Fertilizers	
Influence of Different Fertilization Systems and Lime on Yield, Technological and Baking Qualities of Winter Wheat Grain in a Northern Part of Non-Chernozem Zone	22
A. N. Naliukhin, D. A. Belozerov Productivity of Different Grain-Beet Crop Rotation Types when Applying Fertilizers for a Long Time (1936 –2017)	33
O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, T. N. Podvigina, V. M. Vilkov	43
Agroecology	
0	
Productivity of Plants of Barley and Interaction of Zinc, Calcium and Magnesia in the Soil—Plant System at Neutralization of the Soil Acidity Dolomitic Flour	50
S. E. Vitkovskaya, K. F. Shavrina, O. N. Yakovlev	50
Losses of Ca, Mg, K, Na, Fe and F from Irrigated Meadow-Gray Soil as a Result of Migration. Empirical Models of the Eluviation Process (According to Laboratory Experience)	
A. V. Litvinovich, O. Yu. Pavlova, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure	58
Evaluation of meadow-boggy soil respiration of the Delta Selenga River (Western Transbaikalia) E. Yu. Milheev	70
Ecotoxicology	
Biocarrying Out ¹³⁷ Cs and Nitrates Long-Term Herbs at Lime Application of Cespitose and Podsolic Sandy Soils	
S. M. Pakshina, L. P. Harkevich, N. M. Belous, E. V. Smolsky	75
RESEARCH METHODS	
Modernized Method for Determination of Phosphorus and Potassium in Carbon Ammonium Extract from Soils Using Mass Analysis Technology	
Yu. M. Loginov	81
Rules for authors	94

_____ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ _____ Плодородие почв

УЛК 631.42:631.46

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОБОЦЕНОЗОВ ДЕРНОВО-ПОЛЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРЕДУРАЛЬЯ¹

© 2020 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, Н. П. Ковалевская^{2,**}, Д. Ю. Шаравин²

¹ Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН 614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

² Институт экологии и генетики микроорганизмов ПФИЦ УрО РАН 614081 Пермь, Пермский край, ул. Голева, 13, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

**E-mail: nina_kov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2019 г.

Поступила в редакцию 19.02.2019 г. После доработки 12.03.2019 г. Принята к публикации 10.10.2019 г.

Применение минеральных удобрений в возрастающих дозах NPK в полевом севообороте длительного стационарного опыта замедлило минерализацию гумусовых веществ в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, способствовало увеличению содержания углерода водной вытяжки с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте без внесения удобрений до 303 мг/кг в варианте N150P150K150 Содержание подвижной фракции углерода, извлекаемого 0.1 M NaOH, изменялось от 0.26 до 0.37%, доля лабильного органического вещества к массе почвы составила 0.26-0.47%. Отмечено увеличение общего, легкогидролизуемого и минерального азота в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза соответственно. Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов были выявлены в варианте N60P60K60, где содержание микробной биомассы составляло 2.96% от Сорг и превышало показатель контроля в 1.26 раза. По величине базального (БД) и субстрат-индуцированного (СИД) дыхания изученные варианты длительного стационарного опыта аналогичны естественным дерново-подзолистым почвам. При внесении NPK в возрастающих дозах отмечена тенденция к уменьшению БД на 17-24%, увеличения СИД на 17-26% относительно неудобренной почвы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель qCO $_2$ соответствовал 0.985 мкг C-CO $_2$ /мг С $_{\text{микр}}$ /ч. В вариантах с минеральными удобрениями отмечено снижение показателя QR, выявлена слабая степень нарушения устойчивости микробоценоза, минимальная его величина была зафиксирована при применении N60P60K60 и N120P120K120 и составила 0.26.

Ключевые слова: длительное применение минеральных удобрений, экофизиологические показатели, микробоценозы, дерново-подзолистая почва, Предуралье.

DOI: 10.31857/S0002188120010147

ВВЕДЕНИЕ

Положительное влияние на баланс почвенного органического вещества (ПОВ) оказывают органические и минеральные удобрения, многолетние травы в структуре севооборота, обработка почвы и другие агротехнические приемы [1—3]. Для выявления ответной реакции почвенной микрофлоры на антропогенное воздействие на почву используют комплекс экофизиологических

показателей активности микробоценоза: базальное дыхание (БД), субстрат-индуцированное дыхание (СИД), интенсивность азотфиксации. Верхний горизонт почвы, в котором расположена основная масса корней растений, характеризуется наибольшей биологической активностью. При определении краткосрочной динамики $C_{\rm opr}$, диагностики состояния почвенного органического вещества и оценки эффективности мероприятий по воспроизводству ПОВ следует измерять не столько валовое количество $C_{\rm opr}$, сколько его содержание в химически лабильных и биологиче-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-45-590166 р а).

ски активных пулах и фракциях. Биологически активный пул ПОВ со временем оборачиваемости от <3 до 10 лет ответственен за реализацию большинства физических, химических, биологических, экологических и агрономических функций органического вещества (OB) в почве [4, 5].

Важнейшим источником поступления азота в почву служит биологический, фиксируемый микроорганизмами азот атмосферы, составляющий более половины общего количества этого элемента, поступающего в почву из разных источников. Последействие разных систем удобрения на биологическую азотфиксацию изучали в работе [6]. Наибольший уровень азотфиксирующей и денитрифицирующей активности и положительный баланс биологического азота обеспечили почвы фонов, сформированных с участием органических удобрений. Наличие растений повысило активность этих процессов и снизило долю закиси азота в потерях за счет денитрификации. При внесении минеральных азотных удобрений баланс биологического азота был отрицательным.

Цель работы — изучить влияние длительного применения возрастающих доз полного минерального удобрения на экофизиологические показатели активности микробоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой стационарный опыт по изучению влияния различных доз минеральных удобрений на качество ПОВ и урожайность полевых культур заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой почве со следующими характеристиками (слой 0-20 см): pH_{KCI} 5.6, гидролитическая кислотность -2.0, обменная -0.025, сумма поглощенных оснований -21.0 мг-экв/100 г почвы, содержание органического углерода - 1.23%, подвижных форм фосфора — 175, обменного калия— 203 мг/кг почвы (по Кирсанову). Варианты опыта включали 6 уровней минерального питания: N0P0K0, N30P30K30, N60P60K60, N90P90K90, N120P120K120, N150P150K150. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, в посеве клевера изучали последействие. В опыте использовали N_{aa} , $P_{c_{\pi}}$ и K_{x} . Известь вносили перед закладкой опыта в дозе по $1.0\ H_{\rm r}$. Органические удобрения в опыте не использовали. Севооборот — 8-польный со следующим чередованием культур: чистый пар — озимая рожь — картофель – пшеница – клевер 1-го года пользования – клевер 2-го года пользования — ячмень — овес. Общая площадь делянки 120 м^2 , учетная -76.4 м^2 . Опыт заложен в двукратной повторности, размещение вариантов рендомизированное. Почвенные образцы для исследования отбирали ручным буром в конце 5-й ротации севооборота после уборки овса с 2-х несмежных повторений в слое 0-20 см почвы в 3-х точках с каждой делянки. Содержание органического углерода в почве определяли методом бихроматного окисления, общий азот — по Кьельдалю, углерод, экстрагируемый горячей водой (C_{318}), — 0.1 н. раствором NaOH, 0.1 M Na₄P₂O₇ при рH 7.0 — по методу [7]. Параметры гумусовой системы оценивали по уточненной системе показателей [8].

Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода и энергии (глюкозой). Во флаконы помещали навеску почвы (1 г) и прединкубировали в течение 3 ч при 22°C. После проветривания во флаконы добавляли 0.4 мл 4%-ного раствора глюкозы и инкубировали при 22°C в течение 3-4 ч. Концентрацию СО₂ определяли на хроматографе Chrom 5 на колонке длиной 1.8 м, внутренним диаметром 3 мм с наполнителем Porapak N. В качестве детектора использовали катарометр. Повторность измерений трехкратная. Субстрат-индуцированное дыхание почвы оценивали по скорости начального максимального микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой. Углерод микробной биомассы рассчитывали по формуле:

 ${
m C}_{{
m микр}}$ (мкг С/г почвы) = СИД (мкг СО $_2$ /г/ч) × \times 40.04 + 0.37. Показатели почвенного дыхания выражали в мкг СО $_2$ /г почвы/ч. Микробный метаболический коэффициент рассчитывали как отношение скорости базального дыхания к величине микробной биомассы: БД : ${
m C}_{{
m микр}} = q{
m CO}_2$ (мкг С-СО $_2$: (мг С $_{{
m микр}}$ /ч)). Углерод микробной биомассы рассчитывали по формуле: С $_{{
m микр}}$ (мкг С/г почвы) = СИД (мкг СО $_2$ /г сухой почвы/ч) × \times 40.04 + 0.37 [9, 10].

Для определения активности азотфиксации применяли классический ацетиленовый метод. Во флаконы помещали навеску почвы (1 г), вносили 0.5 объема раствором 2%-ной глюкозы, закрывали флакон и замещали оставшийся объем воздуха ацетиленом. Далее инкубировали при 28°С в течение 24 ч. Количественные измерения этилена проводили на хроматографе Chrom 5. Потенциальную активность азотфиксации выражали в мкг этилена/кг почвы/ч [11]. Измерения Сорг, СИД, БД, азотфиксации проводили в индивидуальных образцах в шестикратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Microsoft Excel 2007.

Вариант	pH _{KCl}	Сорг, %	N _{общ} , мг/кг	N _{лг} , мг/кг	N _{мин} , мг/кг	$C_{\Gamma K}: C_{\Phi K}$	С _{эгв} , мг/кг	С _{0.1н. NаОН} ,	C _{0.1 M Na₄P₂O₇, %}
N0P0K0	5.1	1.04	1120	112	20.2	0.70	168	0.28	0.26
N30P30K30	5.0	1.06	1210	120	48.4	0.80	200	0.26	0.28
N60P60K60	4.9	1.19	1380	134	67.3	0.83	243	0.26	0.32
N90P90K90	4.8	1.25	1490	175	81.5	0.88	274	0.31	0.35
N120P120K120	4.7	1.24	1610	221	84.4	0.94	293	0.34	0.41
N150P150K150	4.5	1.25	1760	256	108	0.98	305	0.37	0.47
HCP_{05}	0.2	0.06	60	12	5.2	_	20	0.03	0.04

Таблица 1. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой почвы

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минерализуемый пул органического вещества пахотных почв рассматривается как совокупность растительных остатков, микробной биомассы и подвижного гумуса. Поступление органического углерода в виде корневых и пожнивных остатков в 8-польном севообороте с 2-мя полями клевера при внесении минеральных удобрений в дозах N90P90K90-N150P150K150 привело к восстановлению исходного содержания углерода в почве (1.23%) (табл. 1). В варианте N150P150K150 установлено повышение содержания общего ($\mathbf{N}_{ exttt{ofm}}$), легкогидролизуемого ($\mathbf{N}_{ exttt{ir}}$) и минерального азота ($N_{\text{мин}}$) в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза. При многолетнем изучении состава гумуса дерново-подзолистой почвы при возрастающих дозах NPK было отмечено изменение его состава и повышение степени гумификации органического вещества на минеральном фоне питания, что позволило обосновать возможность применения показателей фракционного состава гумусовых кислот при оценке направленности и интенсивности трансформации органического вещества. При внесении удобрений больше N90P90K90 отмечено увеличение показателя $C_{\Gamma K}$: $C_{\Phi K}$ до 0.94–0.98.

Длительное воздействие минеральных удобрений повлияло прежде всего на активную часть органического вещества почвы, которая непосредственно участвует в круговороте углерода в процессе возделывания сельскохозяйственных культур [5, 12]. Внесение в почву возрастающих доз NPK привело к увеличению содержания углерода, экстрагируемого горячей водой с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте до 303 мг/кг в варианте N150P150K150. Содержание подвижной фракции углерода изменялось от 0.26 до 0.37% к массе почвы. Доля лабильного органического вещества к массе почвы составляла 0.26-0.47%, что было характерно для дерново-подзолистых почв [13]. Минеральные удобрения способствовали повышению подвижности органического вещества.

Установлена тесная корреляционная связь между содержанием экстрагируемых компонентов OB и общего углерода в почве: r = 0.94-0.96 ($P \le 0.05$).

Важным показателем динамики свойств пахотных почв является их микробиологическая активность, которая меняется гораздо быстрее, чем содержание общего углерода. Углерод микробной биомассы - важный параметр во многих экологических исследованиях, т.к. является функциональной частью почвенного органического вещества. Показано, что величина микробной биомассы – более чувствительный параметр к изменениям окружающей среды, чем, например, содержание органического вещества в почве. В зависимости от дозы NPK, содержание $C_{\text{орг}}$ (табл. 2) менялось от 104 до 125 мг/г почвы. При внесении минеральных улобрений в лозах N30P30K30-N150P150K150 отмечено увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ на 1.7-20.0% относительно варианта без удобрений.

Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Эти величины характерны для дерново-подзолистых почв [14, 15]. Величина Смикр в значительной степени зависела от приемов землепользования. В исследованной почве она была больше в удобренных вариантах. Доля углерода микробной биомассы в составе органического углерода почвы — важный показатель качества органического вещества. Он характеризует состояние и разнообразие микробоценоза, а также степень его зрелости [16]. Минимальное соотношение $C_{\text{микр}}$: $C_{\text{орг}}$ определено при дозе N90P90K90 и было равно 2.71. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов бывариантах N60P60K60 выявлены В N150P150K150, где содержание микробной биомассы составляло 2.92 и 2.96% от $C_{\rm opr}$ и превышало показатель контроля в 1.26 и 1.22 раза соответственно. По-видимому, количество поступавших растительных остатков в почву в этих вариантах было достаточным для компенсации потребно-

Таблица 2. Влияние доз минеральных удобрений на содержание микробной биомассы

держани					
	$\mathbf{y}_{\Gamma \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \!$	ерод био	массы (С	C _{MÓ})	
С _{орг.} , мг/г			С _{микр} : С _{орг} , ОУОН СООГ СМИКР : СО.1 М NAOH: %		qCO_2 (MKF C-CO ₂ : MF C_{MHKp}/Ψ
		N0I	P0K0		
104	290	2.78	10.4	11.2	0.985
		N60P	60K60	ı	I
120	354	2.96	13.6	11.1	0.649
		N90P	90K90	ı	I
125	338	2.71	10.9	9.67	0.724
'	'	N120P	120K120	1	ı
124	355	2.88	10.4	8.17	0.647
!	. !	N150P	150K150	•	
125	366	2.92	9.9	7.78	0.657

стей микроорганизмов в углероде. Микробный метаболический коэффициент (qCO₂) количественно описывает физиологический статус микробного сообщества и чувствителен к нарушениям в почве, по его величине можно прогнозировать продолжительность и глубину нарушений в почвенных экосистемах [17, 18]. Высокая величина qCO_2 характерна для молодых и сильно нарушенных экосистем, более низкая – для старых или стабильных экосистем. Высокий qCO_2 связан также с большей скоростью отмирания микробной биомассы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель qCO $_2$ соответствовал 0.985 мкг $C-CO_2/M\Gamma$ C_{MUKD}/Ψ (табл. 2). Улучшение функционирования микробоценоза почвы наблюдали при применении N60P60K60-N150P150K150, где показатели qCO $_2$ соответствовали 0.647 и 0.724 мкг С- $CO_2/M\Gamma C_{MUKD}/Ч$.

Важнейшим показателем, определяющим интенсивность минерализации органического вещества почвы при внесении удобрений, являются скорость продуцирования углекислого газа (табл. 3). Базальное дыхание (БД) почвенной микрофлоры характеризует доступность органического углерода в почве, отражает интенсивность минерализации органических веществ. В исследованной дерново-подзолистой почве скорость БД при внесении минеральных удобрений в сравнении с контролем (2.86 мкг $C-CO_2/\Gamma/4$) во всех вариантах снижалась. Минимальные показатели БД были получены при применении N60P60K60 и N120P120K120 и соответствовали 2.30 мкг С-СО₂/г/ч. Микроорганизмы исследованных почв обладали высокой активностью к использованию легкогидролизуемого источника углерода (глюкозы), по скорости потребления которой судят об их потенциальной биохимической активности. Скорость СИД увеличилась при внесении минеральных удобрений в возрастающих дозах. Максимальную величину СИД (9.12) зафиксировали при применении N150P150K150, что превышало СИД в контроле в 1.26 раза.

Коэффициент микробного дыхания (OR) считается интегральным показателем, позволяющим оценивать экологическое состояние почв. Его величина дает представление о запасах питательных веществ в почве, устойчивости системы микробного сообщества, отражает степень антропогенного или климатического воздействия на почвенные ценозы [19, 20]. Величины QR могут быть ранжированы к антропогенным воздействиям. Чем меньше показатель QR, тем меньше выявляется нарушений в качественном и количественном составе почвенной биоты. Оптимальные показатели OR находятся в пределах от 0.1 до 0.2 (0.3) и характерны для естественных биоценозов при оптимальных климатических условиях [17, 20-221. В контрольном варианте N0P0K0 показатель QR соответствовал 0.395, что свидетельствовало о средней степени нарушения устойчивости микробного сообщества почвы. В вариантах с минеральными удобрениями отмечено снижение этого показателя, минимальные показатели QR

Таблица 3. Биологические показатели состояния микробного сообщества

Показатель		Варианты								
Показатель	N0P0K0	N60P60K60	N90P90K90	N120P120K120	N150P150K150					
БД, мкг С-СО ₂ /г/ч	2.86 ± 0.28	2.30 ± 0.05	2.45 ± 0.09	2.30 ± 0.21	2.40 ± 0.14					
СИД, мкг С-СО $_2$ /г/ч	7.24 ± 1.33	8.84 ± 1.18	8.44 ± 0.32	8.86 ± 0.78	9.12 ± 0.31					
QR	0.395	0.260	0.290	0.260	0.263					
Азотфиксация, мкг $C_2H_4/кг/ч$	32.1 ± 3.8	46.8 ± 11.4	68.7 ± 10.9	57.1 ± 13.6	53.1 ± 11.1					

были зафиксированы при N60P60K60 и N120P120K120 и соответствовали 0.26 (слабая нарушенность устойчивости микробоценоза).

Важный процесс, характеризующий интенсивность биологических процессов в почве азотфиксация. В природных биоценозах азот не является лимитирующим их продуктивность фактором, поскольку все звенья биогеохимического цикла сбалансированы. В агроэкосистемах он сильно нарушен из-за регулярных обработок почвы, севооборотов и выноса значительного количества азота урожаем [23]. Показано, что азотфиксирующая активность микробных сообществ дерново-подзолистой почвы возрастала с увеличением доз минеральных удобрений от 32.1 в варианте без удобрений до 68.7 мкг $C_2H_4/кг/ч$ в вариантах N30P30K30-N90P90K90. Тенденция к снижению биологической фиксации азота была зафиксирована при применении N120P120K120 и N150P150K150, где азотфиксирующая активность соответствовала 57.1 и 53.1 мкг C_2H_4 кг/ч/, т.е. на 17 и 23% меньше, чем при N90Р90К90. Вероятно. что снижение азотфиксирующей активности микроорганизмов при высоких дозах минеральных удобрений связано с изменением кислотнощелочных условий почвенного раствора (рН 4.8— 4.5), возрастанием содержания легкогидролизуемого и минерального азота (в 4-5 раз больше контроля). Наличие в севообороте 2-х полей клевера также могло изменить в почве соотношение несимбиотических и симбиотических азотфиксирующих бактерий. Бобовые культуры, выращиваемые на фоне применения высоких доз азотных удобрений, как правило, снижают способность к симбиотической азотфиксации [24].

выводы

- 1. Применение минеральных удобрений в дозах NPK 90—150 кг д.в./га привело к сохранению исходного содержания углерода (1.23%) в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, повысило подвижность органического вещества: содержание углерода водной вытяжки с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте до 303 мг/кг в варианте применения N150P150K150. Содержание подвижной фракции углерода, извлекаемого 0.1 М NaOH, изменялось от 0.26 до 0.37%, доля лабильного органического вещества к массе почвы составила 0.26—0.47%. Отмечено увеличение содержания общего, легкогидролизуемого и минерального азота в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза соответственно.
- 2. Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов были выяв-

лены в варианте применения N60P60K60, где содержание микробной биомассы составляло 2.96% от $C_{\text{орг}}$ и превышало показатель контроля в 1.26 раза. По величине базального и субстрат-индушированного дыхания изученные варианты почвы длительного стационарного опыта были аналогичны естественным дерново-подзолистым почвам. При внесении NPK в возрастающих дозах отмечена тенденция уменьшения почвенного базального дыхания (БД) на 17-24%, увеличения субстрат-индуцированного дыхания (СИД) на 17-26% относительно неудобренной почвы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель qCO₂ соответствовал 0.985 мкг C-CO₂/мг Смикр/ч. В вариантах с применением минеральных удобрений отмечено снижение показателя *OR*, выявлена слабая нарушенность устойчивости микробоценоза, минимальная его величина была зафиксирована при применении N60P60K60 и N120P120K120 и составила 0.26.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н.* Проблемы углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3—12.
- 2. Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А., Шевцова Л.К., Королева П.В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. М.: ВНИИА, 2009. 96 с.
- 3. Зинякова Н.Б., Ходжаева А.К., Тулина А.С., Семенов В.М. Активное органическое вещество в серой лесной почве пахотных и залежных земель // Агрохимия. 2013. № 9. С. 3—14.
- Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53—63.
- 5. Семенов В.М., Когут Б.М., Лукин С.М., Шарков И.Н., Русакова И.В., Тулина А.С., Лазарев В.Й. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 3. С. 19—31.
- Егоров В.С. Последействие разных систем удобрения на процессы несимбиотической азотфиксации и денитрификации на дерново-подзолистой почве // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 1. С. 13—16.
- 7. Методы определения активных компонентов в составе гумуса. М.: ВНИИА, 2010. 34 с.
- 8. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918—926.
- 9. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327—1333.

- 10. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
- 11. Эмер Н.Р., Семенов А.М., Зеленев В.В., Зинякова Н.Б., Костина Н.В., Голиченков М.В. Ежесуточная динамика численности и активности азотфиксирующих бактерий на участках залежной и интенсивно возделываемой почвы // Почвоведение. 2014. № 8. С. 963—970.
- 12. Дричко В.Ф., Бакина Л.Г., Орлова Н.Е. Устойчивая и лабильная части гумуса дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2013 № 2. С. 41–47.
- Завьялова Н.Е. Методические подходы к изучению гумусного состояния пахотных почв // Плодородие. 2006. № 1. С. 11–15.
- 14. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольникова Е.В. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1109—1116.
- 15. *Гончарова О.В., Телеснина В.М.* Биологическая активность постагрогенных почв (на примере Московской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2010. № 4. С. 24—31.
- 16. *Insam H.*, *Domsch K.H.* Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites // Microb. Ecol. 1988. № 15. P. 177–188.
- 17. *Ананьева Н.Д., Благолатская Е.В., Демкина Т.С.* Пространственное и временное варьирование

- микробного метаболического коэффициента в почвах // Почвоведение. 2002. № 10. С. 1233—1241.
- Фрунзе Н.И. Респираторная активность микробных сообществ пахотного чернозема Молдовы // Агрохимия. 2018. № 4. С. 59–64.
- Anderson T.H., Domsch K.H Application of eco-physiological quotient CO₂ (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soil of different cropping histories // Soil Biol. Biochem. 1990. V. 22. № 2. P. 251–255.
- 20. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С. Оценка устойчивости микробных комплексов почв к природным и антропогенным воздействиям // Почвоведение. 2002. № 5. С. 580—587.
- 21. *Жукова А.Д., Хомяков Д.М.* Показатели микробного дыхания в почвенном покрове импактной зоны предприятия по производству минеральных удобрений // Почвоведение. 2015. № 8. С. 984—992.
- Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н.
 Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. 1995. № 2. С. 205–210.
- 23. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087—1096.
- 24. *Никитишен В.И.*, *Личко В.И.* Баланс азота в агроэкосистемах на серых лесных почвах при длительном внесении удобрений // Почвоведение. 2008. № 4. С. 481–493.

Effect of Prolonged Application of Mineral Fertilizers on the Physiological Indices of Microbiocenosis of Sod-Podzolic Soils of the Cis-Urals

N. E. Zavyalova^{a,#}, N. P. Kovalevskaya^{b,##}, and D. Yu. Sharavin^b

^a Perm Research Institute of Agriculture RAS ul. Kultury 12, Perm Region, p. Lobanovo 614532, Russia ^bInstitute of Ecology and Genetics of Microorganisms RAS ul. Goleva 13, Perm Region, Perm 614081, Russia [#]E-mail: nezavyalova@gmail.com ^{##}E-mail: nina kov@mail.ru

The usage of mineral fertilizers in increasing doses of NPK in the field crop rotation of a long stationary experiment slowed down the mineralization of humus substances in sod-podzolic heavy loamy soil, made extracts from 168 mg/kg of soil in the control variant up to 303 mg/kg in variant N150P150K150. The content of the mobile fraction of carbon extracted by 0.1 M of NaOH varied from 0.26 to 0.37%, the share of labile organic matter to the mass of soil was 0.26–0.47%. An increase in total, easily hydrolysable and mineral nitrogen was noted in comparison with the control 1.58, 2.29 and 5.35 times, respectively. The carbon content of microbial biomass varied in the variants of the experiment from 290 to 366 mg/g of soil. The most favorable conditions for the development of soil microbiocenoses were identified in variants N60P60K60 and N150P150K150, where the content of microbial biomass was 2.92 and 2.96% of $C_{\rm org}$ and exceeded the control indicator 1.26 and 1.22 times. In terms of the basal and substrate-induced respiration, the studied soil variants of the long-term stationary experiment are similar to the natural sod-podzolic soils. When NPK was applied in increasing doses, a decrease in the basal respiration (BR) by 17–24%, an increase in the substrate-induced respiration (SIR) by 17–26% relative to non-fertilized soil is noted. The highest specific respiration of microbial biomass was recorded in the control, the qCO2 indicator corresponded to 0.985 mg C-CO2/mg $C_{\rm micr}/h$. In the variants with mineral fertilizers, a decrease in the QR index was observed, a weak degree of impaired microbiocenosis resistance was detected, its minimum values were recorded at N60P60K60 and N120P120K120 and corresponded 0.26.

Key words: prolonged application of mineral fertilizers, physiological indices, microbiocenosis, sod-podzolic soils, Cis-Urals.

УЛК 631.417

СОРБЦИЯ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ЧЕРНООЛЬХОВОГО НИЗИННОГО ТОРФА НА МОНТМОРИЛЛОНИТСОДЕРЖАЩИХ ГЛИНАХ

© 2020 г. В. Т. Каримова¹, Е. Д. Дмитриева^{1,*}, К. В. Сюндюкова¹

¹ Тульский государственный университет 300012 Тула просп. Ленина, 92, Россия *E-mail: dmitrieva_ed@rambler.ru
Поступила в редакцию 29.07.2017 г.
После доработки 25.03.2019 г.
Принята к публикации 10.10.2019 г.

Выявлена зависимость связывания гуминовых веществ и гиматомелановых кислот с различными формами глинистых минералов на основе монтмориллонита от величины pH среды и начальной концентрации гуминовых веществ. Методом Левенберга—Марквардта, инкорпорированного в систему компьютерной программы Mathcad 15.0, рассчитаны параметры сорбции гуминовых веществ на глинистых минералах и установлено, что максимальная сорбция гуминовых веществ на алюминиевой форме монтмориллонитсодержащей глин при pH 6.5 связана с увеличением его удельной поверхности и адсорбционной емкости, за счет образования слоисто-столбчатой структуры и щелевидных микропор.

Ключевые слова: гуминовые вещества, гиматомелановые кислоты, сорбция, монтмориллонитсодержащие глины.

DOI: 10.31857/S0002188120010032

ВВЕДЕНИЕ

Гуминовые вещества (**ГВ**) и глинистые минералы являются важнейшими компонентами почв [1]. Взаимодействие гуминовых веществ почвы с глинистыми минералами является сложным процессом, который зависит от свойств адсорбента — глинистого минерала, свойств адсорбата — гуминового вещества и в значительной степени от условий среды (рH, содержания гуминовых веществ, химического состава почв и др.) [2—5].

Образование комплексных органо-минеральных соединений, состоящих из гуминовых веществ и глинистых минералов, происходит при различных типах взаимодействия гуминовых веществ с компонентами минеральной части почвы [6]. Сорбция гуминовых веществ минеральными соединениями твердой фазы почвы проходит с участием ионного обмена, специфической адсорбции и хемосорбции [4, 5, 7].

Процесс образования гуминовых веществ и их консервации в виде органо-минеральных соединений играет ключевую роль в глобальном цикле углерода и формировании почв [8]. Общепринято считать, что сначала происходит синтез ГВ, а затем их взаимодействие с минеральной частью

почв. В результате адсорбционного взаимодействия образуются адсорбционные комплексы, представляющие собой пленки гуминовых веществ на поверхности почвенных минералов [9, 10]. Согласно теории сорбционной консервации, в реакциях органо-минерального взаимодействия участвуют растворенные органические соединения. Таким образом, очевидно, что в природных условиях в реакциях адсорбционного взаимодействия могут участвовать лишь фульвокислоты либо низкомолекулярные фракции гуминовых веществ (гиматомелановые кислоты), тогда как взаимодействию высокомолекулярных компонентов гумуса с почвенными минералами должна препятствовать их низкая растворимость [4, 11, 12].

На активных центрах поверхности минеральной матрицы вначале сорбируются гиматомелановые кислоты (ГМК), а затем на образовавшемся монослое из органических молекул ГМК — высокомолекулярные молекулы гуминовых веществ, при этом возможен процесс вторичной сорбции, при которой происходит дополнительная полимеризация ГВ на поверхности глинистого минерала за счет межмолекулярных взаимодействий, приводящих к увеличению степени покрытия по-

верхности минерала [13—15]. В результате остается неясным процесс образования высокомолекулярных адсорбционных комплексов, которые являются основной формой нахождения ГВ в минеральных горизонтах почв.

Потому моделирование сорбционных процессов гуминовых веществ на различных формах глинистых минералов является актуальным для понимания процесса гумификации в реальных почвенных системах.

Цель работы — определить сорбцию гуминовых веществ черноольхового низинного торфа на природной и алюминиевой формах монтмориллонит-содержащих глин в зависимости от рН среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись гуминовые вещества, выделенные по стандартной методике [16-18] из черноольхового низинного торфа, гиматомелановые кислоты, полученные горячей этанольной экстракцией из гуминовых веществ черноольхового низинного торфа (ГВ (ЧНТ)) [18]. Коммерческий образец монтмориллонитсодержащей глины (MMT) BentoGroupMinerals, изготовленный по ТУ 14-9-364-89, содержит 75-85% монтмориллонита, имеет сорбционную способность 500-700%, набухаемость 15-22 раз и концентрацию обменных катионов 68-93 мгэкв/100 г [19, 20]. Алюминиевая форма монтмориллонитсодержащей глины с содержанием 20 моль $Al^{3+}/кг$ глины получена по методике, предложенной Kumar et al. [21]. Интерколирование катионов алюминия в структуру монтмориллонита приводит к увеличению заряда, удельной поверхности монтмориллонита и адсорбционной емкости за счет образования слоисто-столбчатой структуры и щелевидных микропор [21].

Концентрацию гуминовых веществ в растворе определяли фотометрическим методом на приборе СФ-104 при длине волны 350 нм, по предварительно построенной градуировочной зависимости $D = f(C_{\Gamma B})$. Для этого готовили серию растворов с концентрацией ГВ от 10 до 300 мг/л в растворе фонового электролита (0.1 M NaNO₃) [4]. Контрольным образцом являлся раствор 0.1 M NaNO₃.

Для изучения в модельных системах процесса поглощения гуминовых веществ монтмориллонитсодержащими глинами проводили ряд экспериментов, варьируя последовательно параметры рН среды и концентрации гуминовых веществ в растворе.

Для выявления влияния рН среды на сорбцию гуминовых веществ глинистыми минералами в ряд сосудов с плотно закрывающимися крышками вносили по 0.5 г глинистого минерала, 5 мл раствора ГВ с концентрацией 1 г/л и от 0 до 0.6 мл 0.1 М раствора азотной кислоты. Общий объем доводили до 20 мл раствором фонового электролита (0.1 M NaNO₃). Растворы встряхивали в течение 24 ч, после чего центрифугировали в течение 30 мин при 3 тыс. об./мин [4]. Измеряли рН на рН-метре Анион 4154 и концентрацию оставшихся в растворе гуминовых веществ. Рассчитывали долю (%) оставшихся в растворе гуминовых веществ по формуле (1) и строили зависимость количества оставшихся в растворе ГВ от величины рН среды:

$$Q = \frac{C}{C_0} \times 100\% \tag{1}$$

где Q — доля ΓB в растворе, %; C — концентрация ΓB оставшихся в растворе, мг/л; C_0 — начальная концентрация ΓB , мг/л.

Влияние рН среды изучали в области величин 3.0-8.0 ед. рН при фиксированных начальных концентрациях ГВ в растворе 50, 150 и 300 мг/л и содержанием глинистого минерала 10 г/л. Для этого в колбы объемом 20 мл вносили по 0.2 г монтмориллонита, различные объемы ГВ (1, 3 и 6 мл) и доводили рН среды 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 добавлением 0.05 М HNO $_3$ или 0.05 М NаOH и добавлением раствора фонового электролита (0.1 M NaNO_3) . После чего колбы встряхивали 24 ч и центрифугировали 30 мин при 3 тыс. об./мин [4]. Концентрацию оставшихся гуминовых веществ в растворе определяли фотометрическим методом. Сорбцию ГВ рассчитывали по формуле (2)

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C)V}{m},\tag{2}$$

где Γ — сорбция Γ В, мг/г, C — концентрация Γ В оставшейся в растворе, мг/л, C_0 — начальная концентрация Γ В, мг/л, V — объем раствора, л, m — масса монтмориллонита, г.

Сорбцию гуминовых веществ на формах монтмориллонитсодержащих глин изучали в режиме изотерм при фиксированных величинах рН 3.5, 6.5 и 9.5 и начальных концентрациях ГВ 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 мг/л. Для этого в колбы добавляли 0.2 г исходного монтмориллонита или алюминиевой формы монтмориллонита (**Al-MMT**), различные объемы ГВ (0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 мл соответственно), добавлением 0.05 М HNO₃ или 0.05 М NaOH доводили растворы до нужной величины рН и доводили объем до 20 мл раствором 0.1 М NaNO₃. Растворы встряхивали в течение

Рис. 1. Взаимодействие гуминовых веществ с глинистыми минералами: 1 — водородные связи; 2 — лигандный обмен: (а) — протонированной гидроксильной группой минерала, (б) — непротонированной гидроксильной группой минерала; 3 — ионная связь; 4 — катионные мостики.

24 ч, после чего центрифугировали в течение 30 мин при 3 тыс. об./мин [4]. Концентрацию оставшихся гуминовых веществ в растворе определяли фотометрическим методом. Сорбцию гуминовых веществ рассчитывали по формуле (2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Взаимодействие ГВ с почвенными минералами включает следующие типы взаимодействий: катионный обмен, протонирование, лигандный обмен, связывание посредством воды, катионных мостиков, водородных связей, сил Ван-дер-Ваальса (рис. 1) [4, 5, 10, 11, 22].

Межмолекулярные силы действуют практически между любыми молекулами, однако образующиеся соединения непрочны. Силы Ван-дер-Ваальса особо важны при высокой ионной силе или низком рН, когда подавлена ионизация кислых групп гуминовых веществ [4, 5, 11].

Огромную роль в образовании комплекса гуминовое вещество—минерал играют водородные связи, возникающие между азот- и кислородсодержащими группами гуминовых веществ и кислородными атомами или гидроксильными группами поверхности монтмориллонита. Так как поверхность глинистых минералов гидратирована, водородная связь с органическим веществом может осуществляться и посредством адсорбированных минералом молекул воды [4, 5, 11, 13, 15].

Притяжение между противоположно заряженными функциональными группами гуминовых веществ и поверхностными группами глинистых минералов осуществляется за счет электростатических сил [4, 5, 11, 13]. Ионная связь возникает в результате катионного обмена между положи-

тельно заряженными группами ГВ и обменными катионами минералов. Реакция такого типа имеет значение в кислой среде [4, 5, 10, 11, 22, 23]. Вначале изучали зависимость между долей гуминовых веществ в растворе и величиной рН при начальной концентрации гуминовых веществ 250 мг/л (рис. 2).

В отсутствии монтмориллонита происходило плавное понижение растворимости ГВ в диапазоне pH от 6.5 до 5.0, Γ MK — от 8.5 до 7.5, что связано со структурно-групповым составом макромолекул, а также с их конформационными изменениями. зависящими OT pН среды Последующее снижение рН резко снижало растворимость гуминовых веществ. Повышение концентраций ионов водорода вызывало протонирование карбоксильных групп ГВ и гиматомелановых кислот (ГМК), приводящее к осаждению макромолекул ГВ при рН 4.0 ± 1.0 , ГМК — при рН 6.0 ± 0.5 . В диапазонах pH 8.0 ± 1.0 до 3.0 ± 1.0 происходят постепенные пространственные и конформационные изменения макромолекул гуминовых веществ "вытянутый стержень-клубок-глобула" [23].

В присутствии исходной и алюминиевой формы монтмориллонита наблюдали уменьшение концентрации ГВ и ГМК в растворе, что связано с их адсорбцией на минерале [4, 5, 15]. Из-за увеличения доли положительного заряда на поверхности монтмориллонита за счет внедрения в его структуру полигидроксокатиона алюминия [21, 24] доля оставшихся в растворе ГВ и ГМК в присутствии алюминиевой формы ММТ была больше по сравнению с исходной формой ММТ (рис. 26). Сорбция ГМК проходила на формах монтморил-

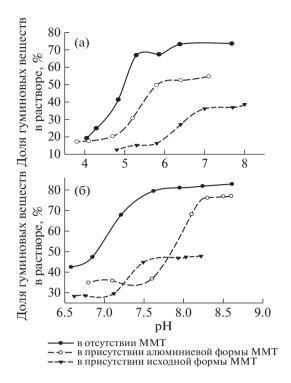


Рис. 2. Доля гуминовых веществ (ЧНТ) в растворе в зависимости от величины рН среды: (а) — гуминовое вещество (ГВ), (б) — гиматомелановые кислоты (ГМК). То же на рис. 3-5.

лонита в щелочной среде и при минимальном разбросе величин рН. Резкое снижение доли ГМК в растворе в присутствии исходной формы монтмориллонита при рН 7.5 и 8.0 для алюминиевой формы ММТ свидетельствовало об увеличении сорбции гиматомелановых кислот при наличии сорбентов. Причем из-за обогащения ГМК фенольными группами [25] происходил сдвиг рН сорбционного равновесия в щелочную область в системах, содержащих формы монтмориллонита.

Эксперимент показал, сорбция ГВ на глинистых минералах увеличивалась с уменьшением рН. Увеличение сорбции ГВ на исходной форме монтмориллонита наблюдали при рН 6.5, на Al-ММТ – при рН 5.0, при этом резко снижалась доля ГВ, оставшихся в растворе. Максимальная сорбция ГВ соответствовала их минимальной доле в растворе: при рН 6.0 на исходной форме MMT и рН 4.5 — на Al-MMT (рис. 2a). При низких величинах рН высокая концентрация ионов водорода нейтрализовала отрицательный заряд поверхности обоих веществ, при этом гуминовые вещества и монтмориллонит приближались друг к другу достаточно близко, что приводило к увеличению роли сил Ван-дер-Ваальса и образованию слабых комплексов [4, 5, 25].

Увеличение сорбции ГВ на глинистых минералах с уменьшением величины рН характерно для лигандного обмена [4, 5, 11]. В данном случае, с одной стороны, поверхность глинистого минерала и гуминовые вещества теряли ионы водорода с ростом рН и становились отрицательно заряженными, что вызывало отталкивающие взаимодействия [4, 5, 11, 15]. С другой стороны, из-за того, что и монтмориллонит, и ГВ при низких рН находились в протонированной форме [4, 5], их функциональные карбоксильные и фенольные группы могли взаимодействовать между собой с образованием водородных связей.

В процессе установления равновесия происходило повышение величин рН равновесных растворов, во всех образцах наблюдали смещение в щелочную область. Сорбция гуминовых веществ снижала положительный заряд диффузионного слоя [4, 5].

Исследовали влияние начальной концентрации гуминовых веществ на характер зависимости сорбции ГВ и ГМК от величины рН (рис. 3). При концентрации 50 и 150 мг/л происходило плавное

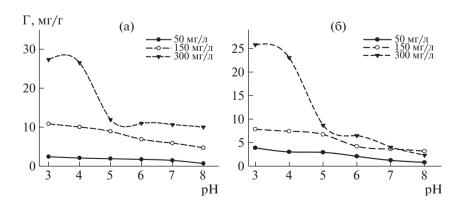


Рис. 3. Сорбция (Γ) на исходном монтмориллоните: (a) $-\Gamma$ B, (б) $-\Gamma$ MK.

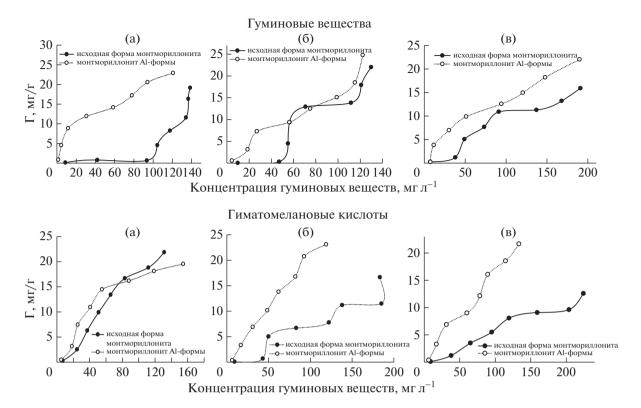


Рис. 4. Изотермы сорбции ГВ и ГМК на различных формах монтмориллонита: (a) – pH 3.5, (б) – pH 6.5, (в) – pH 9.5.

поглощение ГВ, что было связано с неполным заполнением сорбционных центров ММТ молекулами гуминовых веществ; увеличение концентрации ГВ в растворе до 300 мг/л выявило S-образхарактер изотерм. S-форма изотермы характеризуется малым наклоном кривой в области малых концентраций [4, 5, 11]. С ростом концентрации гуминовых веществ в растворе происходил сдвиг сорбционного равновесия в сторону более низких величин рН [4], так максимальная сорбция ГВ на исходном монтмориллоните отмечена при рH = 4.0. Сорбция ГВ и ГМК на монтмориллоните будет зависеть от структуры гуминовых веществ и формы их существования в растворе. При концентрации 300 мг/л, которая ниже критической концентрации мицеллообразования [26], ГВ в растворе представляют собой как линейные молекулы полимеров, так и псевдомицеллы [23], поэтому молекулы ГВ способны сорбироваться не только на поверхности минерала, но и проникать в поры монтмориллонита [27].

В кислой области происходил катионный обмен между положительно заряженными группами ГВ и обменными катионами ММТ с образованием ионной связи. При рН 5.0 и выше интенсивное поглощение гуминовых веществ монтмориллонитом прекращалось из-за изменения их характера взаимодействия с глинистым минералом, а именно связь

осуществлялась за счет электростатических сил или слабых Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий.

При низких величинах pH поглощение гуминовых веществ глинистым минералом достигало максимума и составило $26 \pm 1\%$. По мере увеличения pH сорбция гуминовых веществ снижалась, поскольку уменьшалось число протонированных групп как в составе гуминовых веществ, так и в глинистом минерале [4, 5].

Зависимость сорбции гуминовых веществ в режиме изотерм изучали, варьируя концентрацию гуминовых веществ при фиксированных величинах рН 3.5, 6.5 и 9.5 (рис. 4) и рассчитывали параметры изотерм адсорбции Ленгмюра (табл. 1).

Вид кривых изотерм сорбции ГВ на различных формах монтмориллонита представляет собой сложную природу взаимодействия. Изотермы сорбции ГВ на исходной форме монтмориллонита близки к S-типу по Джайлсу. Данный тип изотерм характеризует увеличение адсорбционных мест с ростом концентрации ГВ в растворе. Для алюминиевой формы монтмориллонита характерны изотермы сорбции ГВ, близкие к L-типу, что характеризует высокое сродство поверхности к сорбируемому веществу при его низких концентрациях [4, 5, 11].

Изотерма Ленгмюра, Γ_{∞} , мг/г Гуминовые вещества Гиматомелановые кислоты рН 3.5 6.5 9.5 3.5 6.5 9.5 0.3 ± 0.1 9.0 ± 0.2 11.8 ± 0.1 Исходная форма ММТ 0.8 ± 0.2 0.7 ± 0.1 0.4 ± 0.1 97 ± 3 Алюминиевая форма ММТ 60 ± 2 54 ± 1 71 ± 2 58 ± 1 58 ± 1

Таблица 1. Параметры адсорбции Ленгмюра гуминовых веществ и гиматомелановых кислот на формах монтмориллонита (R = 0.96 - 0.99)

Примечание. Γ_{∞} — максимальная адсорбция. То же в табл. 2, на рис. 3—5.

Показано, что сорбция ГВ на исходном монтмориллоните значительно увеличивалась при рН 6.5 (об этом трудно говорить при такой форме изотерм). Концентрация оставшихся в растворе ГВ при рН 3.5 и 9.5 была больше, чем концентрация ГВ при рН 6.5 ([$C_{\Gamma B}$] = 130 мг/л), при этом максимальная сорбция гуминовых веществ на исходной форме монтмориллонита составляла 22 мг/г. Такая же зависимость отмечена для изотерм сорбции ГВ на алюминиевой форме монтмориллонитсодержащей глины. Однако за счет введения в структуру исходной монтмориллонитсодержащей глины катионов алюминия происходило увеличение общей обменной емкости и как следствие увеличение сорбции ГВ на данной форме при рН 6.5 на 10% ([$C_{\Gamma B}$] = 25 мг/г) (рис. 4б).

Изотермы сорбции ГМК на формах монтмориллонита при рН 3.5 и 9.5 близки к L-типу, при рН 6.5 на исходной форме монтмориллонита — к S-типу изотерм адсорбции Джайлса [4, 5, 11]. Наибольшая величина сорбируемости ГМК на алюминиевой форме монтмориллонита отмечена при рН 6.5 и составляла соответственно 23 мг/г.

Изотерма сорбции ГВ, ГМК на алюминиевой форме монтмориллонита описывается изотермой, близкой к L-типу, что означало высокое сродство поверхности к сорбируемому веществу при его низких концентрациях [4, 5, 11]. По мере увеличения концентрации адсорбата количество свободных мест на поверхности уменьшалось, и изотерма выходила на плато, соответствующее заполнению монослоем адсорбированных молекул. Модифицирование монтмориллонита полигидроксокомплексами алюминия увеличивало удельную поверхность монтмориллонита вследствие образования слоисто-столбчатой структуры с наличием щелевидных микропор, что приводило к увеличению их адсорбционной емкости [4, 5, 25]. При сорбции ГВ на природных и модифицированных формах монтмориллонита происходило проникновение гуминовых веществ или отдельных их частей в межпакетное пространство глинистых минералов, а также была возможна сорбция высокомолекулярных гуминовых веществ на их уже сорбированных низкомолекулярных фракциях.

Данные табл. 1 свидетельствуют, что наибольшей сорбционной способностью по отношению к ГВ и ГМК обладала алюминиевая форма монтмориллонита при рН 6.5, что связано с увеличением межпакетного расстояния при модификации природного ММТ, а также за счет более полного прохождения ионного обмена при уменьшении рН [4, 5, 10, 11, 13, 28].

Полученные результаты являются экспериментальным доказательством того, что процесс сорбции и гумификации в целом в почвенных системах начинается с низкомолекулярных фракций, одной из которых могут быть ГМК [3, 11, 12, 29]. Как было установлено ранее [29], ГМК (ЧНТ) представляют собой монодисперсную фракцию гуминовых веществ с молекулярной массой 42 кДа, тогда как ГВ (ЧНТ) полидисперсны и в своем составе имеют 4 фракции с молекулярными массами от 3 до 56 кДа [30]. ГМК и низкомолекулярные фракции способны сорбироваться как на поверхности минерала, так и на его ребрах, образуя монослой, а также способны проникать в межпакетное пространство глин [28, 29]. Гуминовые вещества, как полидисперсные органические полимеры, не образуют сплошной пленки, а сорбируются только на активных центрах поверхности – центрах адсорбции за счет постадийной адсорбции отдельных собственных фракций, которые, между собой соединяясь водородными и ионными связями, могут образовывать полислой. Из-за значительных размеров ГВ существенное влияние на их связь с минеральными компонентами почв оказывают конформационные изменения при изменении рН среды.

Максимальная адсорбция по Ленгмюру может быть использована для оценки мономолекулярного покрытия твердой поверхности полимером. Однако образование монослоя не обязательно подразумевает насыщение поверхностных гидроксилов [4, 5].

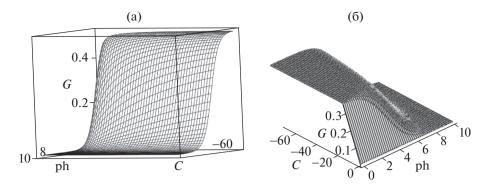


Рис. 5. 3D-изотерма сорбции исходной формой бентонитовой глины при рН 6.5: (a) $-\Gamma$ B, (б) $-\Gamma$ MK.

Хотя эмпирические модели часто отлично описывают адсорбцию, они являются просто численными отношениями, используемыми для описания экспериментальных данных. Использование этих моделей для предсказания адсорбции при изменяющихся концентрациях, ионной силе и рН раствора невозможно.

Поэтому рассчитывали параметры сорбции (табл. 2) для представленных изотерм ГВ (рис. 4) по объединенному уравнению (3), приведенному в литературе [4], которое учитывает влияние рН раствора и функциональный состав гуминовых веществ. Методом Левенберга—Марквардта, инкорпорированного в систему компьютерной программы Mathcad 15.0, были построены трехмерные изотермы связывания ГВ с формами монтмориллонитсодержащих глин (рис. 5). Данное программное обеспечение позволяет быстро и точно рассчитать сорбцию гуминовых веществ [4, 5].

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\infty} K C^{\beta}}{10^{-pH\chi} + K C^{\beta}},\tag{3}$$

где Γ — величина сорбции, мг/г; C — равновесная концентрация в растворе, мг/л; χ , β — эмпирические параметры (χ = 0.5, β = 1.0); K — кажущаяся константа сорбции; Γ_{∞} — величина предельной сорбции, мг/г.

Вид 3D-изотерм сорбции ГВ и ГМК на формах монтмориллонита имеет схожий вид и S-образ-

ный характер. Знак минус параметра χ обусловлен тем, что сорбция происходила по анионному механизму, то есть возрастала с понижением величины pH [4, 5].

По объединенному уравнению наибольшей сорбционной способностью по отношению к ГВ и ГМК также обладала алюминиевая форма монтмориллонита при рН 6.5. При низких рН высокая концентрация протонов нейтрализовала отрицательный заряд поверхности обоих материалов, что приводило к увеличению сил Ван-дер-Ваальса между гуминовыми веществами и поверхностью минерала [4, 5, 11].

Показатель максимальной сорбции для ГВ был больше, чем для ГМК, что связано с высоким содержанием карбоксильных групп в структуре ГМК. При высоких величинах рН электростатическое отталкивание между соседними ионизированными группами (т.е. карбоксильными группами) было максимальным, что приводило к увеличению кажущегося размера молекул [4], вследствие чего ГМК не могли сорбироваться в межпакетном пространстве модифицированного ММТ. Также большая молекулярная масса и меньший заряд молекулы ГВ приводили к максимальной сорбционной емкости модифицированного монтмориллонита по отношению к гуминовым веществам [4, 5, 29].

Таблица 2. Параметры сорбции гуминовых веществ по объединенному уравнению на формах монтмориллонита (R = 0.97 - 0.99)

Изотерма Ленгмюра, Γ_∞ , мг/г											
	Гум	ислоты									
pН	3.5	6.5	9.5	3.5	6.5	9.5					
Исходная форма ММТ	0.2 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1					
Алюминиевая форма ММТ	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2 1.9 ± 0.1 0.9 ± 0.1 0.4 ± 0.1 0.7 ± 0.1 0.5 ± 0.2									

выводы

- 1. Выявлена зависимость связывания ГВ и ГМК с различными формами глинистых минералов на основе монтмориллонита (ММТ) от рН среды. Доказано, что из-за обогащения ГМК фенольными группами происходил сдвиг рН сорбционного равновесия в щелочную область на исходной и алюминиевой форме монтмориллонита.
- 2. Получены изотермы сорбции гуминовых веществ и их фракций при фиксированных величинах рН среды: 3.5, 6.5, 9.5 ед. рН, рассчитаны параметры сорбции по уравнению Ленгмюра. Установлено, что сорбция ГВ и ГМК на глинистых минералах увеличивалась с уменьшением рН: наибольшей была сорбированность ГВ при рН 6.5 на алюминиевой форме монтмориллонита, что связано с увеличением межпакетного пространства, причем с увеличением начальной концентрации ГВ увеличивалась их сорбция. Расчет параметров сорбции методом Левенберга-Марквардта, инкорпорированного в систему компьютерной программы Mathcad 15.0, подтвердил влияние модификации глинистого минерала полигидроксокомплексами алюминия: алюминиевая форма монтмориллонита обладала увеличенной удельной поверхностью и адсорбционной емкостью за счет образования слоисто-столбчатой структуры и щелевидных микропор в его составе. Наибольшая была сорбция ГВ на алюминиевой форме монтмориллонита при рН 6.5. Рассчитанные значения сорбируемости соответствовали ручным подсчетам по стандартным уравнениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Чуков С.Н.* Гуминовые вещества: результаты и перспективы исследования // Тез. докл. III Всерос. конф. "Гуминовые вещества в биосфере" СПб., 2005. С. 159–160.
- 2. *Мартынова Н.А*. Химия почв: органическое вещество почв. 2011. 256 с.
- 3. *Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О.* Матричная организация почв. М.: РУСАКИ, 2001. 296 с.
- Каюгин А.А. Распределение кадмия в модельных системах, содержащих каолинит и гуминовые кислоты: Дис. ... канд. хим. наук, Тюмень, 2009. 151 с.
- Заварзина А.Г. Взаимодействие гуминовых кислот различного происхождения с ионами металлов и минеральными компонентами почв: Дис. ... канд. биол. наук, М., 2000. 133 с.
- 6. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И.* Химия почв М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
- 7. Карпюк Л.А., Перминова И.В., Пономаренко С.А., Музафаров А.М. Синтез алкоксисилильных производных гуминовых веществ и их иммобилизация на минеральных поверхностях // XVIII Менделе-

- евский съезд по общ. и прикл. химии, М., 2007. С. 2608.
- 8. *Перминова И.В., Жилин Д.М.* Гуминовые вещества в контексте зеленой химии // Зеленая химия в России / Под. ред. Лунина В.В. Сб. научн. ст. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 146—162.
- 9. Дину М.И. Влияние функциональных особенностей гумусовых веществ на процессы комплексообразования с ионами металлов (модельные эксперименты и расчеты): Автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2011. 23 с.
- 10. Пинский Д.Л. Ионообменные процессы в почвах. Пущино: Ин-т почвоведения и фотосинтеза, 1997. 166 с.
- 11. Соколова Т.А., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен // Тула: Гриф и K, 2009. 174 с.
- 12. *Каюгин А.А.* Закономерности адсорбции низкомолекулярных аналогов гуминовых кислот природным каолинитом // Вестн. Тюмен. Гос. ун-та. Экол. и природопользование. 2015. Т. 1. №. 2. С. 84—91.
- 13. *Березюк В.Г.* Изучение сорбционных свойств природных алюмосиликатов: Дис. ... д-ра хим. наук. Екатеринбург, 1993. 265 с.
- 14. Данченко Н.Н. Функциональный состав гумусовых кислот: определение и взаимосвязь с реакционной способностью: Дис. ... канд. хим. наук. М., 1997. 146 с.
- 15. Feng X., Simpson A.J., Simpson M.J. Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces // Org. Geochem. 2005. V. 36. № 11. P. 1553–1566.
- 16. Акатова Е.В., Дмитриева Е.Д., Сюндюкова К.В., Леонтьева М.М., Музафаров Е.Н. Детоксицирующая способность гуминовых веществ торфов различного происхождения по отношению к ионам тяжелых металлов // Химия растит. сырья. 2016. №. 1. С. 119—127.
- 17. Дмитриева Е.Д., Горячева А.А., Переломов Л.В., Сюндюкова К.В., Леонтьева М.М. Сорбционная способность гуминовых веществ торфов различного происхождения Тульской области по отношению к ионам Pb(II) // Изв. ТулГУ. Естеств. науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 205—219.
- 18. Дмитриева Е.Д., Глебов Н.Н., Леонтьева М.М., Сюндюкова К.В. Связывающая способность гуминовых веществ торфов и гиматомелановых кислот по отношению к полиароматическим углеводородам (на примере нафталина) // Вестн. Томск. гос. ун-та. Химия. 2017. №. 7. С. 8—23.
- 19. Дмитриева Е.Д., Горячева А.А., Сюндюкова К.В., Музафаров Е.Н. Сорбционная способность природного и модифицированного монтмориллонита по отношению к ионам меди в присутствии органических кислот // Сорбц. и хроматограф. процессы. 2016. Т. 16. № 6. С. 813—820.
- 20. Глины формовочные огнеупорные. Метод определения концентрации обменных катионов натрия и калия: ГОСТ 3594.3-93. Введ. 01.01.1995. Минск: Изд-во стандартов, 1993. С. 7.

- Kumar P., Jasta R.V., Bhat G.T. Effect of OH/A1 ratio of pillaring solution on the texture and surface acidity of aluminium pillared clays // Indian J. Chem. 1997.
 V. 36A. P. 667–672.
- 22. Murphy E.M., Zachara J.M., Smith S.C., Phillips J.L., Wietsma T.W. Interaction of hydrophobic organic compounds with mineral-bound humic substances // Environ. Sci. Technol. 1994. V. 28, P. 1291–1299.
- 23. *de Melo B.A.G., Motta F.L., Santana M.H.A.* Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments // Mater. Sci. Engin.: C. 2016. V. 62. P. 967–974.
- 24. *Kloster N., Marcelo A.* Interaction of humic acids with soil minerals: adsorption and surface aggregation induced by Ca²⁺ // Environ. Chem. 2015. V. 12. № 6. P. 731–738.
- Кормош Е.В. Модифицирование монтмориллонитсодержащих глин для комплексной сорбционной очистки сточных вод: Дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2009. 181 с.

- 26. Dmitrieva E., Efimova E., Siundiukova K., Perelomov L. Surface properties of humic acids from peat and sapropel of increasing transformation // Environ. Chem. Letter. 2015. V. 13. № 2. P. 197–202.
- 27. *Попов А.И.* Гуминовые вещества. Свойства, строение, образование. СПб.: Изд-во: СПбГУ, 2004. 248 с.
- 28. Дмитриева Е.Д., Леонтьева М.М., Сюндюкова К.В. Влияние рН среды на связывание ионов металлов гуминовыми веществами и гиматомелановыми кислотами торфов // Уч. зап. Казан. гос. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. № 2. В печати.
- 29. Дмитриева Е.Д., Леонтьева М.М., Сюндюкова К.В. Молекулярно-массовое распределение гуминовых веществ и гиматомелановых кислот торфов различного генезиса Тульской области // Химия раст. сырья. 2017. № 4. В печати.
- 30. Colombo C., Palumbo G., Ahgelico R., Cho H.G., Francioso O., Ertani A., Hardi S. Spontaneous aggregation of humic acid observed with AFM at different pH // Chemosphere. 2015. V. 138. P. 821–828.

Sorption of Humic Substances of Black Alder Low-Lying Peat on Montmorillonite Containing Clays

V. T. Karimova^a, E. D. Dmitrieva^{a,#}, and K. V. Siundiukova^a

^a Tula State University prosp. Lenina 92, Tula 300012, Russia [#]E-mail: dmitrieva ed@rambler.ru

The dependence of the binding of humic substances and hymatomelanic acids with different forms of clay minerals on the basis of montmorillonite from pH and initial concentration of humic substances was studied. Method of Levenberga—Marquardt are protected in the computer program Mathcad 15.0 was designed the parameters of the sorption of humic substances on clay minerals and found that the maximum sorption of humic substances on the aluminum form containing montmorillonite clay at a pH of 6.5, which was associated with an increase in its specific surface area and adsorption capacity, due to the formation of layered-columnar structure and a slit-like micropores.

Key words: humic substances, hymatomelanic acid, sorption, montmorillonite containing clay.

УЛК 631.417:631.445.41:631.51

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИАЗОВЬЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОСЕВА¹

© 2020 г. Г. В. Мокриков¹, Т. В. Минникова^{1,*}, М. А. Мясникова¹, К. Ш. Казеев¹, С. И. Колесников ¹

¹Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии 344090 Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1, Россия

*E-mail: loko261008@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

В производственных агроценозах с 9-летним применением почвозащитной технологии прямого посева (No-Till, NT) в сравнении с традиционной технологией отвальной вспашки (TT) был оценен качественный состав органического вещества и содержание перманганатокисляемого органического вещества (ΠOB_{KMnO_4}) в течение вегетационных сезонов 2016—2018 гг. В составе органического вещества отмечено преобладание гуминовых кислот (до 32% от $C_{\rm ofm}$) почв при применении NT. В июле только при применении NT под посевом льна обнаружена средняя степень гумификации ($D_{\rm гум}$), в сентябре независимо от технологии обработки — слабая степень гумификации. В исследованный период на содержание $\Pi OB_{\rm KMnO_4}$ также оказывала влияние культура-предшественник. После посева кориандра, льна и подсолнечника в 2016 г. наблюдали повышенное содержание $\Pi OB_{\rm KMnO_4}$ июле и сентябре 2017 г. при применении NT на озимой пшенице по сравнению с TT. В 2018 г. при высоком уровне содержания $\Pi OB_{\rm KMnO_4}$ (518—953 мг C/кг почвы) после выращивания в 2017 г. озимой пшеницы, как культуры-предшественника, отличий между технологиями не обнаружено. Многолетнее использование ресурсосберегающей агротехнологии (No-Till) привело к увеличению доли $\Pi OB_{\rm KMnO_4}$ по сравнению с традиционной технологией обработки при слабой и средней степени гумификации.

Ключевые слова: No-Till, черноземы, качественный состав органического вещества, перманганат окисляемое органическое вещество, степень гумификации, плодородие.

DOI: 10.31857/S0002188120010093

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии обработки почвы преследуют своей целью повышение урожайности возделываемых культур. При различных приемах обработки почвы (отвальной вспашке, чизеливании, плантажной вспашке и других приемов) происходит снижение плодородия почв по сравнению с прямым посевом [1–4]. Благодаря технологии прямого посева (No-Till, NT) экономятся топливные ресурсы и сохраняется продуктивная влага в почве. Показано, что сохранение влажности почв под бинарными посевами подсолнечника оказывало положительное влияние на актив-

ность дегидрогеназ и β-фруктофуранозидазы [5]. Использование NT при выращивании сельскохозяйственных культур на черноземах обыкновенных Ростовской обл. способствует повышению содержания подвижных соединений фосфора и калия на фоне некоторого снижения содержания обменного аммония [6].

Сельскохозяйственное использование черноземов Приазовья приводит к снижению содержания органического вещества. Максимум потерь приходится на начальные сроки освоения, в дальнейшем изменения минимальны [2, 7—10]. Выведение черноземов из сельскохозяйственного оборота приводит к повышению содержания органического вещества почв (OB) [11—14].

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (5.5735.2017/8,9) и Президента Российской Федерации (НШ-3464.2018.11).

№	20	016	20	17	2018		
участка	NT	TT NT		TT	NT	TT	
Д1	Масличный лен	Озимая пшеница	Озимая пшеница	Озимая пшеница	Нут	Ячмень	
Д2	Масличный лен	Подсолнечник	Озимая пшеница	Озимая пшеница	Подсолнечник	Ячмень	
Д4	Кориандр	Ячмень	Озимая пшеница	Озимая пшеница	Подсолнечник	Ячмень	
Д9	Подсолнечник	Подсолнечник	Озимая пшеница	Озимая пшеница	Рапс	Горох	

Таблица 1. Размещение посевов сельскохозяйственных культур при различных технологиях обработки почвы (2016—2018 гг.)

Примечание. NT – прямой посев (No-Till), TT – традиционная технология.

Для оценки антропогенной нагрузки на почву важно оценить качественный и количественный составы подвижного органического вещества почв, в том числе перманганатокисляемого органического вещества (IOB_{KMnO_4}) [15–18]. Содержание и распределение подвижного органического вещества в почве информативно при оценке последствий применения различных способов обработки почвы [19–25]. По данным зарубежных источников, определение перманганатокисляемого органического вещества является быстрым, недорогим и информативным методом полевых и лабораторных исследований лабильного пула органического вещества в почве [24, 26–28].

Цель работы — оценка изменений качественного состава органического вещества и содержания перманганатокисляемого органического вещества черноземов Приазовья при использовании технологии прямого посева в 2016—2018 гг. В задачи исследования входило: оценить количественный и качественный состав органического вещества в почвах при разных приемах обработки; определить сезонную динамику перманганатокисляемого органического вещества черноземов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были почвы агроценозов 28 полей Октябрьского р-на Ростовской обл. на территории хозяйства ИП "Мокриков В.И." (ранее ООО "Донская Нива"). На площади более 5 тыс. га почвы в течение 9 последних лет обрабатывают по технологии прямого посева (NT) озимой пшеницы (Triticum aestivum L.), ячменя (Hordeum sativum distichum), подсолнечника (Helianthus annuus L.), льна (Linum usitatissimum L.), кориандра (Coriandrum sativum L.), нута (Cicer arietinum L.), рапса (Brássica nápus L.). При этой технологии обработки почвы минимизируется механическое воздействие на почвенный покров, сохраняется стерня, органические остатки формируют мульчирующий слой. Эти факторы уве-

личивают выделения корневых экссудатов и сохраняют влагу в почве [29, 30].

Бо́льшую часть посевных площадей с прямым посевом занимают зерновые культуры (озимая пшеница и ячмень) — 49%, кукуруза (на зерно) — 10%, подсолнечник и многолетние бобовые травы (донник, люцерна, эспарцет, вика) — 10%, зерновые бобовые (нут, чечевица, горох) — 8%, озимые крестоцветные (рыжик, рапс, горчица) — 6.5%, эфирномасличные (кориандр) — 6%, масличные (лен) — 4%, сафлор — 2.5%, гречиха — 2.0%, многолетние травы — 2%.

При прямом посеве использовали следующую технику: трактор Buhler Versatile 2375 + Great Plains NTA 3510 (10.7 м) и Case Magnum 315 + Great Plains NTA 3510 (10.7 м), все культуры высевали с междурядьем 19.1 см. Расход дизельного топлива на основную обработку почвы при прямом посеве составил 26 л/га, что в 3 раза меньше, чем при традиционной обработке (74.1 л/га).

Исследование проводили в 2016-2018 гг. в 8-польных севооборотах. В настоящей работе анализировали динамику содержания органического вещества нескольких участков (Д1, Д2, Д4 и Д9) в слое 0-10 см (табл. 1). Почвы — черноземы обыкновенные мощные и среднемощные разной степени выщелоченности от карбонатов (табл. 2).

Для сравнения влияния технологии NT исследовали поля соседних хозяйств, обрабатываемые по традиционной технологии (TT) с отвальной вспашкой и регулярными культивациями. Расстояние между полями с традиционной обработкой и полями с прямым посевом не превышало 50—100 м. Определение качественного и количественного состава органического вещества проводили в 2016—2018 гг. Поскольку посев при применении NT проводят до глубины 0—10 см, исследование было проведены именно в этом поверхностном слое.

В 2016 г. в мае, июле и сентябре определяли содержание органического вещества и его качественный состав, в 2017—2018 гг. — содержание

№ площадки	Населенный пункт	Географические координаты	Тип почв		
Д1	п. Староковыльный	46°04.048 N	Чернозем обыкновенный карбонатный смытый		
		38°40.305 E	среднемощный слабогумусированный		
Д2	п. Староковыльный	47°35.784 N	Чернозем обыкновенный карбонатный смытый		
		40°05.141 E	среднемощный слабогумусированный		
Д4	х. Малая сопка	47°37.474 N	Чернозем обыкновенный карбонатный мощный		
		40°05.420 E	слабогумусированный		
Д9	х. Киреевка	47°47.120 N	Чернозем обыкновенный слабовыщелоченый		
		40°28.164 E	среднемощный малогумусный		

Таблица 2. Расположение площадок и тип почв агроценозов с прямым посевом

перманганатокисляемого органического вещества ($\Pi OB_{\mathrm{KMnO_4}}$). Качественный состав органического вещества определяли по методу Пономаревой—Плотниковой [31, 32]. По методу Гришиной—Орлова оценивали степень гумификации органического вещества ($D_{\mathrm{гум}}$) [33]:

$$D_{\text{\tiny ГУМ}} = \frac{C_{\Gamma K}}{C_{\text{общ}}} \times 100,$$

где: $C_{\Gamma K}$ — содержание гуминовых кислот, $C_{\text{общ}}$ — общее содержание органического вещества.

Содержание перманганатокисляемого органического вещества (ΠOB_{KMnO_4}) определяли по Блейру в модификации Вэла [34, 35].

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ Statistica 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Качественный состав органического вещества в 2016 г. В июле и сентябре 2016 г. был оценен качественный состав органического вещества. Анализ качественного состава органического вещества показал преобладание гуминовых кислот, содержание которых в вариантах с NT составило 32—50%, а при TT — 28—41% (табл. 3). В группе фульвокислот преобладающая доля соответствовала ФК-III — 11—21%. В группе гуминовых кислот почвы участков с NT преобладали гуминовые кислоты ГК-II, связанные с кальцием — 18—32%, и ГК-III, связанные с устойчивыми полуторными оксидами и глинистыми минералами — 12—18%. Наибольшее количество как гуминовых, так и фульвокислот в почвах с NT и TT, наблюдали в июле.

Максимальное содержание гуминовых и фульвокислот в этот период было обусловлено процессами минерализации органического вещества почвы. В течение сезона при NT снижение содержания ГК-II составило 28, при TT - 7%. Подобная динамика свидетельствовала о консервативном составе гумусовых веществ при отвальной вспашке и динамичности изменения гуминовых кислот ГК-II, связанных с кальцием.

Гуминовые кислоты менее устойчивы, чем негидролизуемый остаток, они меньше подвержены минерализации [32, 36]. Содержание фракций ГК-I, ФК-I, ФК-Iа в июле при NT было меньше на 16—22%, чем при применении ТТ. Фракция ГК-II по сравнению с ТТ также уменьшалась на 18%. В течение сезона независимо от технологии обработки обнаружено повышение содержания ФК-II при NT — на 22 и при ТТ — на 15%. Отдельно стоит отметить, что содержание фракции ФК-1а в июле и сентябре на участках с NT было меньше на 10 и 15%, чем при ТТ. Вероятно, подобное высокое содержание ФК-1а в почвах с ТТ было связано с обилием атмосферных осадков в 2016 г.

Содержание неэкстрагируемого остатка (гумина) при NT было больше, чем при традиционной обработке на 37%. Его содержание характеризует прочность закрепления органического вещества минеральной частью почвы. Высокое содержание гумина (34—36%) было обусловлено содержанием трудно извлекаемых форм гуминовых и фульвокислот в почве. При применении NT в сентябре наблюдали увеличение содержания неэкстрагируемого остатка на 10% по сравнению с TT.

В июле степень гумификации почв с NT варьировала от $D_{\text{гум}} = 15-25$, в сентябре до $D_{\text{гум}} = 16-17$. На участке Д1 в июле и сентябре показано снижение гумификации на 48 и 63% соответственно. Напротив, на участке Д2 с применением NT в июле и сентябре отмечена бо́льшая гумификация (больше на 60 и 33%), чем при TT. На участке Д4 наблюдали увеличение гумификации в сентябре на 51%, на участке Д9 различий с TT не выявили. Подобное различие было обу-

Таблица 3. Качественный состав органического вещества на участках Д1, Д2, Д4 и Д9 в 2016 г. в слое 0-10 см

				Каче	ественні	ый соста	в органі	ического	вещест	ва, % от	C _{opr}		
№ участка	Сорг, %	фракции гуминовых кислот			фракции фульвокислот				ГК +	Гумин	$D_{\scriptscriptstyle{\Gamma\mathrm{YM}}}$		
·		I	II	III	Σ	Ia	I	II	III	Σ	+ ΦK	1 умин	$D_{\Gamma m yM}$
Июль													
Д1	$\frac{2.5}{1.5}$	$\frac{3}{6}$	17 17	12 14	$\frac{32}{37}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{14}{23}$	$\frac{21}{32}$	$\frac{53}{69}$	$\frac{47}{31}$	15 24
Д2	$\frac{2.1}{2.5}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{32}{24}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{50}{38}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{0}{0}$	2 <u>1</u>	$\frac{32}{22}$	$\frac{83}{60}$	$\frac{17}{40}$	25 15
Д4	<u>2.5</u>	<u>3</u>	<u>18</u>	<u>16</u>	<u>37</u>	<u>3</u>	<u>7</u>	7_	<u>24</u>	<u>41</u>	<u>78</u>	<u>22</u>	<u>15</u>
Д9	$\frac{2.8}{2.6}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{31}{23}$	12 14	47 48	$\frac{2}{2}$	1 <u>0</u> 5	$\frac{0}{1}$	11 14	$\frac{23}{24}$	$\frac{71}{64}$	$\frac{30}{36}$	17 16
	l I		<u>I</u>			Сент	ябрь	I	Į.		Į.	i i	
Д1	$\frac{2.3}{0.9}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{21}{22}$	13 13	$\frac{36}{40}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{7}{9}$	$\frac{0}{0}$	1 <u>4</u> 27	$\frac{24}{39}$	60 79	<u>40</u> 21	16 42
Д2	$\frac{2.1}{2.4}$	$\frac{3}{3}$	18 15	13 12	$\frac{35}{30}$	$\frac{3}{2}$	<u>5</u> 5	18 5	18 16	$\frac{43}{29}$	<u>77</u> 58	23 42	17 13
Д4	$\frac{2.2}{2.6}$	$\frac{2}{3}$	<u>21</u> 15	13 11	$\frac{36}{28}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{5}{2}$	<u>17</u> 11	$\frac{31}{20}$	<u>67</u> 48	$\frac{33}{52}$	<u>16</u> 11
Д9	$\frac{2.4}{2.6}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{17}{27}$	$\frac{18}{10}$	$\frac{40}{39}$	$\frac{2}{2}$	<u>9</u> 5	$\frac{3}{0}$	17 11	$\frac{31}{18}$	7 <u>1</u> 57	29 43	17 15

Примечания. 1. $D_{\text{гум}}$ — степень гумификации. 2. Над чертой — NT, под чертой — TT.

словлено разницей между сельскохозяйственными культурами. На участке Д1 выращивали лен, контрольная культура с ТТ — озимая пшеница, на участке Д2 — лен, культура с отвальной вспашкой — подсолнечник (табл. 1). На участке Д4 выращивали кориандр в сравнении с яровым ячменем. Отличий в степени гумификации на участке Д9 не обнаружено, поскольку выращивали подсолнечник при применении NT и TT.

Изменение содержания перманганатокисляемого органического вещества. По содержанию перманганатокисляемого органического вещества (ПОВ_{КМпО4}) все исследованные участки, включая участки с ТТ, можно отнести к группе с очень низким содержанием подвижного углерода [35]. Содержание ПОВ_{КМпО4} исследованных почв с NT показало достаточно широкий диапазон варьирования: от 846—953 (май, июль) до 128—182 мг С/кг почвы в сентябре, октябре (рис. 1). Причем на большинстве участков максимальные показатели наблюдали в периоды активной вегетации в мае и июле, вследствие повышения корневой массы растений и выделения ими экссудатов, богатых органическими веществами.

Содержание ПОВ_{КМпО₄} непосредственно зависело от выращиваемой сельскохозяйственной культуры. Согласно данным табл. 1, предшественниками озимой пшеницы были культуры как сплошного сева (лен), так и пропашные культуры (кориандр, подсолнечник). После сбора урожая льна (участки Д1 и Д2) в 2016 г. в почве к 2017 г. осталось незначительное количество пожнивных остатков, что вызвало увеличение содержания ПОВ_{КМпО4} почв при применении NT в весенне-летний период на 340, 747, 804% по сравнению с ТТ. Однако в сухой период наблюдали снижение содержания ΠOB_{KMnO_4} при NT. Пропашные культуры 2016 г. – кориандр (участок Д4) и подсолнечник (участок Д9) влияли на содержание ΠOB_{KMnO_4} в 2017 г: в сентябре его содержание было больше при NT, чем при TT на 663 и 584 мг ${\rm C/кг}$ почвы. Содержание ${\rm \Pi OB_{KMnO_4}}$ в 2018 г. наглядно показало, что посевы озимой пшеницы 2017 г. выравнивали содержание ΠOB_{KMnO_4} в течение всего вегетационного сезона. При этом обнаружили высокое содержание ПОВ КМпО4 на протяжении всего вегетационного сезона 2018 г. как

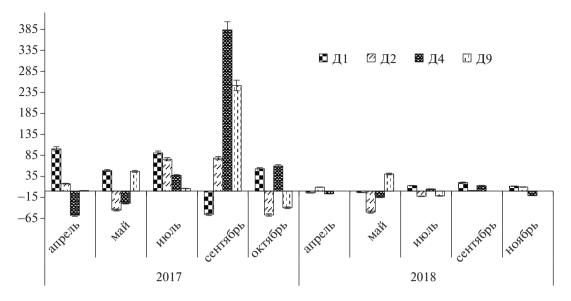


Рис. 1. Содержание перманганатокисляемого органического вещества при прямом посеве в слое 0-10 см (2017-2018 гг.), % от традиционной технологии. Описание участков дано в табл. 1, 2.

при NT (518–953 мг С/кг почвы), так и при TT (514–1211 мг С/кг почвы).

При NT показана роль сельскохозяйственной культуры-предшественника в изменении содержания ПОВ КМпО в течение сезона. В состав мульчирующего слоя входят в зависимости от севооборота: солома озимой пшеницы, стеблей и листьев льна, подсолнечника и других. Каждый вид растений отличается своим химическим составом и содержанием органических веществ (целлюлозы, пентозанов, гемицеллюлозы, лигнина), зольных элементов (C, H, O, N, Ca, K, Si, P, Mg), которые служат источниками формирования различных гумусовых веществ [37]. Максимальная зольность соответствует именно растительным остаткам травянистых растений. При этом в 1 т соломы содержится до 470-480 кг органического углерода, что в 3.5–4.0 раза больше, чем в навозе. Остающийся на поле мульчирующий слой способствует сохранению влаги в почве и минерализации органических остатков. По данным [21], при постоянном поступлении растительных остатков в почву также наблюдали тенденцию к увеличению содержания подвижного углерода согласно концептуальной модели иерархии агрегатов Элиотта [38]. Наличие мульчирующего слоя не только приводит к накоплению и сохранению влаги, но и снижает инсоляцию поверхности почвы и ее температуру, улучшает структурность, повышает биологическую активность почвы и устойчивость к эрозийным процессам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение технологии прямого посева (NT) приводило к повышению степени гумификации почв и содержанию перманганатокисляемого органического вещества (ΠOB_{KMnO_4}). Роль культуры-предшественника подтверждена при оценке содержания ΠOB_{KMnO_4} . Содержание ΠOB_{KMnO_4} почв с прямым посевом было на высоком уровне с апреля по июль 2017 г. — 199—846 мг С/кг почвы. После сбора урожая озимой пшеницы наблюдали большее содержание ΠOB_{KMnO_4} при NT по сравнению с традиционной вспашкой (TT) на 37—91% в июле и на 78—384% в сентябре. В 2018 г. после озимой пшеницы наблюдали повышение содержания ΠOB_{KMnO_4} при применении NT на 72—205%, при TT — на 28—262%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байбеков Р.Ф. Природоподобные технологии основа стабильного развития земледелия // Земледелие. 2018. № 2. С. 5–8.
- 2. Вальков В.Ф., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Кузнецов Р.В. Плодородие почв и сельскохозяйственные растения: экологические аспекты. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 416 с.
- 3. Мокриков Г.В., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние запасов продуктивной влаги и количества атмосферных осадков на урожайность при условии прямого посева сельскохозяйственных культур в Ростовской области // Самар. научн. вестн. 2019. Т. 8. № 1(26). С. 69—75.
- 4. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.

- 5. Минникова Т.В., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Колесников С.И. Оценка зависимостей между гидротермическими показателями и ферментативной активностью черноземов Ростовской области при использовании различных агротехнологий // Агрофизика. 2018. № 1. С. 9—17.
- 6. *Кравцова Н.Е., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Минни-кова Т.В., Колесников С.И.* Динамика содержания элементов питания в черноземах Ростовской области при разных технологиях обработки почв // Агрохим. вестн. 2019. Т. 1. № 1. С. 33—36.
- 7. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Ростовской области. Ростов-на/Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. 492 с.
- 8. Даденко Е.В., Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая активность чернозема обыкновенного при длительном использовании под пашню // Почвоведение, 2014. № 6. С. 724—733.
- 9. *Kumar S., Kadono A., Lal R., Dick W.* Long-term no-till impacts on organic carbon and properties of two contrasting soils and corn yields in Ohio // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2012, № 76. P. 1798–1809.
- 10. Martínez I., Chervet A., Weisskop P., Sturny W.G., Etan A., Stettler M., Forkmann J., Keller T. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: part 1. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil // Soil Till. Res. 2016. № 163. P. 141–151.
- Когут Б.М. Органическое вещество чернозема // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 39—57.
- 12. *Русанов А.М., Анилова Л.В.* Экологические аспекты гумусообразования и динамика гумуса целинных и пахотных черноземов Предуралья // Экология, 2009. № 6. С. 417—422.
- 13. Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние возраста залежей на биологические свойства постагрогенных почв Ростовской области. Ростов-на/Дону: Изд-во ЮФУ. 2015. 130 с.
- 14. Яшин М.А., Авдеева Т.Н., Когут Б.М., Маркина Л.Г., Семенов В.М., Тарасов С.И., Фрид А.С. Агрогенная трансформация лабильных гумусовых веществ и структуры дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрохимия, 2015. № 9. С. 3—13.
- 15. *Benbi D.K.*, *Boparai A.K.*, *Brar K*. Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter // Soil Biol. Biochem. 2014. № 70. P. 183–192.
- Chen G.H., Weil R.R. Penetration of cover crop roots through compacted soils // Plant Soil. 2010. V. 331. P. 31–43.
- 17. Duval M.E., Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Canelo S., Martínez J.M., Wall L. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems // Soil Till. Res. 2013. № 131. P. 11–19.
- 18. Galantini J.A., Duval M., Iglesias J.O., Krüger H. Continuous wheat in semiarid regions: long—term effects on stock and quality of soil organic carbon // Soil Sci. 2014. № 179. P. 284—292.
- 19. Дедов А.А., Несмеянова М.А., Дедов А.В. Влияние приемов биологизации земледелия и способов об-

- работки почвы на содержание органического вещества в черноземе типичном и продуктивность севооборотов // Агрохимия. 2017. № 9. С. 25—32.
- Зеленский Н.А., Зеленская Г.М., Мокриков Г.В., Шуркин А.Ю. Плодородие почвы: настоящее и будущее нашего земледелия // Земледелие. 2018. № 5. С. 4—7.
- 21. *Когут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555—561.
- 22. Когут Б.М., Яшин М.А., Семенов В.М., Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г., Лукин С.М., Тарасов С.И. Распределение трансформированного органического вещества в структурных отдельностях дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2016. № 1. С. 52–64.
- 23. *Медведева А.М., Бирюкова О.А., Ильченко Я.И., Кучеренко А.В., Кучменко Е.В.* Содержание и запас гумуса в черноземе обыкновенном при использовании различных систем основной обработки // Усп. совр. естествознания. 2018. № 1. С. 29—34.
- 24. *Blair G.J.*, *Lefroy R.D.B.*, *Lise L.* Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems // Austr. J. Agricult. Res. 1995. V. 46. P. 1459–1466.
- 25. Saviozzi A., Vanni G., Cardelli R. Carbon mineralization kinetics in soils under urban environment // Appl. Soil Ecol. 2014. № 73. P. 64–69.
- 26. Rennert Th., Ghong N. P., Rinklebe J. Permanganate-oxidizable soil organic matter in floodplain soils // Catena. 2017. № 149. P. 381–384.
- 27. Romero C.M., Engel R.E., D'Andrilli J., Chen Ch., Zabinski C., Miller P.R., Wallander R. Patterns of change in permanganate oxidizable soil organic matter from semiarid drylands reflected by absorbance spectroscopy and Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry // Org. Geochem. 2018. № 120. P. 19–30.
- 28. Silva G.L., Lima H.V., Campanha M.M., Gilkes R.J., Oliveira T.S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region // Geoderma. 2011. № 167/168. P. 61–70.
- 29. *Кроветто К*. Прямой посев (No-Till). Взаимосвязь между No-Till, растительными остатками, растениями и насыщением почвы питательными веществами. Самара: Изд-во Элайт, 2010. 206 с.
- 30. Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Hongwen L. Current status of adoption of no—till farming in the world and some of its main benefits // Inter. J. Agricult. Biol. Engin. 2010. V. 3. № 1. P. 1—26.
- 31. *Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Да- денко Е.В.* Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на/Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
- 32. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Некоторые результаты фракционирования гумуса черноземов // Почвоведение. 1968. № 11. С. 104—117.
- Гришина Л.А., Орлов Д.С. Система показателей гумусного состояния почв // Пробл. почвоведения. М., 1978. С. 42–47.

- 34. Weil R., Islam K.R., Stine M.A., Gruver J.B., Samson-Liebig S.E. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simple method for laboratory and field use // Amer. J. Alternative Agricult. 2003. V. 18(1). P. 3–17.
- 35. Comprehensive assessment of soil health. Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Wolfe D.W., Abawi G.S. Third Edition Interim Draft, 2016. № 22. 140 p.
- 36. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
- 37. *Попов П.Д., Новиков М.Н.* Расчет баланса соломы в хозяйстве: метод. рекоменд. / Под ред. Попова П.Д. Владимир: ВНИПТИОУ, 1987. 10 с.
- 38. *Elliott E.T.* Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1986. V. 50. P. 627–633.

Changes in the Content and Composition of Organic Matter of Chernozems of the Azov Region with the Use of Direct Seeding Technology

G. V. Mokrikov^a, T. V. Vinnikova^{a,#}, M. A. Myasnikova^a, K. S. Kazeev^a, and S. I. Kolesnikov^a

^a Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology prosp. Strachki 194/1, Rostov-on-Don 344090, Russia [#]E-mail: loko261008@yandex.ru

In production agrocenoses with 9-year application of soil protection technology of direct sowing (No-Till, NT) in comparison with traditional technology of dump plowing (TT), the qualitative composition of organic matter and the content of permanganate-oxidized organic matter (PMC-4) during the growing seasons of 2016–2018 were evaluated. The predominance of humic acids (up to 32% of the total) of soils in the composition of organic matter was noted when using NT. In July, only when using NT under flax sowing, an average degree of humification ($D_{\rm gum}$) was detected, in September, regardless of the processing technology, a weak degree of humification was detected. In the studied period, the content of permanganate oxidizable organic matter (${\rm OM_{KMnO_4}}$) was also influenced by the precursor culture. After sowing coriander, flax and sunflower in 2016, there was an increased content of ${\rm OM_{KMnO_4}}$ in July and September 2017 when using NT on winter wheat compared to TT. In 2018, a high level of ${\rm OM_{KMnO_4}}$ (518–953 mg/kg of soil) after cultivation in 2017. Winter wheat, as a precursor crop, no differences between the technologies were found. Long-term use of resource-saving agrotechnology (No-Till) has led to an increase in the share of ${\rm OM_{KMnO_4}}$ compared to traditional processing technology with a weak and medium degree of humification.

Key words: No-Till, chernozems, qualitative composition of organic matter, permanganate oxidizable organic matter, degree of humification, fertility.

УЛК 631.442.1:631.474

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПОСЛЕ КОНВЕРСИИ ПАХОТНЫХ УГОДИЙ В ДРУГИЕ ВИДЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ¹

© 2020 г. А. Казлаускайте-Ядзявиче^{1,*}, Л. Трипольская¹, Й. Волунгевичюс², Е. Бакшене¹

¹ Вокеский филиал Центра аграрных и лесных наук Литвы Жалейи айкште 2, Вильнюс 02232, Литва

² Вильнюсский университет, факультет химческих и естественных наук Университето 3, Вильнюс 01513, Литва

*E-mail: asta.kaz@gmail.com
Поступила в редакцию 23.04.2018 г.
После доработки 28.01.2019 г.
Принята к публикации 10.10.2019 г.

Обобщены данные исследования (1995—2015 гг.) изменения агрохимических свойств песчаной дерново-подзолистой почвы (*Arenosol*) при трансформации пахотных угодий в другие типы землепользования (культурный луг, залежь, сосновый лес). Установлено, что в условиях умеренного климата малоплодородные пахотные почвы целесообразно трансформировать в культурные луга, что позволяет увеличить секвестрацию углерода, регулировать режим питательных веществ и сохранить сельскохозяйственную деятельность. Формирование залежей предотвращает ухудшение агрохимических свойств почвы и способствует аккумуляции углерода. При облесении супесчаных почв хвойными породами деревьев ускоряются эллювиальные процессы, вызывающие увеличение ее кислотности и снижение концентрации питательных веществ.

Ключевые слова: тип землепользования, кислотность, подвижные фосфор и калий, органический углерод.

DOI: 10.31857/S0002188120010044

ВВЕДЕНИЕ

Изменение структуры землепользования сельхозугодий в Литве определяется необходимостью предотвратить деградацию малоплодородных пахотных почв и оптимизировать их использование, обеспечивающее улучшение свойств и экоцелесообразность производства номическую сельскохозяйственной продукции. Трансформация пахотных почв (ПП) в другие типы землепользования сопровождается изменением морфологических, физических, химических и биологических свойств почвы [1-3]. По мнению [4], при снижении антропогенной нагрузки вследствие изменения землепользования, благодаря саморегуляции агроэкосистемы и преобладающих зональных почвообразующих процессов, агрохимические свойства почв частично возвращаются к своему первоначальному состоянию, однако восстановление абсолютно натурального состояния после интенсивного землепользования невозможно. В работе [5] установили, что признаки агрогенной деятельности в почвенном профиле остаются видны даже через 100 лет после прекращения аграрной деятельности. В исследованиях [6] доказано, что более четкие изменения агрогенной трансформации фиксируются в верхней части почвенного профиля (0-30-45 см), однако достоверные изменения морфологических и агрохимических свойств могут достигать глубины 100-150 см. Оценивая изменения агрохимических свойств супесчаных почв вследствие изменения землепользования, важно понять насколько быстро и сильно изменяются почвообразовательные процессы по отношению к фоновым почвам в конкретной почво-климатической зоне.

Территория Литвы расположена в зоне избыточного увлажнения, поэтому для преобладающих типов почв характерно снижение плодородия почвы из-за естественных процессов оподзоливания, лессиважа, декальцификации и подкисления. Скорость и направленность этих

Работа выполнена по долговременной программе научных исследований ЦАЛНЛ "Биопотенциал растений и качество для многофункционального использования" и является частью Национальной научной программы "Влияние долгосрочного различной интенсивности использования ресурсов на почвы различного генезиса и на другие компоненты агроэкосистем" [грант № SIT-9/2015], финансируемой Научным советом Литвы.

Тип землепользования	pH _{KCl}	P_2O_5	K ₂ O	CaO	MgO	С _{орг} , мг/кг
	F-KCI	МΓ	/кг	g	- opr 5 - 744 / 144	
Пахотная почва (ПП)	6.0	188	194	0.73	0.35	9.5
Культурный луг (КЛ)	6.8	177	174	0.73	0.35	9.9
Залежь (ЗП)	6.0	157	170	0.73	0.39	9.9
Сосновый лес (СЛ)	6.0	168	192	0.73	0.39	9.7

Таблица 1. Характеристика агрохимических свойств гумусного горизонта почвы экспериментального участка (1995 г.)

процессов после изменения типа землепользования можно оценить по основным агрохимическим показателям, характеризующих плодородие почвы: концетрации питательных веществ и органического углерода, кислотности почвы.

Цель работы — изучение изменений агрохимических свойств сформировавшейся на флювиогляциальных отложениях супесчаной почвы вследствие трансформации пахотных угодий в другие виды землепользования (культурный луг, залежь, сосновый лес).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект и место исследования. Эксперимент заложен в 1995 г. на дерново-подзолистой супесчаной почве, по классификации WRB 2014 [7] — Arenosol (54°33'49.8"N, 25°05'12.9"E). Она сформировалась на флювиогляциальных отложениях: верхняя часть профиля сложена из некарбонатной супеси, нижняя часть — из карбонатного гравия. Карбонатный слой залегает на глубине 60—80 см. Для данной почвы характерен профиль с горизонтами A-AB-B1-B2-1Ck-2Ck [7]. Гранулометрический состав (по ФАО-ЮНЕСКО): 88.7-89.4% песка (63-2000 μ m), 8.2-8.8% пыли (2-63 μ m), 2.4-2.5% ила (2 μ m) [8].

За период длительного сельскохозяйственного использования территории вследствие применения различных агротехнических приемов толщина гор. А увеличилась до 28 см, в то время как в расположенных рядом лесных насаждениях (фо-

новая почва) его толщина достигала только 22 см. Систематическое известкование и внесение удобрений снизило кислотность почвы до р H_{KCl} 6.0—6.8 и увеличило концентрацию питательных веществ: P_2O_5 — до 157—188 и K_2O — до 170—194 мг/кг (табл. 1), когда для фоновых почв данной местности характерна очень кислая реакция (р $H \approx 4.5$) и низкое содержание фосфора и калия ($\approx 100~$ мг/кг). Концентрация C_{opr} достигала 9.5—9.9 мг/кг, что характерно для почв легкого гранулометрического состава.

Схема эксперимента. Схема эксперимента включала 4 различных типа землепользования: 1- контроль — пахотная почва (ПП) (1a- без удобрений, 16- оптимальные дозы удобрений), 2- культурный луг (**КЛ**) (2a- без удобрений, 26- оптимальные дозы удобрений), 3- залежь (3П), 4- сосновый лес (**СЛ**) (рис. 1). Общая площадь каждой площадки землепользования составляла 400 м^2 ($20 \times 20 \text{ м}$). Площадка пахотной почвы и культурного луга была разделена на 2 части (по 200 м^2) — удобряемую минеральными удобрениями и без удобрений.

На площадке пахотной почвы в 1995—2015 гг. выращивали рекомендованные для песчаных и супесчаных почв сельскохозяйственные культуры. Их соотношение в севообороте за период исследований составило: 38.1% злаковых зерновых (Secale cereale L, Hordeum vulgare L, Triticosecale wittmack, Triticum aestivum L.), 19.0% гречишных (Fagopyrum esculentum Moench), 14.3% многолетних

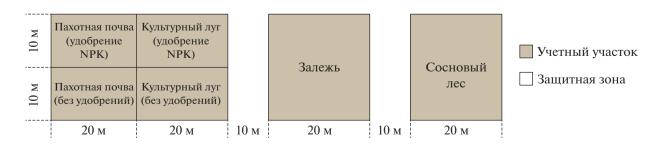


Рис. 1. Схема эксперимента.

бобовых трав (Trifolium pratense L.), 14.3% пропашных (Solanum tuberosum L.) ir 14.3% других (Brassica napus L., Lupinus angustifolius L.). Растения удобряли минеральными NPK-удобрениями, дозы которых были рассчитаны по потребности вырашиваемых растений и содержанию этих элементов в почве и в среднем составили : N0-100Р30-60К30-120. В 1995 и 2000 гг. на удобряемой части севооборота был внесен навоз 40 т/га, после этого никаких органических удобрений не вносили. За весь период исследования (1995— 2015 гг.) среднегодовая доза питательных веществ, внесенных с органическими и минеральными удобрениями, составила N62.7P53.0K77.1. В течение эксперимента в основном использовали простые удобрения (N_{aa} , P_{cr} , K_{x}). В севооботорте применяли общепринятую для зоны агровозделывания сельскохозяйственных технику культур.

На площадке культурного луга в 1995—2006 гг. выращивали смесь многолетних бобово-злаковых трав, которая состояла из люцерны (Medicago varia L.) и 4-х злаковых трав — овсяницы красной (Festuca rubra L.), костреца безостого (Bromus inermis Leyss.), ежи сборной (Dactylis glomerata L.) и мятлика лугового (Poa pratensis L.). В 2007 г. травостой был пересеян, и в 2007—2015 гг. выращивали аналогичную смесь многолетних трав, только ежа сборная была заменена на тимофеевку (Phleum pratense L.). Под травы вносили N60P90K120. За вегетационный период проводили 2 укоса трав.

На площадке с залежью в течение проведения эксперимента сформировался фитоценоз из натуральной травяной растительности, характерной для супесчаных почв данного региона. На площадке леса были высажены саженцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В 1995 г. было посажено 400 экз. (10 тыс. экз./га) саженцев, в 2015 г., после прореживания деревьев, плотность составила 3509 экз./га.

Лабораторные методы исследования. Определение агрохимических свойтв почвы было выполнено в 1995 г. (перед закладкой эксперимента) и в 2015 г. (через 21 год после изменения типа землепользования). На каждой площадке землепользования из гумусного горизонта (0—25 см) были взяты смешанные образца почвы в 3-х повторностях (n=36).

В почвенных образцах определяли: pH_{KCl} – ISO 10390:2005 потенциометрическим методом (в суспензии 1 м КСl/л), содержание органического С (C_{opr}) – ISO 10694:1995, подвижных P_2O_5 и K_2O – методом Эгнера—Римо—Доминго (A—L

метод); обменного кальция и магния — методом атомной абсорбции (ГОСТ 26208-84).

Результаты эксперимента обработаны методом дисперсионного анализа. Существенность различий между вариантами оценена при помощи критерия Фишера (F) и HCP при 5%-ном уровне значимости. Для агрохимических показателей также рассчитана стандарная ошибка средней (SE).

Метеорологические условия. Место проведения эксперимента относится к средней широте климатической зоны. Среднегодовая температура воздуха (стандартная климатическая норма -*СКН*) составляет 6.0°C, годовое количество осадков — 664 мм [9]. В период проведения эксперимента (1995–2015 гг.) избыточно влажными были годы, когда количество осадков превышало СКН на 10%: 1998, 2005, 2009, 2010—2015 гг. В эти годы количество осадков варьировало от 731 до 976 мм. Только 1 год (1996 г.) был засушливый, осадков выпало на 28% меньше нормы (519 мм). В течение эксперимента температурный режим также очень отличался от СКН. Начиная с 1999 г., среднегодовая температура воздуха ежегодно превышала CKH на 0.5-1.8°C. Особенно теплыми были 1999, 2000, 2006—2008 и 2013—2015 гг., температура воздуха была выше CKH более, чем на 1°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотно-основные свойства почвы. Продолжая традиционное использование почвы для просельскохозяйственной продукции изводства (площадка пахотной почвы) с оптимальным уровнем применения удобрений, кислотность почвы за 21 год снизилась с 6.0 ± 0.17 до 7.3 ± 0.06 ед. pH $(F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}})$ (табл. 2). Снижение кислотности было установлено и в неудобряемой ПП. Существенное уменьшение кислотности без применения известковых материалов трудно объяснимо. Однако в данном случае такие изменения могли быть связаны с нейтрализующим действием карбонатных частиц гравия, поступающих в верхний горизонт почвы из нижележащих карбонатных слоев в процессе обработки почвы, а также смягчающим действием кальция суперфосфата, примененного для удобрения культур. Аналогичные результаты уменьшения кислотности почвы в севооборотах по сравнению с лугами и лесными угодьями, описаны в работах [10–12]. Анализируя причины такого явления указывали, что снижение кислотности могло быть связано с разложением растительных остатков, в результате которого освобождающиеся ионы аммония нейтрализуют кислотность почвы. В почве ПП

		Обменный Ca Обменный Mg		Подвижный		
Тип землепользования	$\mathrm{pH}_{\mathrm{KCl}}$	Man	в/кг	P ₂ O ₅ K ₂ O		
		WJK	Б/ КІ	мг/кг		
Пахотная почва без удобрений	7.3 ± 0.0	2780 ± 30	551 ± 8	153 ± 4	95 ± 8	
Пахотная почва, удобрение NPK	7.3 ± 0.1	2260 ± 130	352 ± 9	232 ± 1	146 ± 2	
Культурный луг без удобрений	6.1 ± 0.0	1100 ± 2	124 ± 5	84 ± 4	61 ± 1.5	
Культурный луг, удобрение NPK	4.9 ± 0.0	848 ± 46	76 ± 1	210 ± 24	49 ± 0.6	
Залежь	6.6 ± 0.0	1570 ± 30	224 ± 6	171 ± 0.6	123 ± 7	
Сосновый лес	5.6 ± 0.1	916 ± 14	116 ± 3	126 ± 1	96 ± 4	
HCP_{05}	0.2	180	18.9	30	15	

Таблица 2. Агрохимические показатели свойств почвы спустя 21 год после трансформации пахотной почвы в другие типы землепользования

содержалось большое количество обменного кальция и магния — соответственно 2260 ± 130 мг Са/кг и 352 ± 9 мг Mg/кг в удобренной почве и 2780 ± 30 мг Са/кг и 551 ± 8 мг Mg/кг — в неудобренной. Более значительное снижение концентрации этих элементов при внесении удобрений (P < 0.05) обусловлено большим их выносом урожаем культур севооборота.

При трансформации ПП в КЛ, травостой которого был сформирован из люцерны и злаковых трав, кислотность гор. А за 21 год увеличилась с 6.8 ± 0.17 до 6.1 ± 0.00 ед. pH в неудобренной почве и до 4.9 ± 0.00 ед. pH в удобренной (P < 0.05). Различная степень снижения кислотности обусловлена интенсивным поглощением кальция и магния почвы многолетними травами. На удобренной площадке, урожай трав был в 1.71 раза больше, чем без применения удобрений, соответственно и вынос кальция и магния биомассой трав был значительно выше. За период проведения исследования с урожаем трав из почвы на удобренной площадке было удалено 1550 кг $Ca^{2+} + Mg^{2+}/ra$, без применения удобрений — 913 кг $Ca^{2+} + Mg^{2+}/га$, что отразилось на изменениях величины рН почвы и содержании обменных катионов в почве КЛ.

В почве КЛ концентрация Ca^{2+} и Mg^{2+} была более чем в 2 раза меньше (P < 0.05), по сравнению с почвой ПП. Снижение кислотности в почве КЛ также было обусловлено и вымыванием кальция в подпахотные горизоты, на величину которого влиял возраст травостоя. По данным [13], с увеличением возраста травостоя и в зависимости от доли бобовых, потери кальция от вымывания могут возрасти в 5-6 раз: с 15-22 кг Ca^{2+} /га в первый год пользования до 92-104 кг/га на 4-й год. В данном эксперименте травы без пересева выращивали 10 лет, и это могло увеличить выщелачивание

Са²⁺ и Mg²⁺ и способствовать более быстрому подкислению почвы. Противоположные процессы изменения рН происходили при трансформации ПП в ЗП, на которой развивался натуральный фитоценоз. При таком землепользовании за 21-летний период кислотность почвы уменьшилась с 6.0 ± 0.17 до 6.6 ± 0.03 рН ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$). В противоположность КЛ, в ЗП надземную часть растительности не удаляли, и она после завершения вегетации минерализовалась на поверхности почвы, освобождая щелочноземельные элементы, которые частично компенсировали потери от выщелачивания. В результате этого содержание обменного кальция и магния в ЗП в 2015 г. было соответственно на 42.6 и 80.6% больше по сравнению с почвой неудобренного КЛ.

Трансформация пашни в сосновый лес за 21 год привела к подкислению гор. А на 0.4 ед. рН $(F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}})$. Процесс подкисления был обусловлен 3-мя факторами — поглощением кальция и магния деревьями сосны для формирования биомассы, их выщелачиванием и подкисляющим действием органических кислот, образующихся в процессе разложения опада сосны. По сравнению с залежью, в почве СЛ содержание обменного кальция было меньше на 71.4, обменного магния на 93%. Исследования, выполненные российскими учеными, показали, что через 17 лет после посадки соснового леса кислотность почвы увеличилась на 1.9 ед. рН [5]. Аналогичные данные о влиянии лесонасаждений на кислотность почвы представлены в работах [14, 15]. Таким образом, при конверсии пахотной почвы в сосновый лес усиливались характерные для дерново-подзолистых почв эллювиальные процессы, что не способствовало стабилизации их плодородия. Это зональные почвообразовательные процессы данной географической широты, характеризующие

начальные процессы ренатурализации агрогенной почвы.

Подвижный фосфор и калий. Концентрация подвижных фосфора и калия в почве разного типа землепользования зависела от баланса внесения и отторжения этих элементов в период проведения эксперимента и от их сорбции почвенными коллоилами.

Вследствие выноса элементов урожаем культур и вымывания в нижележащие слои в гор. А пахотной почвы концентрация P_2O_5 без применения удобрений снизилась на 35 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge$ $\geq F_{\text{теор}}$), $\mathrm{K}_2\mathrm{O}$ — на 99 мг/кг ($F_{\mathrm{факт}}\!\geq\!F_{\mathrm{теор}}$). Более значительное уменьшение концентрации калия по сравнению с фосфором связано с большим выносом этого элемента урожаем и более интенсивным вымыванием из пахотного горизота [16]. Внесение оптимальных доз NPK и навоза (среднегодовая доза N63P53K71) способствовало накоплению подвижного фосфора в почве, и его концентрация за 21 год увеличилась на 44 мг ${
m P_2O_5/\kappa r}$ ($F_{
m факт} \geq F_{
m teop}$). Однако внесенных доз калийных удобрений было недостаточно, они не компенсировали его вынос урожаем, и концентрация подвижного калия снизилась за этот период на 48 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$). На неудобренной пахотной почве снижение концентрации было в 2.06 раза больше.

В почве КЛ, по сравнению с ПП, изменения концентрации питательных веществ были несколько иными. При положительном балансе происходила аккумуляция подвижных соединений фосфора в гор. А, и через 21 год после начала эксперимента в удобренной почве его концентрация увеличилась на 33 мг/кг ($F_{\rm факт} \ge F_{\rm reop}$), в неудобренной — снизилась на 93 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$). В противоположность фосфору, содержание калия в гор. Аһ уменьшилось как в удобренной, так и в неудобренной почве, хотя внесенное количество калия с удобрениями полностью восполняло его вынос биомассой трав. Возможно, уменьшение концентрации калия было связано с более интенсивным его выщелачиванием в почве луговых угодий.

В залежной почве происходила постепенная аккумуляция фосфора, и за 21 год его концентрация в гор. А увеличилась на 14 мг/кг ($F_{\rm факт} \ge F_{\rm reop}$). Растения фитоценоза, поглощая фосфор из более глубоких слоев, связывали его в биомассе, при разложении которой в дальнейшем образовывались подвижные соединения фосфора, накапливаясь в верхнем горизонте почвы. Аналогичный процесс происходил и с калием, только из-за более слабой сорбции его соединений в супесчаной

почве концентрация подвижного калия за 21 год в гор. А снизилась на 47 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$).

В почве под сосновым лесом содержание подвижного фосфора за период проведения эксперимента снизилось на 42 мг/кг ($F_{\rm факт} \geq F_{\rm reop}$), подвижного калия — на 96 мг/кг ($F_{\rm факт} \geq F_{\rm reop}$), т.к. поглощаемые деревьями элементы на длительное время остаются связанными в биомассе деревьев и не возращаются в почву, как это происходит при минерализации травянистой растительности залежи.

Органический углерод. Конверсия ПП в другие виды землепользования отразилась на процессах минерализации и гумификации растительных остатков, скорость и направленность которых зависела от количества и биохимичекого состава растительности, а также от обработки почвы. Как и следовало ожидать, дальнейшее использование супесчаной почвы в качестве пахотной без применения органических удобрений сопровождалось снижением содержания Сорг, и за 21 год оно уменьшилось на 0.7 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$) (рис. 2). Частично запасы Сорг восстанавливались за счет выращивания в севообороте многолетних трав и бобовых культур, однако этого было недостаточно для полного восстановления запасов ОВ. Без применения удобрений потери Сорг в ПП были более значительными, и его концентрация снизилась на 2.7 мг/кг ($F_{\text{факт}} \ge F_{\text{теор}}$), что было связано с меньшим поступлением растительных остатков в неудобренную почву.

Полученные результаты подтвердили выводы выполненных в разных странах исследований, что в пахотных почвах легкого гранулометрического состава аккумуляция $C_{\rm opr}$ достигается только при внесении навоза и выращивании бобовозлаковых травосмесей [17—19]. В почвах тяжелого гранулометрического состава, которые обладают более сильной сорбцией, минерализация OB проходит более медленно, стабилизировать или увеличить его накопление возможно, применяя зеленое удобрение и солому [20].

Залужение пахотной почвы снизило темпы минерализации OB, и даже без внесения удобрений за 21 год в гор. А его концентрация уменьшилась незначительно — только на 0.5 мг/кг ($F_{\phi \text{акт}} \geq F_{\text{теор}}$), в то время как в неудобренной ПП потери были в 5 раз больше. Многие исследователи подтверждают, что для луговых фитоценозов характерна акумуляция $C_{\text{орг}}$ в почве [21, 22]. В работе [23] установили, что более интенсивное накопление $C_{\text{орг}}$ в почве происходит при выращивании нескольких видов трав, и соотношение функцио-

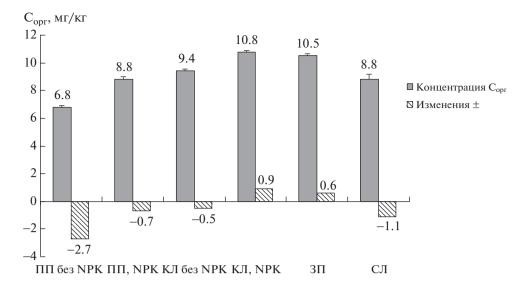


Рис. 2. Концентрация $C_{opr}(C, mr/\kappa r \pm Sx)$ в почве после трансформации пахотной почвы в другие типы землепользования (2015 г.).

нальных групп важно для сохранения запасов углерода и азота в луговой почве. В данном эксперименте в удобренной почве луга концентрация $C_{\rm opr}$ за 21 год увеличилась на 0.9 мг/кг ($\hat{F}_{\rm факт} \ge F_{\rm reop}$). Следует отметить и тот факт, что в луговой почве также увеличилась толщина гор. А. Только за счет минерализации отмирающей части корневой системы и послеуборочных остатков трав толщина гор. А в неудобренной почве за 21 год увеличилась на 2 см, а в удобренной — на 4 см, что было связано с формированием более обильной корневой системы и надземной массы при внесении минеральных удобрений. В работе [24] утверждали, что в луговых фитоценозах аккумуляция C_{opr} зависит от величины биомассы корневых систем растений, и комбинация основных бобово-злаковых трав с С₄-типом фотосинтеза позволяет увеличить накопление углерода в экосистеме.

В ЗП, как и в почве КЛ, за 21 год также значительно увеличились толщина гор. Аh (на 4–6 см) и концентрация $C_{\rm opr}$ (на 0.6 мг/кг, $F_{\rm факт} \geq F_{\rm теор}$). Хотя на ЗП формируется менее продуктивная по сравнению с КЛ натуральная травяная растительность, однако ее надземная часть не удаляется с поля, и завершившие вегетацию растения минерализуются на поверхности почвы. Это определяет более значительное накопление $C_{\rm opr}$ в гор. А по сравнению с почвой КЛ. В работе [25] установили, что скорость накопления $C_{\rm opr}$ в травяных фитоценозах зависит от типа растительности. При формировании на пахотной почве натуральной залежи запасы $C_{\rm opr}$ в слое 0–20 см за 6 лет увели-

чились на 5.1%, а когда пахотная земля было преобразована в культурный травостой и потом превращена в залежь, запасы $C_{\rm opr}$ увеличились на 22.6%.

При облесении малоплодородных пахотных земель существенно изменяется цикл углерода в экосистеме. Его аккумуляция концентрируется в биомассе деревьев, а запасы в почве пополняются в основном за счет углерода микробиоты и опада деревьев. Роль корневых систем в процессе накопления $C_{\text{орг}}$ уменьшается. По данным эксперимента, в супесчаной почве под СЛ за 21 год концентрация $C_{\text{орг}}$ снизилась на 0.9 мг/кг ($F_{\text{факт}} \geq$ $\geq F_{\text{теор}}$), но при этом на 3 см увеличилась толщина гор. Ah. По сравнению с ПП облесение помогло снизить интенсивность минерализации ОВ почвы в 3 раза (P < 0.05), однако было менее эффективным по сравнению с ЗП и КЛ. Аналогичные данные приведены в работе [26]. Установили, что лесонасаждение хвойными разновидностями деревьев помогает накопить и сохранить в почве запасы углерода, но даже спустя несколько десятилетий после преобразования пахотного угодья в лес, этот эффект был выражен слабо и не компенсировал потери C_{opr} из-за предыдущего активного культивирования. Сравнивая темпы аккумуляции $C_{\text{орг}}$ в почве, полагают, что в луговых фитоценозах этот процесс идет более активно за счет сильной и хорошо развитой корневой системы трав [27, 28]. В работе [29] уточнили, что в хвойных лесах процесс накопления Сорг зависит от возрата насаждений. В молодых лесах (до 30 лет) наблюдают сокращение запасов OB почвы, а в лесах старше 30 лет — их увеличение, что связано с количеством опада, которое зависит от возраста деревьев и его биохимического состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформация малоплодородных пахотных угодий в другие типы землепользования в первую очередь должна решать проблемы предотвращения деградации плодородия почвы и вместе с тем учитывать экологические, экономические и социальные последствия изменения сельскохозяйственной деятельности. Результаты эксперимента выявили, что в умеренном климате, после конверсии пахотной земли В другие землепользования происходит разнонаправленное изменение агрохимических свойств почвы. С точки зрения стабилизации плодородия более эффективным является формирование залежей. Этот тип землепользования ускоряет секвестрацию $C_{\text{орг}}$ (+0.03 мг/кг в год), не увеличивает кислотность почвы, позволяет сохранить исходное содержание питательных веществ (за исключением легковыщелачиваемых элементов). Однако, такой тип землепользования предусматривает отказ от сельскохозяйственной деятельности и экономически убыточен.

Конверсия пахотной почвы в хвойный лес усиливает эллювиальные прцессы, что отрицательно влияет на ее агрохимические свойства: увеличивается кислотность почвы (-0.02 ед. р $H_{\rm KCl}$ в год), снижается концентрация питательных веществ и в первоначальный период — концентрация $C_{\rm opr}$. Таким образом, при облесении происходит дальнейшая деградация ранее окультуренной пахотной почвы.

Учитывая экологические и экономические аспекты, в зоне умеренного климата малоплодородные пахотные угодья целесообразно трансформировать в культурные луга. Такой тип землепользования способствует увеличению секвестрации углерода в почве (+0.04 мг/кг в год), позволяет повысить продуктивность растений и сохранить сельскохозяйственную деятельность. Однако при залужении пахотных земель увеличивается поглощение растениями базовых элементов и их вымывание из гумусного горизонта почвы, вследствие чего ухудшаются агрохимические показатели: увеличивается кислотность (-0.09 ед. р H_{KCl} в год), значительно уменьшается концентрация подвижного калия и обменного кальция. При этом типе землепользования для поддержания почвенного плодородия и продуктивности растений, необходимо применение минеральных удобрений и мелиорантов.

Благодарим доктора М. Петрова и доктора С. Марцинкониса, принимавших участие в выполнении эксперимента в 1995—2012 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Прокофьева Т.В., Попутников В.О.* Антропогенная трансформация почв парка Покровское—Стрешнево (г. Москва) и прилегающих жилых кварталов // Почвоведение. 2010. № 6. С. 748—758.
- 2. Новикова А.Ф., Конюшкова М.В. Антропогенная трансформация почв северных Ергеней (исследования на первом опытном участке Аршань-Зельменского стационара) // Почвоведение. 2013. № 3. С. 268—281.
- 3. Kalinina O., Goryachkin S.V., Krause S.E., Lyuri D.I., Giani L. Chronosequential alterations of properties of post-agrogenic Chernozems of the Kursk steppe zone of Russia under self-restoration // Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 2010. P. 21–24.
- Lv H., Liang Z. Dynamics of soil organic carbon and dissolved organic carbon in Robina pseudoacacia forests // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2012. V. 12. № 4. P. 763–774.
- Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2014. V. 207–208. P. 117–128.
- 6. *Veenstra J.J.*, *Burras C.L*. Soil profile transformation after 50 years of agricultural land use // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2015. V. 79. № 4. P. 1154–1162.
- 7. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. FAO, Rome.
- 8. Guidelines for soil description. FAO, Rome. 2006. 109 p.
- Galvonaitė A., Misiūnienė M., Valiukas D., Buitkuvienė M.S. Lietuvos klimatas. Monografija. 2007. Vilnius, 207 p.
- Yimer F., Ledin S., Abdulakdir A. Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, southeastern highlands of Ethiopia // Forest Ecol. Manag. 2007. V. 242. P. 337–342.
- 11. Duguma L.A., Hager H., Sieghardt M. Effects of land use types on soil chemical properties in smallholder farmers of Central Highland Ethiopia // Ekologia (Bratislava). 2010. V. 29. № 1. P. 1–14.
- 12. *Xu J.M.*, *Tang C.*, *Chen Z.L*. The role of plant in pH change of acid soils differing in initial pH // Soil Biol. Biochem. 2006. V. 38. № 4. P. 709–719.
- 13. Семенов Н.А., Муромцев Н.А. Влияние запаханной дернины на продуктивность трав и инфильтрационные потери химических элементов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2006. № 58. С. 39—44.
- 14. Holubík O., Podrázský V., Vopravil J., Khel T., Remeš J. Effect of agricultural lands afforestation and tree species composition on the soil reaction, total organic carbon and nitrogen content in the uppermost mineral soil profile // Soil Water Res. 2014. V. 9. P. 192–200.

- 15. Мостовая А.С., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Хохлова О.С., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Изменение микробиологической активности серых лесных почв в процессе естественного лесовосстановления // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. химия. биология. фармация. 2015. № 2. С. 64—72.
- 16. Tripolskaja L., Verbyliene I., Razukas A., Bakšienė E., Sidlauskas G. Changes in cation migration in Luvisol resulting from the application of different forms of mineral fertilizers // J. Food Agric. Environ. 2014. V. 12. № 2. P. 701–705.
- 17. Jin Z., Dong Y., Wang Y., Wei X., Wang Y., Cui B., Zhou W. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China // Sci. Total Environ. 2014. V. 485–486. P. 615–623.
- 18. *Katterer T., Bolinder M.A., Berglund K., Kirchmann H.*Strategies for carbon sequestration in agricultural soil in northern Europe // Acta Agr. Scand. 2012. V. 62. № 4. P. 181–198.
- 19. *Lal R*. Soil carbon management and climate change // Carbon Manag. 2013. V. 4. № 4. P. 439–462.
- Tripolskaja L., Mašauskas V., Adomaitis T., Karčauskienė D., Vaišvila Z. Agroekosistemų komponentų valdymas. Ilgalaikių agrocheminių tyrimų rezultatai. Monografija. Kėdainių r., Akademija, 2010. 567 p.
- Stypinski P., Mastalerczuk G. Carbon sequestration by polish grassland biomass // Grassland Sci. Europ. 2006. V. 11. P. 763–765.
- 22. Barančíková G., Makovníková J., Halas J. Effect of land use change on soil organic carbon // Agriculture (Poľnohospodárstvo). 2016. V. 62. № 1. P. 10–18.

- 23. De Deyn G.B., Quirk H., Yi Z., Oakley S., Ostle N.J., Bardgett R.D. Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility // J. Ecol. 2009. V. 97. № 5. P. 864–875.
- 24. Fornara D.A., Tilman D. Plant functional composition in Xuences rates of soil carbon and nitrogen accumulation // J. Ecol. 2008. V. 96. P. 314–322.
- 25. Zhang L., Xie Z., Zhao R., Wang Y. The impact of land use change on soil organic carbon and labile organic carbon stocks in the Longzhong region of loess Plateau // J. Arid. Land. 2012. V. 4. № 3. P. 241–250.
- Zhiyanski M., Glushkova M., Ferezliev A., Menichetti L., Leifeld J. Carbon storage and soil property changes following afforestation in mountain ecosystems of the Western Rhodopes, Bulgaria // Forest. 2015. V. 9. P. 626–634.
- 27. Conant R.T., Cerri C.E.P., Osborne B.B., Paustian K. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis // Ecol. Appl. 2017. V. 27. P. 662–668.
- 28. Wei J., Cheng J., Li W., Liu W. Comparing the effect of naturally restored forest and grassland on carbon sequestration and its vertical distribution in the Chinese Loess Plateau // PLoS ONE. 2012. V. 7. № 7. P. 1–8.
- Barcena T.G., Kier L.P., Vesterdal L., Stefansdottir H.M., Gundersen P., Sigurdsson B.D. Soil carbon stock change following afforestration in Nothern Europe: a metaanalysis // Global Change Biol. 2014. V. 18. P. 2393— 2405.

Changes of Loamy Sand Soil Properties Following Conversion of Arable Soils to Other Land Use Types

A. Kazlauskaite-Jadzevice^{a, #}, L. Tripolskaja^a, J. Volungevicius^b, and E. Baksiene^a

^aLithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Voke Branch (Lithuania) Vilnius, Lithuania

^b Vilnius University, Faculty of Chemistry and Geosciences (Lithuania) Vilnius, Lithuania

#E-mail: asta.kaz@gmail.com

The experimental results (1995–2015) showed the agrochemical properties changes in loamy sand *Arenosol* associated with arable land transformation into other types of land uses (managed grassland, agriculture abandonment, pine afforested). It has been determined that low productivity arable land transformation into managed grassland in a temperate climate zone has a good effect on soil organic carbon sequestration, improves regulation of nutrients regime and allows preserve agricultural activity. Transformation into abandonment of agricultural lands may be the best ways to encourage the soil fertility, especially enlarge accumulation of carbon in soil. Afforestation in loamy sand with coniferous (pine) species accelerates eluvial processes that leads to the soil fertility degradation (increase acidity, decrease concentration of available plant nutrition).

Key words: land use, acidity, available phosphorus and potassium, organic carbon.

———— Удобрения ———

УДК 631.81:631.821:631.559:633.11"324"(470.12)

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ И ИЗВЕСТКОВАНИЯ НА УРОЖАЙНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ХЛЕБОПЕКАРНЫЕ КАЧЕСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2020 г. А. Н. Налиухин^{1,*}, Д. А. Белозёров¹

¹ Вологодская государственная молочно-хозяйственная академия им. Н.В. Верещагина 160555 Вологда, ул. Шмидта 2, Россия

*E-mail: naliuhin@yandex.ru Поступила в редакцию 13.05.2019 г. После доработки 26.05.2019 г. Принята к публикации 10.10.2019 г.

Повышение урожайности озимой пшеницы должно сопровождаться улучшением качества получаемого в стране зерна. В настоящей работе представлена сравнительная эффективность органических, минеральных, органо-минеральных систем удобрения и известкования при возделывании озимой пшеницы сорта Московская 56. Показано, что на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почве в условиях севера Нечерноземной зоны России возможно получение урожайности озимой пшеницы 35.6—42.8 ц/га, в благоприятные годы — 75.6 ц/га. Такой уровень урожайности озимой пшеницы достигается при органо-минеральной системе удобрения, основанной на внесении навоза 50 т/га в занятом пару, минеральных удобрений в дозе N30P30K60 до посева и N50 в подкормку на фоне известкования. При этом получается зерно с содержанием белка 14.1%, сырой клейковины — 31.3% II-й группы качества, с объемным выходом хлеба 870 см³, при общей хлебопекарной оценке 4.3 балла. Применение только органических удобрений не позволило получить зерно выше 4-го класса.

Ключевые слова: озимая пшеница, удобрения, урожайность, качество зерна, хлебопекарная оценка, северное Нечерноземье.

DOI: 10.31857/S000218812001010X

ВВЕДЕНИЕ

Для дальнейшего повышения валового сбора зерна в России до 145—150 млн т необходимо повысить урожайность зерновых культур до 27—30 ц/га, что невозможно без расширенного воспроизводства плодородия почв путем применения минеральных, органических удобрений и химических мелиорантов [1].

В последние годы с созданием новых высокоурожайных, зимостойких сортов озимой пшеницы, пригодных для хлебопечения, значительно возрастает интерес к возделыванию этой культуры в Нечерноземной зоне страны [2]. Например, в опытах ЦОС ВНИИА наиболее высокие и устойчивые урожаи зерна озимой пшеницы (6.5— 7.5 т/га) с содержанием белка 12.8—14.0%, клейковины — 28—30% и хорошими технологическими и хлебопекарными качествами получены при внесении удобрений в дозах N90-135Р90К120 [3]. Большое влияние на изменение урожайности и качества зерна оказывали погодные условия в период активной вегетации культуры. Исследования, проведенные на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в длительном опыте на ДАОС, показали, что систематическое применение навоза и минеральных удобрений повышало урожайность озимой пшеницы сорта Московская 39 до 6.6—7.1 т/га против 3.9 т/га на неизвесткованном контроле. Авторы отмечали увеличение под действием удобрений содержания белка в зерне, что в сочетании с ростом урожайности привело к значительному увеличению его сбора и выноса элементов питания урожаем [4].

В последние годы, площади, отводимые под озимую пшеницу, увеличиваются и в северном Нечерноземье. Однако на практике средняя урожайность в регионе составляет всего 1.8-2.0 т/га и менее. Во многом это обусловлено низким уровнем внесения удобрений. Например, в Вологодской обл. на 1 га пашни в 2015 г. с минеральными удобрениями поступило: азота -16.7, фосфора -8.1 и калия -8.8 кг/га. Дозы органических удобрений составили всего 3.0 т/га, в то время как для обеспечения бездифицитного баланса гумуса

требуется не менее 10—12 т/га [5]. Как следствие, в течение 22 лет складывается отрицательный баланс азота и фосфора, 24 лет — калия в земледелии региона, что привело к снижению содержания подвижных форм фосфора и калия в почве, а также повышению кислотности из-за ничтожно малых объемов известкования [5].

С этих позиций стационарный полевой опыт с различными системами удобрения, заложенный на опытном поле Вологодской ГМХА, представляет собой основу для изучения динамики свойств почвы и продуктивности культур севооборота, разработки научно-практических рекомендаций по применению средств химизации для хозяйств региона [6—8].

Цель работы — оценка влияния органических, минеральных, органо-минеральных систем удобрения на фоне известкования и без него на продуктивность, технологические и хлебопекарные качества зерна озимой пшеницы сорта Московская 56, возделываемой на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почве, типичной для Нечерноземья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в двухфакторном полевом опыте, заложенном на опытном поле кафедры растениеводства, земледелия и агрохимии Вологодской ГМХА осенью 2014 г., в котором изучали сравнительную эффективность навоза, минеральных и органо-минеральных (ОМУ) удобрений в зависимости от известкования. Почва опытного участка - дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая окультуренная. Пахотный горизонт мощностью 20 см перед закладкой опыта имел следующие агрохимические показатели: pH_{KCl} 5.1–5.2, содержание почвенного органического углерода (\mathbf{C}_{opr}) — 1.50—1.86%, подвижного фосфора -251-296, калия -116-148 мг/кг почвы (по Кирсанову), гидролитическая кислотность (по Каппену) -3.40-4.14 ммоль(экв)/100 г, сумма поглощенных оснований (по Каппену-Гильковицу) — 10.5-12.8 ммоль(экв)/100 г почвы [9].

Исследование проводили в 5-польном полевом севообороте: викоовсяная смесь (на зеленую массу) — озимая пшеница — ячмень (с подсевом клевера лугового) — клевер луговой — овес. Опыт развернут в пространстве на 3-х последовательно вводимых полях. Площадь делянок — 100 м², повторность трехкратная, размещение вариантов систематическое.

Озимую пшеницу сорта Московская 56 селекции ФИЦ "Немчиновка" возделывали последовательно на каждом из 3-х полей в 2016—2018 гг.

после викоовсяной смеси, выращенной на зеленую массу.

В опыте применяли различные системы удобрения (фактор B): органическую — вариант 2, минеральную — вариант 3, органо-минеральную — варианты 4—6, которые изучали на двух фонах (фактор A): с известкованием и без внесения Са-СО₃ (табл. 1). В контрольном варианте 1 удобрения не вносили. К моменту посева озимой пшеницы под действием известкования в дозе по 1.0 $H_{\rm r}$, сформировали 2 уровня кислотности — р $H_{\rm KCl}$ 5.8—5.9 и р $H_{\rm KCl}$ 5.1—5.2.

Все системы удобрения за полную ротацию севооборота уравновешены по количеству внесенного азота. Количество азота, фосфора и калия, вносимых с минеральными удобрениями, соответствовало их поступлению с навозом в дозе 50 т/га (N150). В варианте 5, при совместном внесении органических и минеральных удобрений общее количество д.в. было в 2 раза больше по сравнению с вариантами 2—4 и 6, что составляло N300P240K450.

Схема внесения удобрений под озимую пшеницу в 2016—2018 гг. была следующей, варианты: 1- контроль (без удобрений), 2- навоз 50 т/га, 3- N30P30K60 + N50 в подкормку, 4- навоз 25 т/га + N15P15K30 + N25 в подкормку, 5- навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 в подкормку, 6- ОМУ $_6$ (N30P30K34) + N50 в подкормку.

Органические и известковые удобрения вносили в занятом викоовсяном пару под вспашку. На озимой пшенице изучали 1-й год их последействия. Минеральные и органо-минеральные удобрения вносили ежегодно согласно схеме опыта осенью до посева озимой пшеницы. Весной в вариантах 3, 5 и 6 в период возобновления весенней вегетации проводили подкормку аммиачной селитрой в дозе N50, в варианте 4 — N25.

Удобрения вносили в форме Naa, Kx, а также комплексного азотно-фосфорно-калийного удобрения марки 15:15:15+7%S; органо-минерального удобрения — OMY_6 (7:7:8 + микроэлементы) производства OAO "Буйский химический завод", модифицированного биопрепаратом бисолбифит [10]. В качестве известкового удобрения использовали известняковую муку (98% CaCO₃).

Учет урожайности озимой пшеницы проводили сплошным методом в фазе полной спелости с использованием малогабаритного комбайна Sampo Terrion 2010. Урожайность зерна приводили к стандартной, 14%-ной влажности, соломы — к 16%-ной влажности. Солому после уборки оставляли в измельченном виде на делянках с последующей запашкой.

Таблица 1. Влияние различных систем удобрения на урожайность зерна озимой пшеницы сорта Московская 56 (2016—2018 гг.)

э. <i>А</i> вание			Урожайн		Прибавка к контролю		
Фактор <i>А</i> – известковани	Фактор B (удобрения)	2016 г.	2017 г.	2018 г.	среднее за 3 года	ц/га	%
41)	1. Контроль (без удобрений)	30.4	20.5	27.5	26.1	_	_
У в	2. Навоз* 50 т/га	44.7	23.2	32.5	33.5	7.4	28.3
3	3. N30P30K60 + N50 π/κ	55.4	25.3	33.8	38.2	12.1	46.4
Без	4. Habo3 25 τ/га + N15P15K30 + N25 π/κ	60.1	27.8	32.5	40.1	14.0	53.6
STS	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	64.6	32.5	37.6	44.9	18.8	72.0
Без известкования (A_1)	6. $OMY_6 (N30P30K34) + N50 \pi/\kappa$	61.8	29.8	32.2	41.3	15.2	58.2
Средн	ние фактора A_1	52.8	26.5	32.7	37.4	11.3	43.3
	1. Контроль (без удобрений)	36.8	22.0	28.7	29.2	_	_
(\mathcal{A}_2)	2. Навоз 50 т/га	55.5	26.1	34.6	38.7	9.5	32.5
есті <i>Н</i> г (3. N30P30K60 + N50 π/κ	65.6	27.8	38.3	43.9	14.7	50.3
Известь 1.0 <i>H</i> _г (⁄	4. Навоз 25 т/га + N15P15K30 + N25 п/к	68.8	30.5	39.4	46.2	17.0	58.2
Изв по 1.0	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	75.6	35.6	42.8	51.3	22.1	75.7
F	6. $OMY_6 (N30P30K34) + N50 \pi/\kappa$	67.8	32.7	37.1	45.9	16.7	57.2
Средние фактора A_2		61.7	29.1	36.8	42.5	13.3	45.5
HCP_{05} фактора A		2.5	1.5	1.3	_	_	_
HCP_{0}	HCP_{05} фактора B и взаимодействия AB		2.5	2.2	_	_	_
HCP_0	- 5 частных различий	6.2	3.6	3.1	_	_	_

^{*}Навоз – 1-й год последействия.

Содержание общего азота в растениях определяли после мокрого озоления по Кьельдалю, фосфора и калия — по методу Гинзбург, с последующим определением P_2O_5 — колориметрическим методом, K_2O — методом пламенной фотометрии.

Для оценки эффективности использования азота озимой пшеницей был рассчитан азотный индекс — отношение содержания азота в зерне к выносу его урожаем (зерном и соломой) [11].

Влияние изученных систем удобрения на качество зерна озимой пшеницы проводили по следующим показателям: натура, стекловидность, содержание белка, число падения, количество сырой клейковины в муке и ее качество (ИДК) согласно [12]. Оценку хлебопекарных свойств муки из зерна озимой пшеницы проводили по лабораторной выпечке из муки 70%-ного выхода. У формового хлеба определяли объемный выход хлеба, пористость и цвет мякиша. У подового хлеба оценивали высоту и диаметр, а также его расплываемость по соотношению высота/диаметр [13]. Оценка качества зерна по вышеперечисленным показателям выполнена в лаборатории технологии и биохимии зерна ФИЦ "Немчиновка".

Наиболее благоприятные метеорологические условия для озимой пшеницы складывались в 2015-2016 гг. По результатам весеннего обследования опытных делянок степень перезимовки растений составляла 95-98%. В период с мая по июль стояла слабозасушливая погода (ГТК = 0.92), что в сочетании с высоким запасом продуктивной влаги в ранневесенний период способствовало формированию высокой урожайности озимой пшеницы. Вероятность повторяемости таких погодных условий в Нечерноземной зоне составляет 1 раз в 5-10 лет. В осеннее-зимний период 2016/2017 гг. и 2017/2018 гг. из-за слабого промерзания почвы и высокого снежного покрова посевы озимой пшеницы сильно пострадали от выпревания и, как следствие, развития снежной плесени. Количество перезимовавших растений к периоду возобновления весенней вегетации растений составляло 70% в 2017 г. и 65% — в 2018 г. Избыточное количество осадков в июне-июле 2017 г (в 1.6-2.0 раза больше среднемноголетней нормы) привело к значительному переувлажнению почвы. В сочетании с пониженным температурным фоном рост и развитие озимой пшеницы

были ослаблены, фаза полной спелости наступила на месяц позже по сравнению с 2016 г. Сочетание таких неблагоприятных факторов (ГТК = = 2.13) привело к существенному снижению эффективности удобрений. Вероятность повторения таких погодных условий составляет 30%. В 2018 г. накопление эффективного тепла началось в первой декаде мая и шло ускоренными темпами, что позволило сформировать дополнительные продуктивные стебли в ходе весеннего кущения озимой пшеницы. В июне отмечены интенсивные осадки ливневого характера, что при повышенном температурном фоне способствовало формированию умеренной урожайности озимой пшеницы. Метеорологические условия в 2018 г. характеризовались как влажные ($\Gamma TK = 1.35$), их повторяемость составляет 1 раз в 3-4 года.

Результаты учета урожайности подвергали статистической обработке по модели двухфакторного полевого опыта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение различных систем удобрения способствовало достоверному росту урожайности озимой пшеницы во все годы проведения исследования. Известкование ранее слабокислой почвы с р $H_{\rm KCl}$ 5.1 в дозе 1.0 $H_{\rm r}$ способствовало повышению урожайности зерна на 11-15% к неизвесткованному фону.

При этом следует отметить высокую вариабельность урожайности озимой пшеницы, обусловленную погодными условиями. За счет комплекса неблагоприятных факторов в осенне-зимний и весенне-летний период эффективность изученных систем удобрения в 2017 г. была в 2 раза меньше, чем в благоприятном 2016-м г. Из-за плохой перезимовки и изреженности посевов, несмотря на относительно благоприятные метеоусловия в период вегетации в 2018 г., урожайность зерна озимой пшеницы была в 1.6—1.7 раза меньше, чем в 2016 г.

В целом в вариантах с различными системами удобрения коэффициент вариации урожайности составлял 38—44%. При применении навозного компоста в чистом виде вариация урожайности по годам была несколько ниже — 32—39%.

Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что наибольшая урожайность зерна озимой пшеницы получена при органо-минеральной системе (полная доза) в варианте 5 в 2016 г. — 64.6 ц/га на неизвесткованном фоне и 75.6 ц/га при известковании по $1.0\ H_{\Gamma}$. Внесение навоза совместно с NPK в половинной дозе (вариант 4) не имело преимущества в сравнении с минеральной системой удобрения (вариант 3) как при внесении извести,

так и без нее во все годы исследования. Органическая система удобрения уступала другим вариантам опыта, за исключением неблагоприятного 2017 г., когда урожайность зерна озимой пшеницы при применении навозного компоста была сопоставима с минеральной системой удобрения — 23.2—25.3 и 26.7—27.8 ц/га на фоне без CaCO₃ и с известкованием соответственно.

Применение ОМУ, модифицированного биопрепаратом "бисолбифит", в сочетании с ранневесенней подкормкой азотом обеспечило сопоставимую урожайность с традиционной органоминеральной системой удобрения, где внесение навоза в дозе 25 т/га сочеталось с половинной дозой NPK, обеспечивая получение урожайности зерна в среднем за 3 года на уровне 41.3—45.9 ц/га.

В целом можно заключить, что наибольшая урожайность зерна озимой пшеницы была получена при совместном внесении навоза и NPK в полной дозе в варианте 5 во все годы исследования. Средняя прибавка в данном варианте за 3 года составляла 18.8—22.1 ц/га или 72—76% к контролю.

Применение удобрений существенно увеличивало потребление элементов питания для формирования урожая, и, следовательно, хозяйственный вынос NPK (табл. 2). Наибольший вынос питательных веществ отмечен при применении органо-минеральной системы удобрения (полной дозы) -N148.6-159.3P48.2-57.2K120.0-120.6. Рассматриваемая система удобрения наиболее сильно повлияла на повышение выноса азота и калия (на 70-80% и 75-90% к контролю соответственно). На фоне известкования вынос NPK увеличивался на 9–15%. Следует отметить, что минеральная, органо-минеральная системы удобрения и применение ОМУ способствовали значительному выносу калия, который достигал 90.5–120.6 кг/га как на фоне известкования так и без него.

В этих же вариантах отмечен наибольший вынос азота в расчете на 1 т зерна (с учетом побочной продукции — соломы), который составлял 28.6—32.5 кг/т. Вынос фосфора на неизвесткованном фоне менялся незначительно (10.2—11.4 кг/т зерна), а при известковании в удобренных вариантах снижался на 5—14% по сравнению с контролем. Также можно отметить увеличение выноса калия 1 т зерна при органо-минеральной системе удобрения (вариант 5, полная доза), и снижение — в варианте 4 с применением половинных доз навоза и NPK.

В среднем соотношение азота, фосфора и калия (в расчете на 1 т зерна с учетом соломы) в удобренных вариантах составляло: 2.7-2.8:1.0:2.0-2.4 на неизвесткованном фоне и 2.8-3.1:1.0:1.9-2.3 при известковании.

1	. ,,							
р <i>А</i> вание)			Вынос NPK (зерно+солома), кг/га			Вынос NPK на 1 т зерна (с учетом соломы), кг		
Фактор А (известкование)	Фактор B (удобрения)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
\mathcal{A}_1	1. Контроль (без удобрений)	81.9	29.7	63.1	31.3	11.4	24.2	
) ы	2. Навоз 50 т/га	92.4	37.8	77.8	27.6	11.3	23.2	
33	3. N30P30K60 + N50 π/κ	109	40.4	90.5	28.6	10.6	23.7	
Без	4. Навоз 25 т/га + N15P15K30 + N25 п/к	111	40.9	83.8	27.7	10.2	20.9	
Без язвесткования	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	138	49.6	120	30.8	11.1	26.7	
ИЗВ(6. ОМУ ₆ (N30P30K34) + N50 п/к	134	43.7	92.5	32.5	10.6	22.4	
Средни	ие фактора A_1	111	40.4	88.0	29.8	10.9	23.5	
	1. Контроль (без удобрений)	86.8	35.0	68.2	29.8	12.0	23.4	
A_{2}	2. Навоз 50 т/га	109	44.5	93.6	28.2	11.5	24.1	
Известь $1.0~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}~(A_2)$	3. N30P30K60 + N50 π/κ	131	47.0	110	29.9	10.7	24.9	
Изве 1.0 <i>I</i>	4. Habo3 25 τ/га + N15P15K30 + N25 π/κ	128	47.4	89.3	27.6	10.3	19.3	
И по 1	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	159	57.2	121	31.0	11.1	23.5	
П	6. OM \mathbf{y}_6 (N30P30K34) + N50 π/κ	149	48.2	91.7	32.4	10.5	20.0	
Средни	ие фактора A_2	127	46.6	95.5	29.8	11.0	22.5	

Таблица 2. Хозяйственный вынос питательных веществ (кг/га) и 1 т зерна озимой пшеницы (с учетом побочной продукции), кг

По сравнению с региональными данными [14], вынос азота озимой пшеницей сорта Московская 56 близок к нормативному (30 кг/т зерна), а вынос фосфора и калия был меньше на 2 и 3 кг/т соответственно. Значительное снижение выноса K_2O , вероятно, связано с уменьшением доли соломы, в которой к моменту уборки накапливается $\approx 2/3$ калия от общего его содержания в урожае. При внесении изученных в опыте удобрений наблюдали сужение соотношения между зерном и соломой до 1:1.6-1.8, против 1:1.9-2.0 в контроле.

По данным ФИЦ "Немчиновка", вынос элементов питания современными сортами озимой пшеницы в Центральном Нечерноземье составляет: N-25-31, $P_2O_5-10-12$, $K_2O-25-31$ кг/т [15], что во многом подтверждено и нашими исследованиями, проведенными на севере H3.

На известкованном фоне максимальные величины азотного индекса (0.65—0.69) отмечены в удобренных вариантах, за исключением ОМУ (рис. 1). Можно предположить, что при применении удобрений озимой пшеницей лучше используется поглощенный азот за счет большего его накопления в товарной продукции — зерне. В контрольном варианте азотный индекс составлял всего 0.58—0.61.

Для оценки влияния изученных систем удобрения на качество зерна в лаборатории техноло-

гии и биохимии зерна ФИЦ "Немчиновка" были изучены технологические качества зерна и муки, определены ее хлебопекарные свойства в образцах зерна озимой пшеницы, полученной в опыте (табл. 3, 4, приведены усредненные данные за 2 года).

В соответствии с ГОСТ Р 52554-2006, натура зерна, характеризующая его выполненность, в годы исследования была больше ограничительных норм (750 г/л) для пшеницы 1-го класса во всех вариантах опыта и менялась в пределах 774—804 г/л (табл. 3). Натуру можно рассматривать как косвенный показатель выхода муки, поэтому этот показатель широко используют как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Наиболее важным показателем качества зерна является содержание в нем белка. Применение органических, минеральных удобрений, а также их внесение в половинных дозах (варианты 2–4) на известкованном фоне способствовали увеличению содержания белка в зерне озимой пшеницы на 0.7–0.8%. При рН_{КСІ} 5.1–5.2 данный показатель в этих вариантах существенно не изменялся. По-видимому, при известковании усиливалась минерализация органического вещества почвы, что приводило к повышению содержания минерального азота в почве, и в совокупности с внесенными удобрениями положительно сказывалось на накоплении белка в зерне. Зерно с наивысшим со-

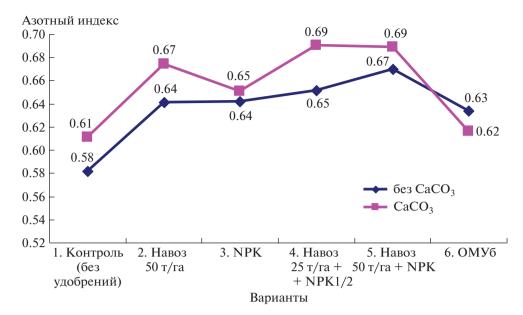


Рис. 1. Влияние систем удобрения и известкования на величину азотного индекса.

держанием белка — 14.1%, характерное для "сильных" сортов пшеницы (2-й класс), получено при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе (вариант 5) на фоне известкования. Внесение органо-минерального удобрения (ОМУ) в сочетании с ранневесенней подкормкой азотом способствовало получению зерна, соответствую-

щему 2-му классу (13.5-13.7% белка в зерне). Во всех остальных вариантах зерно по содержанию белка могло быть отнесено только к 3-му классу.

Стекловидность зерна, которая зависит от состава и прочности связи между белковыми веществами и крахмалом, является важным показателем при отнесении пшеницы к тому или иному

Таблица 3. Влияние систем удобрения и известкования на технологические показатели качества зерна и муки, в среднем за 2016—2017 гг.

			Анали	з зерна		Анали	з муки
Φ актор $A-$ известкование	Фактор B (удобрения)	Натура, г/л	Белок, %	Стекловид- ность, %	Число падения, с	Клейковина сырая из муки, %	ИДК, ед. прибора
(A ₁)	1. Контроль (без удобрений)	804	12.1	26.0	432	22.1	68.5
) ы	2. Навоз 50 т/га	786	12.0	36.0	337	23.8	74.0
3 2HIZ	3. N30P30K60 + N50 π/κ	802	12.4	46.5	431	26.5	75.5
Без	4. Habos 25 τ/га + N15P15K30 + N25 π/κ	794	12.0	35.5	435	24.8	75.5
CTK	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	795	13.5	51.5	389	29.7	79.5
Без известкования	6. $OMY_6 (N30P30K34) + N50 \pi/\kappa$	804	13.6	43.0	417	27.6	83.5
Средн	ие фактора A_1	797	12.6	39.8	407	25.7	76.1
	1. Контроль (без удобрений)	803	12.1	24.5	411	23.1	80.0
, A ₂	2. Навоз 50 т/га	802	12.8	39.0	388	25.4	75.5
CTI Hr (3. N30P30K60 + N50 π/κ	804	12.9	47.5	392	27.3	75.5
Известь 1.0 Нг (.	4. Навоз 25 т/га + N15P15K30 + N25 п/к	804	12.8	44.5	395	25.9	82.0
$ m H3весть$ по $1.0~{ m Hr}({\cal A}_2)$	5. Навоз 50т/га + N30P30K60 + N50 п/к	799	14.1	51.5	401	31.3	89.5
	6. OMY ₆ (N30P30K34) + N50 π/κ	774	13.5	47.0	385	28.8	85.0
Средн	ие фактора A_2	797	13.0	42.3	395	27.0	81.3

АГРОХИМИЯ № 1 2020

Таолиц	элица 4. влияние систем удоорения и известкования на хлеоопекарные своиства муки, в среднем за 2010—2017 11.						-2017 II.			
			Стандартная выпечка							
ие)			формової	Í	подовой					
Фактор А (известкование)	Фактор B (удобрения)	ый 5а, см³	порис-	цвет	балл	аметр	MM	, MM		
Ф2	Φ актор B (удобрения) ϕ тость ϕ мяки ϕ		мякиша, балл		общий балл	высота/диаметр	высота, мм	диаметр, мм		
A_1	1. Контроль (без удобрений)	780	3.8	4.4	3.9	0.63	76	121		
) ві	2. Навоз 50 т/га	760	3.3	4.0	3.6	0.58	68	118		
33	3. N30P30K60 + N50 π/κ	855	4.2	4.3	4.3	0.63	79	127		
Без	4. Habo3 25 τ/га + N15P15K30 + N25 π/κ	855	3.8	4.4	4.3	0.62	78	127		
ЭСТІ	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	870	4.5	4.4	4.2	0.61	82	134		
Без известкования (A_1)	6. $OMY_6 (N30P30K34) + N50 \pi/K$	840	3.7	4.4	4.3	0.63	80	127		
Средн	ие фактора A_1	827	3.9	4.3	4.1	0.61	77	125		
	1. Контроль (без удобрений)	815	3.9	4.2	3.8	0.60	75	126		
A_2	2. Навоз 50 т/га	835	3.5	4.4	3.7	0.61	75	123		
Известь 1.0 <i>H</i> г (А	3. N30P30K60 + N50 π/κ	860	3.9	4.4	3.7	0.60	74	123		
13B6	4. Habo3 25 τ/га + N15P15K30 + N25 π/κ	835	3.7	4.3	3.7	0.61	75	123		
Известь по $1.0\ H_{ m r}({\it A}_2)$	5. Навоз 50 т/га + N30P30K60 + N50 п/к	870	3.7	4.3	4.3	0.62	78	127		
П	6. $OMY_6 (N30P30K34) + N50 \pi/\kappa$	895	3.8	4.3	4.0	0.63	78	125		

852

3.7

4.3

3.8

0.61

76

124

Таблица 4. Влияние систем удобрения и известкования на хлебопекарные свойства муки, в среднем за 2016—2017 гг.

классу качества. Согласно требованиям ГОСТа. зерно со стекловидностью >40% было получено в вариантах с минеральной, органо-минеральной системами удобрения (варианты 4, 5) и при внесении ОМУ на известкованном фоне, что соответствовало "ценной по качеству" пшенице, и это зерно можно отнести к 3-му классу. В вариантах без удобрений, а также при внесении навоза стекловидность зерна на обоих фонах менялась в пределах 26-39%, что соответствовало "слабой" пшенице. Следует отметить, что именно в этих вариантах весеннюю подкормку азотом не проводили. Таким образом, можно заключить, что ранневесенняя подкормка озимой пшеницы азотными удобрениями является неотъемлемым фактором получения высококачественного зерна даже при внесении органических удобрений.

Средние фактора A_2

Число падения характеризует активность амилолитических ферментов. Во всех вариантах опыта оно было >200 с, что говорит о низкой потенциальной способности прорастания зерна на корню. В то же время высокие величины числа падения для муки — 385—432 с указывают на низкую активность амилаз, ферментов, расщепляющих крахмал до мальтозы и декстринов, что может привести к недостаточному накоплению сахаров и слабому подъему теста [16].

Одним из важных показателей оценки качества зерна пшеницы, которое предназначается на хлебопекарные цели, является количество и качество клейковины. Как показали результаты исследования, содержание сырой клейковины в неизвесткованном контроле было <23%, что соответствовало зерну 4-го класса, и из него нельзя выпечь хлеб без добавления "сильных" сортов пшеницы. Применение органических, минеральных удобрений, их совместное внесение в половинных дозах, а также использование ОМУ позволило получить зерно с содержанием клейковины 23.8-27.6%, соответствующее 3-му классу. На неизвесткованном фоне только органо-минеральная система, где органические и минеральные удобрения внесены в полных дозах (вариант 5), способствовала получению зерна 2-го класса с содержанием сырой клейковины 29.7%. При нейтрализации избыточной кислотности заметно возрастало содержание сырой клейковины. При этом во всех вариантах полевого опыта на известкованном фоне получено зерно не ниже 3-го класса, а при применении органо-минеральной системы (вариант 5) и внесении ОМУ по содержанию сырой клейковины (31.3 и 28.8% соответственно) зерно отвечало требованиям 2-го класса качества.



Рис. 2. Влияние систем удобрения и известкования на качество формового и подового хлеба (лабораторная выпечка, $2016 \, \Gamma$).

Качество клейковины, ее упругость определяется в условных единицах прибора ИДК. Хорошей считается клейковина с ИДК 45—75 ед. В наших исследованиях качество клейковины было обратно пропорционально ее количеству (r = -0.76), т.е. внесение удобрений, особенно на известкованном фоне, способствовало формированию более слабой клейковины (ИДК = 75.5—89.5 ед.) ІІ группы качества (3-й класс зерна). Отрицательная взаимосвязь между количеством клейковины и ее качеством была выявлена и в исследованиях [17].

Для оценки свойств муки используют более 30 показателей, однако предсказать, какого качества будет хлеб, весьма сложно. Таким интегрирующим показателем является лабораторная выпечка. Общая хлебопекарная оценка показала, что без добавления улучшителей мука, полученная в различных вариантах полевого опыта, позволяла получить хлеб удовлетворительного и хорошего качества (табл. 4, рис. 2). На неизвесткованном фоне в контрольном варианте и при внесении навоза отмечен наименьший объемный выход хлеба -760-780 см³. Применение минеральных удобрений и их совместное внесение с навозом позволило увеличить его объемный выход в диапазоне от 840 до 855 см³. Минеральная, органо-минеральная системы улобрения (полная доза) и использование ОМУ на фоне применения СаСО3 способствовали наибольшему объемному выходу хлеба -860-895 см³. Следует отметить что пористость хлеба в большинстве вариантов опыта оценивали от сравнительно крупной до мелкой, равномерной, а цвет мякиша в основном был белый с желтоватым оттенком, характерный для сорта озимой пшеницы Московская 56. Оценка подового хлеба во многом была схожа с формовым. Расплываемость хлеба (отношение высоты к основанию) была >0.4, что соответствовало норме для сильной пшеницы. Органо-минеральная система удобрения (полная доза) обеспечивала получение подового хлеба с общей хлебопекарной оценкой 4.2—4.3 балла.

выводы

1. В условиях Северного Нечерноземья снижение кислотности дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почвы с рН_{КСІ} 5.1—5.2 до рН_{КСІ} 5.8—5.9 способствовало повышению урожайности зерна озимой пшеницы на 11—15%. Наибольшая урожайность зерна озимой пшеницы была получена на известкованном фоне при применении органо-минеральных систем удобрения, где среднегодовая продуктивность составляла 32.7—75.6 ц/га, второе место занимала минеральная система (27.8—65.6 ц/га), третье — органическая (26.1—55.5 ц/га).

- 2. Применение удобрений увеличивало вынос NPK в расчете на 1 т зерна (с учетом соломы), который в среднем составлял: N-30, P_2O_5-11 , K_2O-23 кг, при соотношении азота, фосфора и калия 2.7-2.8:1.0:2.0-2.4 на неизвесткованном фоне и 2.8-3.1:1.0:1.9-2.3 при внесении $CaCO_3$.
- 3. Наиболее существенное повышение содержания белка в зерне озимой пшеницы наблюдали на известкованном фоне при применении органических и минеральных удобрений на 0.7-0.8%, а при их совместном внесении в полных дозах на 2.0%, где получено зерно с наивысшим содержанием белка 14.1%, характерное для "сильных" сортов пшеницы (2-й класс).
- 4. Зерно со стекловидностью >40% было получено в вариантах с применением минеральной, органо-минеральной систем удобрения и при внесении ОМУ на известкованном фоне, что соответствовало "ценной по качеству" пшенице. Ранневесенняя азотная подкормка озимой пшеницы позволила повысить качество зерна на один класс, даже при внесении одних органических удобрений.
- 5. При нейтрализации избыточной кислотности возрастало содержание сырой клейковины в зерне. На известкованном фоне при применении органо-минеральной системы удобрения и внесении ОМУ содержание сырой клейковины составило 31.3% и 28.8% соответственно, что соответствовало требованиям, предъявляемым ГОСТом для зерна 2-го класса.
- 6. Внесение удобрений, особенно при известковании, способствовало формированию более слабой клейковины (ИДК = 75.5–89.5 ед.) II группы качества, по сравнению с контролем без внесения CaCO₃.
- 7. Результаты лабораторной выпечки хлеба показали, что органо-минеральная система удобрения (полная доза) и использование ОМУ на фоне известкования способствовали наибольшему объемному выходу формового хлеба — 860— $895~\rm cm^3$ и получению подового хлеба хорошего качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Шафран С.А., Духанина Т.М.* Значение комплексного окультуривания почв в повышении эффективности азотных удобрений под пшеницу // Агрохимия. 2017. № 11. С. 21—30.
- 2. Сандухадзе Б.И., Кузьмич М.А., Мамедов Р.З., Кузьмич Л.С., Кочетыгов Г.В., Кондратьева О.П., Щербакова З.Н. Технологические и хлебопекарные показатели качества зерна и муки сортов озимой мягкой пшеницы Московского НИИСХ "Немчиновка" // Мат-лы научн.-практ. конф. с международ. участием "Современная аграрная наука как фактор повышения эффективности сельскохозяйственного произ-

- водства региона" / Под редакцией Мазурова В.Н. Калуга: Калужский НИИСХ, 2018. С. 145—150.
- 3. Ваулина Г.И. Эффективность минеральных удобрений и других средств химизации при возделывании разных сортов зерновых культур на дерновоподзолистой тяжелосуглинистой почве в условиях Центрального района Нечерноземной зоны: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2007. 51 с.
- 4. Литвинский В.А., Муравин Э.А., Черников В.А., Грицкевич Ю.Г., Игнатов В.Г., Хлыстовский А.Д. Продуктивность севооборота с клеверным паром и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы в длительном опыте Д.Н. Прянишникова № 2 на Долгопрудной агрохимической опытной станции // Агрохимия. 2010. № 9. С. 19—30.
- Веденеева Н.В., Рогов В.А., Наклейщикова Л.В., Налиухин А.Н. Почвенный покров и агрохимическая характеристика пахотных почв Вологодской области. Динамика почвенного плодородия по циклам обследования // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. Т. 30. № 8. С. 22–27.
- Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и его резервы // Агрохимия. 2016. № 8. С. 3–11.
- 7. *Сычев В.Г., Милащенко Н.З., Шафран С.А.* Агрохимические аспекты получения высококачественного зерна в России // Плодородие. 2018. № 6. С. 18—19.
- 8. *Чухина О.В., Жуков Ю.П.* Плодородие дерновоподзолистой почвы и продуктивность культур в севообороте при применении различных доз удобрений // Агрохимия. 2013. № 11. С. 10—18.
- 9. 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 легкосуглинистой почвы // Плодородие. 2018. № 2. С. 42—45.

- Naliukhin A.N., Zavalin A.A., Siluyanova O.V., Belozerov D.A. Influence of biofertilizers and liming on vetchoat mixture productivity and change in sodpodzolic soil microbocenosis // Rus. Agricult. Sci. 2018. V. 44. Iss. 1. P. 58–63.
- 11. *Климашевский Э.Л.* Генетический аспект минерального питания растений. М.: Агропромиздат, 1991. 416 с.
- 12. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур / Под ред. Федина М.А. М.: Колос, 1988. 121 с.
- 13. Оценка качества зерна: Справочник / Сост. Василенко И.И., Комаров В.И. М.: Агропромиздат, 1987. 208 с.
- 14. Суков А.А., Чухина О.В., Токарева Н.В., Налиухин А.Н. Особенности системы удобрения сельскохозяйственных культур на Европейском Севере России: уч. пособ. Вологда—Молочное: Вологодская ГМХА, 2018. 207 с.
- 15. Останина А.В., Сандухадзе Б.И., Политыко П.М., Штырхунов В.Д., Новиков Ю.И., Егоров В.Г., Шептухов В.Н., Гафуров Р.М., Киселев Е.Ф., Хачидзе А.С. Технология возделывания озимой пшеницы в Центре Нечерноземной зоны РФ. М.: РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева, 2009. 149 с.
- 16. *Кузьмич М.А., Кузьмич Л.С., Купреев Е.М.* Влияние уровней азотного питания и реакции почвенной среды на продуктивность и качество зерна яровой и озимой пшеницы // Агрохим. вестн. 2007. № 3. С. 22—24.
- 17. Сандухадзе Б.И., Рыбакова М.И., Осипова А.В. Качество зерна сортов озимой пшеницы, возделываемых в условиях Центрального Нечерноземья // Хлебопродукты. 2013. № 3. С. 62—64.

Influence of Different Fertilization Systems and Lime on Yield, Technological and Baking Qualities of Winter Wheat Grain in a Northern Part of Non-Chernozem Zone

A. N. Naliukhin^{a,#} and D. A. Belozerov^a

^a Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy ul. Shmidta 2, Molochnoe–Vologda 160555, Russia *E-mail: naliuhin@vandex.ru

An increase in the yield of winter wheat should be accompanied by an improvement in the quality of the grain produced in the country. The paper presents the comparative efficiency of organic, mineral, organo-mineral systems of fertilization and liming in the cultivation of winter wheat varieties Moskovskaya 56. It was shown that on the soddy-medium-podzolic light loamy soil in the conditions of the North of the Non-chernozem zone of Russia it is possible to obtain a yield of winter wheat of 3.56–4.28 t/ha, and in favorable years – 7.56 t/ha. This level of winter wheat yield is achieved with an organo-mineral fertilizer system based on applying 50 t/ha of manure in sown fallow, mineral fertilizers in a dose of N30P30K60 before sowing and N50 in top dressing against the background of liming. This produces a grain with a protein content of 14.1%, raw gluten – 31.3% of the 2nd quality group, with a volume output of bread – 870 cm³, with a total baking rating of 4.3 points. The use of organic fertilizers only does not allow obtaining grain above grade 4.

Key words: winter wheat, fertilizers systems, yield, grain quality, baking assessment, northern part of Non-chernozem zone.

УДК 631.559:631.582:631.81

ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗВЕНА ЗЕРНОСВЕКЛОВИЧНОГО СЕВООБОРОТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ (1936—2017 гг.)

© 2020 г. О. А. Минакова^{1,*}, Л. В. Александрова¹, Т. Н. Подвигина¹, В. М. Вилков¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. В.Л. Мазлумова 396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86, Россия

*E-mail: olalmin2@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.03.2019 г. После доработки 15.04.2019 г. Принята к публикации 10.10.2019 г.

В 9-польном зерносвекловичном севообороте с 2-мя полями сахарной свеклы, размещенной после предшественников черного пара и клевера, наибольшая продуктивность 1 га севооборотной площади в 9-й ротации отмечена для звена с паром -3.67-5.37 т з.е./га (в клеверном звене -3.48-4.83 т з.е/га). С течением времени продуктивность 1 га пашни в паровом звене увеличивалась, клеверного — снижалась, также наблюдали уменьшение эффективности применения удобрений в клеверном звене (увеличение урожайности корнеплодов относительно контроля в 4-й ротации составило 28.1-46.3, в 9-й-19.0-38.8%), оставаясь практически неизменной в паровом звене (1-я ротация -28.8-44.7, 9-я-28.8-46.3%).

Ключевые слова: севооборот, черный пар, клевер, сахарная свекла, энергетическая эффективность, окупаемость, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188120010081

ВВЕДЕНИЕ

Питание сахарной свеклы обеспечивает внесение достаточного количества удобрений. Прямое действие применения удобрений на сахарной свекле в различных почвенно-климатических зонах РФ выражается в повышении урожайности корнеплодов на 21.9—60.4%, что подтверждено многочисленными исследованиями [1—4].

Одним из основных путей повышения продуктивности агроценозов является рациональное применение органических и минеральных удобрений [5]. В связи с ростом урожайности всех культур севооборота как при прямом действии, так и последействии удобрений с течением времени его продуктивность увеличивается [6—8], минеральная и органо-минеральная система способствует его повышению в 2 раза, органическая — в 1.7 раза [9].

В длинноротационном севообороте с 2-мя полями сахарной свеклы для этой культуры можно использовать разные предшественники и предпредшественники. Традиционным предшественником в ЦЧР является озимая пшеница, т.к. она рано освобождает поля, а ее предшественником может быть черный пар, одно- и многолетние травы, кукуруза на зеленый корм и другие рано убираемые культуры. В настоящее время при широком распространении короткоротационных севооборотов хозяйству необходимо выбрать последовательность культур в севообороте с сахарной свеклой для получения наибольшего количества продукции с меньшими затратами.

Мнения ученых об эффективности разных предпредшественников разделяются. Ряд исследователей указывает на большую продуктивность клеверного звена [10, 11], ряд — парового [12, 13]. Также открытым остается вопрос об эффективности различных доз удобрений и их соотношений в разных звеньях севооборота [14, 15].

Таким образом, цель работы — изучение влияния длительного применения удобрений на урожайность сахарной свеклы в различных звеньях зерносвекловичного севооборота, а также его продуктивность с 1-й по 9-ю ротации в условиях лесостепи ЦЧР с целью рекомендации наиболее продуктивного чередования культур в длинно- и короткоротационных севооборотах лесостепи ЦЧР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 1936—2017 гг. в стационарном опыте с внесением удобрений Всероссийского научно-исследовательского инсти-

Таблица 1. Урожайность сахарной свеклы в звене с черным паром (1936—2017 гг.)

Ротации									
1-a	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я	9-я	
			Без	удобре	ний			_	
23.9	30.6	32.6	26.1	26.5	26.8	23.5	29.5	26.3	
	N45P45K45 + навоз 25 т/га								
26.0	33.2	38.6	32.2	34.7	32.6	27.8	35.5	37.9	
		N90	P90K9	0 + на	воз 25	т/га			
26.6	33.3	40.4	34.5	35.4	34.5	27.8	36.7	37.0	
		N135I	P135K1	135 + E	авоз 2	25 т/га			
26.8	34.1	41.5	35.9	37.9	35.4	31.2	41.3	40.3	
N45P45K45 + навоз 50 т/га									
24.9	36.9	39.2	33.6	35.7	36.3	28.2	36.6	39.4	
HCP_{05}	= 3.52	т/га, S ,	c = 2.96	5%.					

тута сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова (ВНИИСС) (Рамонский р-н, Воронежская обл.). Стационарный опыт был заложен в 1936 г. и представляет собой 9-польный зерносвекловичный севооборот со следующим чередованием культур по полям: черный пар — озимая пшеница — сахарная свекла — ячмень — однолетние травы — озимая пшеница — сахарная свекла — однолетние травы — овес.

Климат района исследований умеренно-континентальный с неустойчивым увлажнением. Почва стационарного опыта — чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый.

В качестве минеральных удобрений использовали $A\Phi K$ (16:16:16), которую вносили под сахарную свеклу перед основной обработкой почвы. Полуперепревший навоз крупного рогатого скота (коровий), с содержанием 72.5% сухого вещества, 0.48% N, 0.23% P_2O_5 , 0.63% K_2O , полученный способом плотного хранения в течение 4 мес., вносили один раз за ротацию севооборота в черный пар.

Схема опыта состояла из 5-ти вариантов с различными дозами внесения минеральных удобрений и навоза: 1 — контроль без внесения удобрений, 2 — N45P45K45 + навоз 25 т/га, 3 — N90P90K90 + навоз 25 т/га, 4 — N135P135K135 + навоз 25 т/га, 5 — N45P45K45 + навоз 50 т/га. Посевная площадь делянки $162 \,\mathrm{m}^2$, учетная — $10.8 \,\mathrm{m}^2$.

Возделывали районированные сорта и гибриды сельскохозяйственных культур: сахарная свекла и горох — селекции ВНИИСС им. А.Л. Мазлумова. В 9-й ротации возделывали сорт сахарной свеклы Рамонская 117, гибриды РМС-60, РМС-73, РМС-120, озимую пшеницу сортов Губернатор Дона, Скипетр, ячмень сорта Тюрингия, овес

сортов Лев, Золотой дождь, горох сортов АМЗК-99, Топаз, РИФ-12, клевер сорта Трубетчинский местный. Однолетние травы — горохоовсяная смесь.

Повторность опыта трехкратная. Размещение вариантов систематическое. Определение урожайности сахарной свеклы производили методом пробных площадок, энергетическую эффективность — по методике ВАСХНИЛ, продуктивность 1 га пашни — расчетным методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетними исследованиями в условиях стационарного опыта ВНИИСС им. А.Л. Мазлумова установлено, что уровень урожайности корнеплодов сахарной свеклы в опыте составил в 1-й ротации 23.9-26.8 (табл. 1), во 2-й - 30.6-36.9, в 3-й - 32.6-41.5, в 4-й - 26.1-35.9, в 5-й - 26.5-37.9, в 6-й -26.8-36.3, в 7-й -23.5-31.2, в 8-й -29.5-41.3, в 9-й -26.3-40.3 т/га. С увеличением длительности применения удобрений отмечали повышение урожайности корнеплодов сахарной свеклы относительно неудобренного варианта, в 1-й ротации оно составило 4.18-12.1, во 2-й -8.50-20.6, в 3-й -18.4-27.3, в 4-й -23.4-37.5, в 5-й -30.9-43.0, в 6-й -21.6-35.4, в 7-й -18.3-32.8, в 8-й - 20.3-40.0%, в 9-й - 40.7-53.2%. Это свидетельствовало о том, что в первые 3 ротации (27 лет) прибавки урожайности были невысокими, в дальнейшем этот показатель в удобренных вариантах вышел на определенный уровень (27.8-37.9 т/га), в 8-9-й ротациях он был еще больше (35.5-41.3 т/га), возможно, вследствие потепления, наблюдаемого в последние 2 десятилетия.

Изменения урожайности корнеплодов и возделывания новых высокопродуктивных гибридов культуры сахарной свеклы (разница между максимальной и минимальной) в звене с черным паром в неудобренном варианте составили 11.1—38.7%, при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га — 6.92—48.5, N90P90K90 + навоз 25 т/га — 4.51—51.9, N135P135K135 + навоз 25 т/га — 16.4—54.8, N45P45K45 + навоз 50 т/га — 13.2—58.7%. Разница от средней урожайности в контроле составила 13.9—19.4%, в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га — 14.1—21.7, N90P90K90 + навоз 25 т/га — 18.8—21.8, N135P135K135 + навоз 25 т/га — 15.3—25.5 и N45P45K45 + навоз 50 т/га — 14.3—27.8 соответственно.

С 1-й по 5-ю ротацию наиболее высокие прибавки урожайности были получены в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га, с 6-й по 9-ю ротацию — в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, что свидетельствовало о том, что

не только высокие дозы минеральных удобрений способствовали повышению урожайности, но и внесение дозы навоза 50 т/га обеспечивало дополнительное поступление элементов питания, улучшение почвенных условий и, следовательно, создавало благоприятные условия для создания высоких урожаев. Наиболее высокий уровень урожайности 40.3—41.5 т/га корнеплодов был получен в 3-й, 8-й и 9-й ротациях при внесении N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Средняя урожайность корнеплодов в звене с паром за 9 ротаций в неудобренном варианте составила 27.3 т/га, в вариантах с удобрениями — 33.2-36.0 т/га. Увеличение урожайности относительно контроля составило в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га — 21.6, N90P90K90 + + навоз 25 т/га — 24.5, N135P135K135 + навоз 25 т/га — 31.9, N45P45K45 + навоз 25 т/га — 26.3%.

Урожайность корнеплодов в звене с клевером в 4-й ротации изменялась от 25.0 до 29.9 т/га (табл. 2), в 5-й — 27.8—35.7, в 6-й — 30.8—39.3, в 7-й — 28.5—35.6, в 8-й — 25.1—36.8, в 9-й — 38.4—39.8 т/га. Увеличение урожайности корнеплодов сахарной свеклы относительно контроля в звене с клевером в 4-й ротации составило 15.2—19.6, в 5-й — 6.47—28.4, в 6-й — 16.9—27.6, в 7-й — 18.2—24.9, в 8-й — 18.2—46.6, в 9-й — 15.8—40.1%.

В варианте без удобрений в клеверном звене средняя урожайность корнеплодов сахарной свеклы составила 27.6, при внесении N45P45K45 + + навоз 25 т/га - 33.7, N90P90K90 + навоз 25 т/га - 33.9, N135P135K135 + навоз 25 т/га - 36.1, N45P45K45 + навоз 50 т/га - 32.5 т/га, прибавка составила 22.1, 22.8, 30.8, 17.7% от контроля соответственно. Максимальная эффективность удобрения с 4-й по 9-ю ротации была отмечена при внесении N135P135K135 + навоз 25 т/га, в 4-й, 6-й и 8-й ротациях - также и в варианте N90P90K90 + + навоз 25 т/га.

Изменения урожайности корнеплодов сахарной свеклы (разница между максимальной и минимальной) в звене с клевером в неудобренном варианте составили 11.2—23.2, N45P45K45 + навоз 25 т/га — 16.3—25.0, N90Р90К90 + навоз 25 т/га — 16.5-30.7, N135P135K135 + навоз 25 т/га - 19.9-34.0, N45P45K45 + Habo3 50 $\tau/ra - 15.6-26.8\%$, различия от среднего в контроле в вариантах составили 9.42-11.6, 6.82-14.5, 12.7-14.1, 10.2-17.7 и 8.31-12.0% соответственно. С увеличением дозы удобрения возрастали как разница между максимальной и минимальной урожайностью, так и различия от среднего, что свидетельствовало о большей зависимости урожайности удобренных вариантов от погодных условий, но эти показатели в звене с клевером были значительно меньше,

Таблица 2. Урожайность сахарной свеклы в звене с клевером (1955—2017 гг.)

Ротации									
4-я	5-я	6-я	7-я 8-я		9-я				
		Без удо	брений						
25.0	27.8	30.8	28.5	25.1	28.4				
	N45	P45K45 +	навоз 25	т/га	!				
28.8	33.5	36.0	33.7	34.9	35.2				
	N90	P90K90 +	навоз 25	т/га					
29.9	29.6	38.7	34.1	36.6	34.5				
	N135I	P135K135	+ навоз 2	.5 т/га					
29.7	35.7	39.3	35.6	36.8	39.8				
N45P45K45 + навоз 50 т/га									
29.8	33.0	36.4	28.7	34.5	32.9				

 $HCP_{05} = 2.57 \text{ T/}\Gamma a$, $S_x = 2.38\%$.

чем в звене с паром, т.е. урожайность сахарной свеклы в клеверном звене была более стабильной.

Средняя урожайность корнеплодов сахарной свеклы в обеих звеньях севооборота была сопоставима (27.3—36.0 т/га в паровом звене и 27.6—36.1 т/га в клеверном), кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га в звене с клевером, где было выращено в среднем на 2.0 т/га меньше. Но к 9-й ротации в паровом звене в удобренных вариантах было выращено на 7.25—19.7% корнеплодов больше, чем в клеверном, кроме варианта N135P135K135 + навоз 25 т/га, где разница в урожайности не была статистически значимой (40.3 и 39.8 т/га).

Коэффициент энергетической эффективности (**КЭЭ**) применения удобрений под сахарную свеклу в 1-й ротации был невысоким — 0.58—0.71 (табл. 3) в связи с небольшими прибавками урожайности корнеплодов. Его величина свидетельствовала об отсутствии эффекта получения дополнительной энергии в урожае по отношению к затраченной энергии. Разница в КЭЭ в вариантах в 1-й ротации составила 1.22—2.29 раза, в 9-й ротации — 1.49—1.87, в чистой прибавке энергии — 0.34—11.1 ГДж и 2.5—7.0 ГДж соответственно, что свидетельствовало о том, что со временем удобрения обеспечивали высокие прибавки вне зависимости от энергозатрат.

В 1-й ротации КЭЭ в паровом звене при повышении доз удобрений снижался на 0.13—0.40, в 9-й — 0.74—1.08. Оптимальными дозами в обеих ротациях были варианты N45P45K45 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, т.к. обеспечивали наименьшие энергозатраты, а прибавки урожайности были значительными. От 1-й к 9-й ротации увеличение КЭЭ составило 2.14—3.90 раза, более

Таблица 3. Энергетическая эффективность применения удобрений под сахарную свеклу в звене с черным паром

1-я ро	тация	9-я ротация							
чистая прибавка энергии, ГДж	коэффициент энергетической эффективности	чистая прибавка энергии, ГДж	коэффициент энергетической эффективности						
N45P45K45 + навоз 25 т/га									
-3.49	0.58	9.2	2.26						
	N90P90K90 +	навоз 25 т/га	•						
-10.8	0.37	2.2	1.18						
	N135P135K135	+ навоз 25 т/га	•						
-14.2	0.31	3.7	1.21						
	N45P45K45 + навоз 50 т/га								
-3.06	0.71	6.7	1.52						

Таблица 4. Энергетическая эффективность применения удобрений под сахарную свеклу в звене с клевером

4-я ро	тация	9-я ротация								
чистая прибавка коэффициент энергии, ГДж зэфективности		чистая прибавка энергии, ГДж	коэффициент энергетической эффективности							
	N45P45K45 + навоз 25 т/га									
-0.67	0.92	6.9	1.87							
	N90P90K90 +	навоз 25 т/га	•							
-4.65	0.70	-0.2	0.98							
	N135P135K135	+ навоз 25 т/га	•							
-11.1	0.46	11.5	1.30							
	N45P45K45 + навоз 50 т/га									
-0.85	0.92	-0.43	0.95							

всего в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га. Энергия, накопленная в чистой прибавке урожайности от 1-й к 9-й ротации увеличивалась на 4.58-15.4 ГДж, более всего в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га.

Коэффициент энергетической эффективности применения удобрений под сахарную свеклу в звене с клевером в 4-й ротации был невысоким — 0.46—0.92 (табл. 4), в связи с небольшими прибавками урожайности корнеплодов, его величина свидетельствовала об отсутствии эффекта получения дополнительной энергии в урожае по отношению к затраченной энергии.

Разница в КЭЭ в вариантах в 4-й ротации составила 1.31-2.00 раза, в 9-й ротации — 1.44-1.97 раза, в чистой прибавке энергии — 0.18-11.8 ГДж и 0.13-11.9 ГДж соответственно, что свидетельствовало о том, что со временем дозы N45P45K45 + + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га обеспечивали прибавки как чистой энергии, так и КЭЭ, а дозы N90P90K90 + навоз 25 т/га и

N45P45K45 + навоз 50 т/га не полностью компенсировали энергозатраты.

В 4-й ротации КЭЭ применения удобрений в звене с клевером при повышении доз снижался на 0.22-0.46, в 9-й — на 0.47-0.92, оптимальными дозами в 4-й ротации были N45P45K45 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, в 9-й ротации — N45P45K45 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + + навоз 25 т/га, т.к. они обеспечили наименьшие энергозатраты, а прибавки урожайности были значительны. От 4-й к 9-й ротации увеличение КЭЭ составило 1.03-2.80 раза, более всего при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. Энергия, накопленная в чистой прибавке урожая от 4-й к 9-й ротации увеличивалась на 0.42-22.6 ГДж, более всего в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 25 т/га.

Окупаемость удобрений в звене с черным паром в 1-й ротации составила 3.43-9.52 кг/га (табл. 5), в $9-\ddot{u}-29.4-56.4$ кг/кг, увеличение доз удобрений снижало этот показатель на 23.5-64.0 и 15.9-

47.8% соответственно. Окупаемость удобрений в звене с черным паром от 1-й к 9-й ротации увеличивалась в 4.31-13.8 раза, более всего в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га, менее всего — в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га.

Окупаемость удобрений в звене с клевером в 4-й ротации составила 10.4—25.3, в 9-й ротации — 30.0-45.3 кг/кг. Увеличение окупаемости 1 кг удобрений от 4-й к 9-й ротации составило 17.9% при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га, 24.5% в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, 143% – в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га, в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га снизилось на 6.25%. В 4-й ротации разница в окупаемости в вариантах удобрения составила 26.5-208%, наиболее эффективными были дозы N45P45K45 + навоз 50 т/га и N45P45K45 + навоз 25 т/га, в 9-й ротации -55.8-123%, максимальной она быладля тех же доз, что и в 4-й ротации, т.е. эффективность разных доз удобрений в 9-й ротации была близкой.

Окупаемость удобрений в 9-й ротации в звене с паром была более высокой (на 4.63—42.3%, более всего разница была отмечена в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га, менее всего — в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га), чем в звене с клевером вследствие более высоких прибавок урожайности, но низких в ранних ротациях. При этом при расчете данного показателя в паровом звене учитывали и элементы питания, поступающие на 2-й год с навозом.

Сопоставление чистой прибавки энергии выявило, что в звене с паром она была на 2.3-7.8 ГДж больше, чем в звене с клевером, наибольшая разница была в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. КЭЭ в звене с паром также был больше на 0.20-0.57, кроме варианта N135P135K135 + навоз 25 т/га, где он в обоих звеньях был сопоставимым. В процентах разница составила 20.5-60.0%, более всего в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га.

В паровом звене в 4-й ротации продуктивность 1 га пашни составила 3.58-5.18 т з.е., в звене с клевером -3.92-5.08 з.е., что практически было одинаковым, увеличение продуктивности на 1.97-4.40% в звене с паром относительно клеверзвена было отмечено в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га навоза и N45P45K45 + навоз 50 т/га, а в контроле и в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га оно было меньше на 8.67 и 1.28% соответственно. Удобрения повышали продуктивность парового звена в 4-й ротации на 28.8–44.7%, в 9-й — на 28.8—46.3%, лучшей дозой в обе ротации было N135P135K135 + навоз 25 т/га, т.е. с течением времени удобрения способствовали повышению продуктивности (табл. 6).

Таблица 5. Окупаемость 1 кг NPK прибавкой урожай сахарной свеклы (звено с паром), кг/кг

Звено с чер	ным паром	Звено с клевером							
1-я ротация	9-я ротация	4-я ротация	9-я ротация						
	N45P45K45 + навоз 25 т/га								
9.52	56.4	25.3	50.4						
	N90P90K90 +	навоз 25 т/га	•						
7.28	31.4	16.3	22.6						
N	N135P135K135	+ навоз 25 т/г	ra						
5.57	29.4	10.4	28.1						
N45P45K45 + навоз 50 т/га									
3.43	47.4	32.0	33.3						

Таблица 6. Продуктивность звена севооборота в 1-й (4-й) и 9-й ротациях, т з.е./га

Парово	е звено	Клеверное звено					
1-я ротация	1-я ротация 9-я ротация		9-я ротация				
	Без удо	брений					
3.58	3.67	3.92	3.48				
	N45P45K45 +	навоз 25 т/га	!				
4.61	4.86	4.67	4.29				
	N90P90K90 +	навоз 25 т/га	•				
4.98	4.73	4.77	4.27				
N	N135P135K135	+ навоз 25 т/г	ra				
5.18	5.37	5.08	4.83				
N45P45K45 + навоз 50 т/га							
4.93	4.70	4.79	4.14				

В 9-й ротации в звене с паром продуктивность была равна 3.67—5.37 т з.е./га, в звене с клевером — 3.48—4.83, что было меньше на 5.18—11.9%. Удобрения повышали продуктивность звена с клевером в 4-й ротации на 28.1—46.3, в 9-й — на 19.0—38.8%, что свидетельствовало о снижении влияния удобрений на продуктивность 1 га пашни со временем. Максимальную продуктивность обеспечивало применение N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Продуктивность 1 га севооборотной площади в 1-й ротации составила 3.68-3.82 т з.е./га (табл. 7), в 4-й — 3.77-5.12, в 9-й — 3.57-5.07 т з.е./га. Продуктивность севооборота достаточно сильно увеличивалась от 1-й к 4-й ротации (на 27.2-34.0%), кроме контроля, где показатель остался на уровне 1-й ротации. От 4-й к 9-й ротации в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га изменения продуктивности были недостоверными, показатель остался примерно на уровне 4-й ротации, в контроле и при примене-

Таблица 7. Продуктивность севооборота (1-я, 4-я и 9-я ротации), т з.е./га

Ротации								
1-я	4-я	9-я						
Ko	нтроль без удобрен	ний						
3.68	3.77	3.57						
N45	Р45К45 + навоз 25	т/га						
3.64	4.63	4.53						
N90	Р90К90 + навоз 25	т/га						
3.75	4.86	4.82						
N1351	Р135К135 + навоз 2	25 т/га						
3.82	5.12	5.07						
N45P45K45 + навоз 50 т/га								
3.75	4.84	3.95						

нии N45P45K45 + навоз 50 т/га отмечено его снижение на 5.30 и 18.4% соответственно. Очевидно, питательные вещества, поступавшие с навозом, не поглощались культурами, а закреплялись в почве. В 1-й ротации применение удобрений вызвало тенденцию к увеличению продуктивности на 1.90—3.80% относительно контроля, в 4-й ротации она достоверно повысилась на 22.8—35.8%, в 9-й — на 10.6—42.0%. Этому более всего способствовало применение N135P135K135 + навоз 25 т/га, менее всего — N45P45K45 + навоз 50 т/га (в 9-й ротации) и N45P45K45 + навоз 25 т/га (в 4-й ротации).

выводы

- 1. Влияние удобрений повышало урожайность корнеплодов сахарной свеклы в среднем за 9 ротаций в звене с паром на 21.6—31.9% относительно контроля. Прибавки урожая сахарной свеклы увеличивались с течением времени, наибольшие были получены через 45 лет от начала опыта; более всего влияло применение N135P135K135 + навоз 25 т/га, во 2-й и 6-й ротациях N45P45K45 + + навоз 50 т/га.
- 2. В звене с клевером применение удобрений увеличивало среднюю урожайность корнеплодов сахарной свеклы несколько меньше, чем в звене с паром (на 17.7—30.8%). Максимальная урожайность отмечена к 6-й ротации (примерно через 54 года от начала применения удобрений), более всего влияло применение N135P135K135 + навоз 25 т/га навоза, в 4—5-й ротациях N45P45K45 + навоз 25—50 т/га.
- 3. В 9-й ротации в звене с черным паром дозы N90P90K90 под сахарную свеклу на фоне навоза

- 25 т/га в пару и N45P45K45 + навоз 25-50 т/га способствовали получению большей урожайности корнеплодов, чем в звене с клевером (на 7.25-19.7%).
- 4. С увеличением дозы удобрения возрастали как разница между максимальной и минимальной урожайностью корнеплодов сахарной свеклы, так и различия от среднего в обоих звеньях севооборота, но в звене с клевером эти показатели были значительно меньше, чем в звене с паром, т.е. урожайность сахарной свеклы в клеверном звене была более стабильной.
- 5. В звене с паром от 1-й к 9-й ротации коэффициент энергетической эффективности (КЭЭ) возрастал в 2.14-3.90 раза, в звене с клевером в 1.03-2.80 раза.
- 6. Коэффициент энергетической эффективности и чистая прибавка энергии в 9-й ротации в паровом звене севооборота были соответственно на 20.9—60.0% и на 2.3—7.8 ГДж больше, чем в клеверном.
- 7. В паровом звене отмечено повышение энергетической эффективности использования удобрений с течением времени: коэффициент энергетической эффективности увеличивался в 2.14—3.90 раза, чистая прибавка энергии на 9.8—17.9 ГДж, в звене с клевером в 1.03—2.83 и на 0.42—22.6 ГДж соответственно.
- 8. Окупаемость 1 кг удобрений в первых ротациях в звене с клевером была больше, в 9-й ротации меньше, чем в звене с паром, увеличение доз удобрений снижало показатель в большей степени в клеверном звене в 4-й ротации, с течением времени различия в обоих звеньях сокращались.
- 9. В звене с клевером продуктивность 1 га пашни с течением времени снижалась, с паром повышалась, отмечено снижение влияния удобрений в клеверном звене, в паровом оставалось примерно на том же уровне. В 9-й ротации более высокий уровень продуктивности севооборота отмечен в звене с паром.
- 10. Наибольшее увеличение продуктивности севооборота происходило после 30—35 лет применения удобрений, в дальнейшем она оставалась стабильной (кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га, где отмечено ее снижение).
- 11. В короткоротационных севооборотах с 4-мя (5-ю) полями для получения максимальной продуктивности севооборота, в том числе и урожайности сахарной свеклы, рекомендуется следующее чередование культур: черный пар—озимая пшеница—сахарная свекла—ячмень или другие яровые зерновые (или кукуруза на силос).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жеряков Е.В. Отзывчивость сорта и гибридов сахарной свеклы на минеральные удобрения // Вестн. АлтайГАУ. 2012. № 11(97). С. 7–12.
- Мамсиров Н.И. Роль минеральных удобрений в повышении продуктивности сахарной свеклы в Адытее // Новые технологии. 2016. № 3. С. 125—132.
- 3. Нещадим Н.Н., Бершатская С.И., Гаркуша С.В., Квашин А.А., Дерека Ф.И. Влияние длительного 32-летнего применения удобрений на плодородие чернозема обыкновенного и продуктивность сахарной свеклы // Политемат. сетевой электр. научн. журн. КубанГАУ. 2016. № 117. С. 1338—1353.
- Столповский Ю.И., Ходунова Т.В. Изменение физико-химических показателей чернозема выщелоченного и урожайности сахарной свеклы при многолетнем применении удобрений и мелиорантов // Современные проблемы сохранения плодородия черноземов. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 170-летию В.В. Докучаева. Воронеж: ВГАУ, 2016. С. 149—158.
- 5. Храмцов И.Ф. Приемы рационального применения минеральных и органических удобрений на черноземных почвах Западной Сибири // Совершенствование организации и методологии агрохимических исследований в Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. научн.-метод. конф. Географической сети опытов с удобрениями. М.: ВНИИА, 2006. С. 88–91.
- 6. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Последействие удобрений в севообороте // Совершенствование адаптивно-ландшафтных систем земледелия на южном Урале. Мат-лы координац. совета по разработке и внедрению адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Куртамыш, 2013. С. 120—129.
- Лапа В.В. Плодородие почв и использование в республике Беларусь // Плодородие. 2014. № 6. С. 19—20.

- 8. Мязин Н.Г., Кошелев Ю.А. Влияние комплексного агрохимического окультуривания на изменение агрохимических показателей чернозема выщелоченного и продуктивность севооборота // Инновационные технологии и технические средства для АПК. Мат-лы межрегион. научн.-производ. конф. молод. ученых. Воронеж, 2009. С. 150—157.
- 9. *Мерзлая Г.Е., Еськов А.И., Тарасов С.И.* Действие и последействие систем удобрения с использованием навоза // Плодородие. 2011. № 3 (60). С. 16—19.
- Жеряков Е.В. Влияние предшествующей культуры и звена севооборота на засоренность посевов и показатели продуктивности сахарной свеклы // Пробл. совр. науки и образования. 2014. № 8 (26). С. 38–41.
- 11. *Орлов А.Н., Ткачук О.А., Павликова Е.В.* Эффективность звеньев полевого севооборота с чистыми и занятыми парами в лесостепи Среднего Поволжья // Плодородие. 2010. № 2. С. 44–45.
- 12. Дорожко Г.Р., Тивиков А.И. Продуктивность звеньев зернопропашного севооборота на выщелоченном черноземе в зависимости от способов основной обработки почвы // Совр. пробл. науки и образования. 2013. № 1. С. 426.
- 13. Полевщиков С.И. Экономическая эффективность возделывания сахарной свеклы в различных звеньях севооборота // Вестн. Тамбов. гос. техн. унта. 2005. Т. 11. № 3. С. 757—761.
- 14. *Макух Я.П., Зацерковная Н.С.* Влияние фонов минерального питания на продуктивность свекловичных посевов в условиях лесостепи Украины // Сахарная свекла. 2015. № 2. С. 34—38.
- 15. *Рыбалкин Б.А.* Эффективность обработки почвы и удобрений в севообороте на черноземе обыкновенном слабосмытом юго-востока ЦЧЗ: Автореф. ... канд. с.-х. наук. Каменная Степь, 2001. 23 с.

Productivity of Different Grain-Beet Crop Rotation Types when Applying Fertilizers for a Long Time (1936–2017)

O. A. Minakova^{a,#}, L. V. Alexandrova^a, T. N. Podvigina^a, and V. M. Vilkov^a

^aA.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar pos. VNIISS 86, Voronezh region, Ramonsky district 396030, Russia

#E-mail: olalmin2@rambler.ru

The best productivity per 1 ha in the 9th rotation was noted for the grain-beet crop rotation with fallow (3.67–5.37 ton of grain units per 1 ha); in the crop rotation with clover, it was somewhat less (3.48–4.83 ton of grain units per 1 ha). In time, productivity of 1 hectare of arable land increased in the crop rotation with fallow and decreased in the crop rotation with clover. Also, reduction of fertilizer application efficiency in the crop rotation with clover was noted (as compared to the control, beet root yield increase was 28.1–46.3% in the 4th rotation and 19.0–38.8% in the 9th one). In the crop rotation with fallow, beet root yield remained practically unchanged (as compared to the control, beet root yield was 28.8–44.7% in the 1st rotation and 28.8–46.3% in the 9th one).

Key words: crop rotation, black fallow, clover, sugar beet, energy efficiency, payback, productivity.

УДК 631.559:633.16:631.811:631.415.1:631.821

ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИНКА, КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА—РАСТЕНИЕ ПРИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ЛОЛОМИТОВОЙ МУКОЙ

© 2020 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, К. Ф. Шаврина¹, О. Н. Яковлев¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет 192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия ²Агрофизический научно-исследовательский институт 195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия *E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru
Поступила в редакцию 21.03.2019 г.
После доработки 15.04.2019 г.
Принята к публикации 10.10.2019 г.

В многолетнем микрополевом эксперименте установлено, что в интервале доз доломитовой муки $0-0.9\,H_\Gamma$ урожайность зерна, соломы и половы ячменя линейно возрастала. Установлена тесная корреляционная связь между величинами дозы мелиоранта и соотношения зерно : солома (r=0.925). Выявлено, что при известковании дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе почва—растение проявлялись интенсивнее, чем взаимодействия Ca-Zn. Содержание Ca-Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы мелиоранта, возрастанием Ca-Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно возрастало в интервале доз доломитовой муки Ca-Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно возрастало в интервале доз доломитовой муки Ca-Zn в содержание Ca-Zn в зависело от дозы.

Ключевые слова: ячмень, продуктивность, взаимодействие цинка, кальция, магния, почвенная кислотность, нейтрализация, доломитовая мука.

DOI: 10.31857/S0002188120010135

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к взаимодействию макро- и микроэлементов-аналогов при переходе из почвы в растения направлен на решение экологических и методических задач, связанных с управлением качеством продукции растениеводства. Химическое сродство элементов-аналогов предопределяет сходство их биологического поведения в системе почва—растение: интенсивность сорбции почвой и растениями микро- и ультрамикроэлементов зависит от интенсивности сорбции макроэлемента-аналога [1, 2].

Цинк, кальций и магний, элементы II группы периодической системы химических элементов — неполные химические аналоги. Поглощение Zn растениями должно зависеть от концентрации и распределения Са и Mg в среде. Так как Са и Mg относятся к основным элементам питания растений, то его химические аналоги, относящиеся к жизненно важным элементам или/и представля-

ющие опасность для здоровья человека, требуют особого внимания.

Цинк относится к числу эссенциальных (жизненно необходимых) химических элементов [3]. Среднее содержание Zn в поверхностных слоях различных почв изменяется в пределах 17—125 мг/кг. При дефиците Zn подавляется деление клеток, накапливаются редуцирующие сахара, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, увеличивается накопление органических кислот, снижается содержание ауксина, нарушается синтез белка [4, 5]. Цинк поступает в растения как катион Zn²+ или в форме хелатных соединений через корни и листья. Признаком недостатка Zn у зерновых культур являются мелколистность и крайчатый хлороз [6].

Цинк — один из важнейших микроэлементов в организме человека. Он входит в состав более двухсот ферментов и гормонов, участвует в основных жизненных процессах: кроветворения, обмене углеводов, жиров и белков, энергетиче-

ских и редокс-процессах. Этот элемент обнаружен в гипофизе и половых железах, т.е. участвует в процессах размножения, роста и развития. Как недостаток, так и избыток цинка в организме приводит к заболеваниям: анемии, сахарному диабету, нефриту, циррозу печени и другим. Содержание цинка в организме человека составляет 2—3 г, в том числе в крови 0.8—0.9 г, а также в железах внутренней секреции, в мышцах, в печени. Суточная потребность в цинке равна 15—20 мг [7]. Известкование кислых почв может приводить к дефициту Zn для растений, а также рассматривается как прием снижения поступления элемента в растения при повышенном содержании в почвах [8].

Существует взаимосвязь между содержанием Ca, Mg и Zn в растениях [9]. В полевом эксперименте установлено [10], что содержание Zn в зерне, полове и соломе озимой ржи линейно снижалось с увеличением содержания обменного кальция в почве. Выявлено, что конкурентные взаимодействия Mg—Zn в системе почва—растение проявлялись интенсивнее, чем взаимодействия Ca—Zn.

Цель работы — в многолетнем микрополевом эксперименте установить влияние возрастающих доз доломитовой муки (ДМ) на продуктивность растений ячменя и распределение Zn, Ca и Mg в системе почва—растение, выявить закономерности конкурентного взаимодействия указанных элементов-аналогов при переходе из почвы растения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние возрастающих доз ДМ на продуктивность растений ячменя (Hordeum L.) и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почварастение изучали в условиях многолетнего микрополевого эксперимента, заложенного в мае 2012 г. в Меньковском филиале Агрофизического института в полиэтиленовых сосудах без дна (S == 1 м², глубина 25 см, ≈300 кг почвы/сосуд) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве [11, 12]. Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой дерново-подзолистой почвой (≈300 кг почвы/сосуд): р ${
m H}_{
m KCl}$ 4.64 \pm 0.04, $H_{
m r}$ − 4.11 ± 0.08 , Ca^{2+} , Mg^{2+} $- 2.68 \pm 0.14$ и $0.36 \pm$ $\pm 0.06 \, 1/2$ ммоль/100 г соответственно. Схема опыта, варианты: 1 -контроль, 2 -фон $+ ДМ 0.2 H_r$, $3 - \phi$ он + ДМ $0.3 H_{r}$, $4 - \phi$ он + ДМ $0.4 H_{r}$, 5 фон + ДМ $0.5 H_{\rm r}$, 6 – фон + ДМ $0.6 H_{\rm r}$, 7 – фон +

+ ДМ $0.7\,H_{\rm r}, 8$ — фон + ДМ $0.8\,H_{\rm r}, 9$ — фон + ДМ $0.9\,H_{\rm r}, 10$ — фон + ДМ $1.5\,H_{\rm r}$. Размещение делянок систематическое, 2-рядное, без повторностей. Фон — минеральные удобрения (АФК и $N_{\rm aa}$) — вносили ежегодно в каждый сосуд. Доза ДМ (CaCO $_3$ — 50.4, MgCO $_3$ — 48.9%) по $1\,H_{\rm r}$ составляла $5.54\,{\rm T/ra}$. Смешанные почвенные пробы отбирали 2 раза в год из каждого сосуда тростевым буром: 1-й отбор до внесения удобрений и мелиоранта — $22\,{\rm mag}$ $2012\,{\rm r.}$, далее — через 63, 359, 414, 713, $841\,{\rm cyr}$ после закладки опыта. В период наблюдения в опыте выращивали следующие сельскохозяйственные культуры: викоовсяную смесь ($2012\,{\rm r.}$), рапс ($2013\,{\rm r.}$), овощные бобы ($2014\,{\rm r.}$).

В 2015 г. опытной культурой был ячмень сорта Ленинградский. Посев и внесение минеральных удобрений проводили 5 мая (500 семян/делянку или м²). Минеральные удобрения (нитроаммофоска (15:15:15) и аммиачная селитра) были внесены в дозе N120P100K100. Суммарная за 2012—2015 гг. доза внесенных минеральных удобрений составила N330P250K250. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений 5 мая.

В процессе вегетации растений ячменя определяли динамику высоты растений — 10 замеров за вегетацию (через 15, 22, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 77 и 84 сут после посева), объем выборки — 30 растений. Уборку урожая проводили в фазе восковой спелости, через 87 сут после посева. Проводили сплошной учет урожая с каждой делянки.

В почве определяли р H_{KCl} — потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность — по Каппену, содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} — согласно [13]. В почвенных и растительных пробах содержание Zn определяли атомно-абсорбционным методом. Содержание подвижных соединений Zn в почве определяли в вытяжке AAБ pH 4.8, содержание кислоторастворимых соединений устанавливали после химического разложения проб 5М HNO₃. Повторность измерений трехкратная. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые эксперименты, схемы которых включают широкий диапазон доз мелиоранта, позволяют установить зависимости доза—ответ, количественно характеризующие влияние мелиоранта на параметры плодородия почвы, продуктивность и элементный состав сельскохозяйственных культур. Влияние возрастающих доз ДМ на рост и развитие растений ячменя оценивали по следующим критериям: всхожесть (%), скорость

увеличения высоты растений (см/сут), биомасса зерна, соломы и половы (т/га), соотношение массы зерно: солома. Всхожесть растений ячменя в вариантах опыта, установленная через 10 сут после посева, изменялась от 86 ± 5 до $94 \pm 6\%$ и не зависела от дозы мелиоранта. Коэффициенты вариации (ν) данного показателя не превышали 2-10% (для расчета величины ν (%) использовали показатели всхожести в каждом рядке (10 рядков в варианте)).

Динамику высоты растений изучали в период от 0 до 81 сут с момента высева семян (10 замеров за вегетацию). Для описания указанного процесса хорошо логистическая (сигмоидная) модель [14, 15]:

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2,$$

где H_1 — начальная высота, см (равна нулю), H_2 — максимальная высота растений (см), t_0 — точка перегиба, в момент которой $H=1/2(H_1+H_2)$, dt — крутизна кривой (угол наклона) — постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см/сут) достигала максимума в момент $t=t_0$. Отношение $(H_2-H_1)/4dt$ характеризовало скорость на момент времени t_0 (максимальную), см/сут (Vmax) (табл. 1).

Установлено, что величина *Vmax*, характеризующая рост растений ячменя в высоту, не зависела от дозы ДМ, варьировалась в пределах 2.6—2.8 см/сут. Полученные в ходе исследования величины *Vmax* практически совпадали с показателями для указанной сельскохозяйственной культуры, установленными ранее [15].

Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя районированного сорта Ленинградский представлено в табл. 2. Максимальная урожайность зерна, отмеченная в интервале доз ДМ $0.5-0.9\ H_{\rm r}$, варьировалась в пределах $4.5-4.9\ {\rm T/ra}$, что на 29-39% больше, чем в контрольном варианте. Известно [16], что максимальный урожай ячменя данного сорта ($5.24\ {\rm T/ra}$), был получен в Ленинградской обл. в $2006\ {\rm r.}$

Влияние ДМ в дозах $0.5-0.6\ H_{\Gamma}$ на урожайность зерна ячменя было практически идентично влиянию доз $0.8-0.9\ H_{\Gamma}$. При внесении ДМ в дозе $1.5\ H_{\Gamma}$ наблюдали снижение биомассы ячменя: прибавка урожая зерна по отношению к контролю не превысила 11% [8]. В интервале доз мелиоранта $0-0.9\ H_{\Gamma}$ зависимости урожайности зерна, соломы и половы ячменя от дозы характеризовались коэффициентами корреляции (r) 0.830, 0.606 и 0.760, соответственно (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна 0.666).

Таблица 1. Параметры логистической модели, характеризующие динамику высоты растений ячменя

Вариант	r^2	<i>H</i> ₁ , см	<i>H</i> ₂ , см	t_0 , сут	dt	$V_{ m max}$, см/сут
1. Контроль	0.98	0	94 ± 5	46 ± 2	9.2 ± 1.5	2.6
2. ДМ $0.2H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	96 ± 5	46 ± 2	8.5 ± 1.4	2.8
3. ДМ $0.3H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	96 ± 4	45 ± 2	8.6 ± 1.4	2.8
4. ДМ $0.4H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	97 ± 4	44 ± 2	9.2 ± 1.3	2.6
5. ДМ $0.5H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	99 ± 4	45 ± 2	8.7 ± 1.3	2.8
6. ДМ $0.6H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.99	0	98 ± 4	45 ± 1	8.8 ± 1.2	2.8
7. ДМ $0.7H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.99	0	98 ± 4	46 ± 2	8.8 ± 1.2	2.8
8. ДМ $0.8H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	99 ± 5	45 ± 2	8.8 ± 1.4	2.8
9. ДМ $0.9H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.98	0	100 ± 5	45 ± 2	8.9 ± 1.4	2.8
10. ДМ 1.5 <i>H</i> _г	0.99	0	94 ± 4	45 ± 1	8.8 ± 1.2	2.7

Таблица 2. Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя, т/га [8]

Вариант	Зерно	Солома	Полова	Зерно: солома
1. Контроль	3.49	3.97	0.71	0.88
2. ДМ $0.2~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.37	4.55	0.83	0.96
3. ДМ $0.3~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.29	4.69	0.82	0.91
4. ДМ $0.4H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.19	4.26	0.79	0.98
5. ДМ $0.5~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.70	4.63	0.85	1.01
6. ДМ $0.6\ H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.87	4.84	0.86	1.00
7. ДМ 0.7 $H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.52	4.44	0.81	1.01
8. ДМ $0.8~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.74	4.75	0.93	1.00
9. ДМ $0.9H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.76	4.62	0.86	1.03
10. ДМ 1.5 $H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	3.86	3.51	0.67	1.10

Установлена тесная корреляционная связь между дозой ДМ и соотношением массы зерно: солома в урожае ячменя (r = 0.925, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости равной 0.632).

При известковании кислых почв доломитовой мукой изменение кислотно-основных свойств почвы, насыщение ППК кальцием и магнием приводит к усилению конкурентных взаимодействий в системе почва—растение между указанными химическими элементами и другими ионами, присутствующими в почвенном растворе. Влияние возрастающих доз ДМ на содержание Са, Мg и Zn в растениях ячменя характеризуют экспериментальные данные, представленные в табл. 3. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ (табл. 4). Внесение повышенной $(1.5 H_{\rm p})$ дозы

Таблица 3. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка (мг/кг), кальция и магния (%, а.с.в) в растениях ячменя

Вариант	Ca	Mg	Zn	Ca	Mg	Zn
	Зер	ЭНО	Солома			
1. Контроль	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.01	42 ± 2	0.50 ± 0.03	0.04 ± 0.0	10 ± 0.3
2. ДМ $0.2~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01	32 ± 1	0.47 ± 0.03	0.06 ± 0.01	8.3 ± 0.3
3. ДМ $0.3~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01	29 ± 1	0.43 ± 0.01	0.06 ± 0.01	5.8 ± 0.4
4. ДМ $0.4~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01	29 ± 1	0.37 ± 0.02	0.06 ± 0.01	6.2 ± 0.1
5. ДМ $0.5~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01	28 ± 1	0.47 ± 0.01	0.07 ± 0.01	4.6 ± 0.5
6. ДМ $0.6~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	25 ± 1	0.43 ± 0.02	0.14 ± 0.0	4.4 ± 0.3
7. ДМ $0.7~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	23 ± 1	0.43 ± 0.01	0.10 ± 0.01	3.2 ± 0.1
8. ДМ $0.8~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.01	24 ± 1	0.43 ± 0.01	0.07 ± 0.01	3.2 ± 0.1
9. ДМ $0.9\ H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	23 ± 1	0.46 ± 0.02	0.08 ± 0.01	5.6 ± 0.5
10. ДМ 1.5 $H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	7 ± 0.5	0.46 ± 0.02	0.11 ± 0.01	2.9 ± 0.1
Полова					Корни	
1. Контроль	0.54 ± 0.02	0.22 ± 0.02	17 ± 2	0.19 ± 0.03	0.40 ± 0.02	14 ± 1
2. ДМ $0.2~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.57 ± 0.03	0.22 ± 0.02	9.5 ± 0.5	0.39 ± 0.02	0.82 ± 0.01	13 ± 1
3. ДМ $0.3~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.61 ± 0.02	0.29 ± 0.01	9.8 ± 0.5	0.36 ± 0.03	0.50 ± 0.03	11 ± 0.5
4. ДМ $0.4~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.59 ± 0.04	0.26 ± 0.01	9.3 ± 0.4	0.39 ± 0.02	0.45 ± 0.03	13 ± 1
5. ДМ $0.5~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.73 ± 0.04	0.32 ± 0.02	6.0 ± 0.5	0.45 ± 0.02	0.74 ± 0.04	11 ± 1
6. ДМ $0.6~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.57 ± 0.05	0.30 ± 0.01	5.8 ± 0.2	0.46 ± 0.03	0.54 ± 0.02	12 ± 1.5
7. ДМ $0.7~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.61 ± 0.03	0.32 ± 0.02	5.7 ± 0.4	0.41 ± 0.01	0.40 ± 0.01	12 ± 1
8. ДМ $0.8~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.47 ± 0.03	0.28 ± 0.02	6.7 ± 0.5	0.55 ± 0.02	0.47 ± 0.01	13 ± 1
9. ДМ $0.9\ H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.58 ± 0.04	0.30 ± 0.01	5.9 ± 0.5	0.42 ± 0.03	0.48 ± 0.02	9 ± 0.5
10. ДМ 1.5 $H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	0.52 ± 0.02	0.43 ± 0.04	4.3 ± 0.2	0.49 ± 0.01	0.59 ± 0.02	12 ± 0.5

мелиоранта привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и полове ячменя по отношению к контрольному варианту в 6, 3 и 4 раза соответственно. Известно [4], что среднее содержание Zn в зерне ячменя в разных странах варьируется от 15 до 51 мг/кг, содержание элемента при его дефиците оценивается в 10-20 мг/кг сухой массы. Установлено, что при внесении ДМ в дозе $1.5~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ содержание Zn в зерне ячменя снизилось до 7.0 мг/кг, в остальных вариантах опыта находилось в пределах нормы.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn, Ca и Mg в растениях ячменя от дозы доломитовой муки

Зависимость	Зерно	Солома	Полова	Корни
Ca(f) = Доза ДМ	0.334	-0.093	-0.273	0.711
Mg(f) = Доза ДМ	0.887	0.604	0.903	-0.036
Zn(f) = Доза ДМ	-0.972	-0.794	-0.787	-0.468
Zn(f) = Ca	-0.236	0.394	-0.127	-0.402
Zn(f) = Mg	-0.884	-0.682	-0.745	-0.057

Содержание Mg в зерне, соломе и полове растений ячменя линейно возрастало в интервале доз ДМ $0-1.5\ H_{\rm r}$, а содержание Ca практически не зависело от дозы мелиоранта. Коэффициент корреляции (r), характеризующий зависимость Ca(f) = доза, в корнях растений составил 0.711 (табл. 4).

Взаимодействия Mg—Zn и Ca—Zn в вегетативных и генеративных органах растений ячменя также аппроксимирует линейная модель. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением содержания Mg, и практически не зависело от содержания Ca.

Опыт показал, что при внесении ДМ увеличение содержания Мg в растениях оказывало значительно более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca, что, вероятно, связано с соотношением содержаний данных макроэлементов в почве. На момент закладки опыта содержание обменного Ca²⁺ в почве составляло 2.7 ± 0.1 , обменного Mg²⁺ $-0.36 \pm 0.06 \frac{1}{2}$ ммоль/100 г, что, согласно градации почв по содержанию элементов пита-

Таблица 5. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание обменных Ca^2 и Mg^{2+} (1/2 ммоль/100 г) и подвижных соединений Zn (мг/кг) в почве*

Вариант	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Zn
1. Контроль	3.4 ± 0.3	1.2 ± 0.02	0.66 ± 0.05
2. ДМ $0.2H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	3.4 ± 0.2	1.6 ± 0.05	0.67 ± 0.04
3. ДМ $0.3~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	3.4 ± 0.2	2.4 ± 0.1	0.47 ± 0.04
4. ДМ $0.4~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	3.7 ± 0.3	2.7 ± 0.1	0.57 ± 0.02
5. ДМ $0.5~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	3.8 ± 0.1	3.1 ± 0.2	0.31 ± 0.01
6. ДМ $0.6~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.0 ± 0.2	3.0 ± 0.2	0.39 ± 0.01
7. ДМ $0.7~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.1 ± 0.1	3.3 ± 0.3	0.32 ± 0.01
8. ДМ $0.8~H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.0 ± 0.1	3.3 ± 0.3	0.36 ± 0.02
9. ДМ $0.9H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.8 ± 0.1	3.4 ± 0.2	0.34 ± 0.01
10. ДМ 1.5 $H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$	4.7 ± 0.1	3.5 ± 0.1	0.29 ± 0.01

^{*}На момент уборки опыта, 1211-е сут взаимодействия мелиоранта с почвой.

ния [17], соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов соответственно. Известно [18], что обменного Mg^{2+} в почвах содержится в 2-8 раз меньше, чем обменного Ca^{2+} . Особенно бедны обменными основаниями кислые дерново-подзолистые почвы легкого гранулометрического состава. В почве опыта до внесения QM содержание Ca^{2+} превышало содержание QM в 7.5 \pm 1.4 раза [11]. То есть, при внесении мелиоранта в почву увеличение содержания QM сограздо более существенным для растений, чем увеличение содержания QM

Влияние возрастающих доз ДМ на содержание обменных соединений Ca^{2+} , Mg^{2+} и подвижных соединений Zn в почве на момент уборки растений (1211-е сут взаимодействия мелиоранта с почвой) представлено в табл. 5.

Известно [19], что растворимость и доступность растениям соединений цинка возрастает с подкислением среды. Минимальную растворимость соединений Zn отмечают при pH 5.5-6.9, дальнейшее повышение рН ведет к увеличению растворимости, т.к. Zn как амфотерный элемент образует в щелочной среде цинкаты типа $Zn(ONa)_2$ (или Na_2ZnO_2). Однако в присутствии достаточных количеств Са подвижность соединений Zn и в слабощелочной среде мала ввиду малой растворимости цинкатов кальция. Имеется информация [4], что растворимость и доступность Zn в почвах обнаруживают отрицательную корреляционную связь со степенью насыщенности кальцием. Низкое содержание доступного для растений Zn наблюдается в карбонатных почвах, особенно легкого гранулометрического состава [20].

Установлено, что в интервале доз ДМ $0-1.5\ H_{\rm r}$ на момент уборки урожая (1211-е сут взаимодействия ДМ с почвой) содержание подвижных соединений Zn линейно зависело от содержаний обменных ${\rm Ca^{2^+}},\ {\rm Mg^{2^+}}$ в почве: зависимости ${\rm Zn}({\rm f})={\rm Ca}$ и ${\rm Zn}({\rm f})={\rm Mg}$ характеризовались коэффициентами корреляции (r)-0.736 и -0.928 соответственно.

Содержание Zn в зерне, соломе, полове и корнях растений ячменя линейно снижалось с увеличением содержания обменных соединений Ca^{2+} , Mg^{2+} в почве (табл. 6), (рис. 1).

Общепринято [21], что реакция почвы оказывает наибольшее влияние на содержание цинка в растениях: в почвах с р $H_{\rm H_{2O}}$ 6.0 бо́льшая часть цинка находится в недоступной для растений форме, с увеличением кислотности почвы доступность Zn резко возрастает. Экспериментально установлено [22], что поглощение Zn растениями (Zea mays L.) значительно возросло, когда рН почвы снизился с 7.4 до 6.3.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции $(r)^*$, характеризующие взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва—растение

Francisco							
Зерно	Солома	Полова	Корни				
0.487	0.257	-0.214	0.550				
0.712	0.572	0.731	-0.150				
-0.814	-0.623	-0.709	-0.612				
0.207	-0.384	_	0.823				
0.806	0.667	0.777	-0.117				
-0.825	-0.936	-0.914	-0.668				
0.770	0.905	0.836	0.673				
	0.487 0.712 -0.814 0.207 0.806 -0.825	0.487 0.257 0.712 0.572 -0.814 -0.623 0.207 -0.384 0.806 0.667 -0.825 -0.936	0.487 0.257 -0.214 0.712 0.572 0.731 -0.814 -0.623 -0.709 0.207 -0.384 - 0.806 0.667 0.777 -0.825 -0.936 -0.914				

^{*}Критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна -0.632.

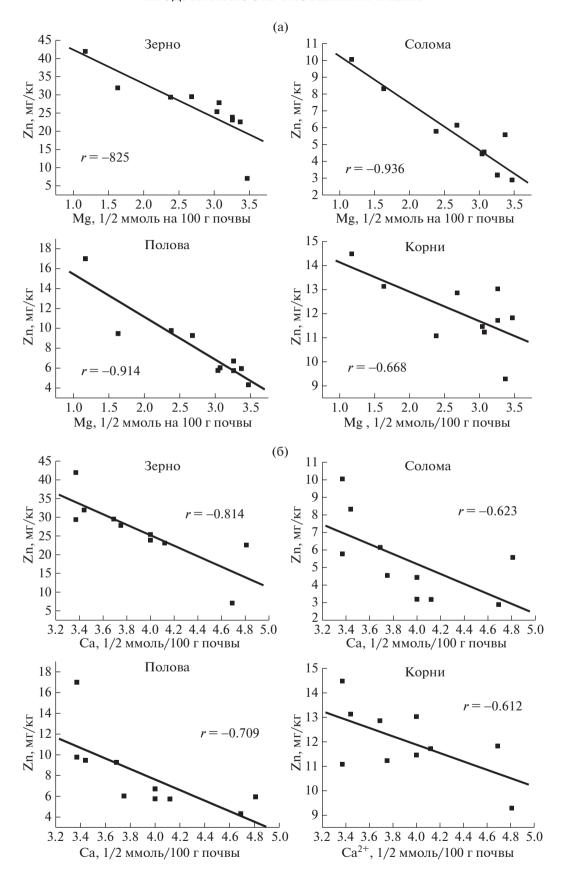


Рис. 1. Зависимость содержания цинка в растениях ячменя от содержания: (a) — обменного магния и (б) — обменного кальция в почве.

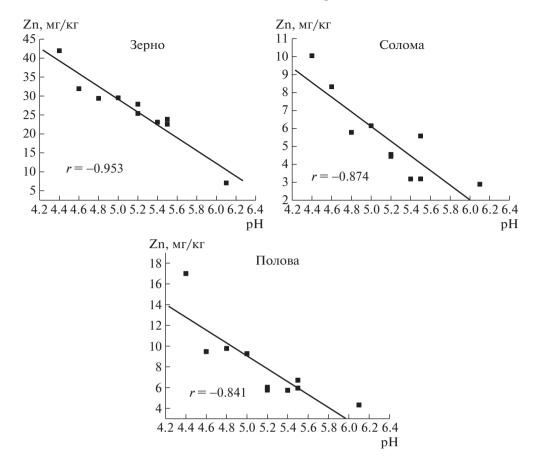


Рис. 2. Зависимость содержания цинка в растениях ячменя от величины pH_{KCl} почвы.

Опыт показал, что с увеличением р $H_{\rm KCl}$ почвы линейно снижалось содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя. Наиболее тесной корреляционной связью (r=-0.953) характеризовалась зависимость Zn(зерно)—рH(почва) (рис. 2). Коэффициент корреляции, характеризующий зависимость Zn(корни)—рH(почва) не превысил -0.496 (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна -0.632).

выводы

- 1. Для описания динамики высоты растений ячменя хорошо подходит логистическая (сигмо-идная) модель. Величины максимальной скорости роста растений ячменя в высоту (*Vmax*) не зависели от дозы доломитовой муки, варьировались в пределах 2.6—2.8 см/сут.
- 2. В интервале доз доломитовой муки (ДМ) 0— $0.9\,H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ урожайность зерна, соломы и половы ячменя линейно возрастали (коэффициенты корреляции (r) были равны $0.830,\ 0.606$ и 0.760 соответственно). Максимальная урожайность зерна ячменя установлена в интервале доз ДМ 0.5— $0.9\,H_{\scriptscriptstyle \Gamma}$

- (4.5-4.9 т/га, что на 29-39% больше, чем в контрольном варианте).
- 3. При известковании кислых почв доломитовой мукой изменение кислотно-основных свойств почвы, насыщение ППК кальцием и магнием приводили к усилению конкурентных взаимодействий в системе почва—растение между ионами Са, Mg, Zn, присутствующими в почвенном растворе.
- 4. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ, возрастанием pH почвенного раствора и увеличением содержания обменных соединений ${\rm Ca^{2+} u~Mg^{2+}~B}$ почве. Внесение повышенной (1.5 $H_{\rm r}$) дозы мелиоранта привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и полове ячменя по отношению к контрольному варианту в 6, 3 и 4 раза соответственно.
- 5. Содержание Mg в зерне, соломе и полове растений ячменя линейно возрастало в интервале доз ДМ $0-1.5\ H_{\rm r}$, содержание Ca практически не зависело от дозы мелиоранта.
- 6. Увеличение содержания Mg в почве и растениях при внесении ДМ оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дричко В.Ф., Цветкова В.В. Сорбционная модель поступления радионуклидов из почвы в растения // Почвоведение. 1990. № 10. С. 35–40.
- 2. Витковская С.Е. Взаимодействие фосфора и радиосурьмы в системе почва—растение: Дис. ... канд. биол. наук, Обнинск, 1996. 171 с.
- 3. *Исидоров В.А.* Введение в химическую экотоксикологию: Уч. пособ. СПб.: Химиздат, 1999. 144 с.
- 4. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Mousavi S.R., Galavi M., Rezaei M. The interaction of zinc with other elements in plants: a review // Inter. J. Agr. Crop Sci. 2012. V. 4(24). P. 1881–1884.
- 6. Вильдфлуш И.Р. Эффективность применения микроудобрений и регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур. Минск: Бел. наука, 2011. 293 с.
- 7. *Ткаченко А.В.*, *Маковкина Д.В.*, *Дробышева О.М.* Элемент здоровья цинк и его определение в различных компонентах // Здоровье и образование в XXI веке. 2017. Т. 19. № 10. С. 264—266.
- 8. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в растениях ячменя // Мат-лы Всерос. научн. конф. с международ. участием "Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления" (с семинаром "Полуэктовские чтения 2016"), 21—23 сентября 2016 г. СПб.: АФИ, 2016. С. 382—386.
- 9. *Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю*. Взаимодействие магния, кальция и калия при поступлении в молодые растения льна-долгунца // Агрохимия. 2007. № 3. С. 28—33.
- 10. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4—12.
- 11. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кис-

- лотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2016. № 7. С. 3—11.
- 12. Витковская С.Е., Яковлев О.Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва—растение // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44—51.
- 13. ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 26.03.85 // Сб. гос. стандартов. М.: Изд-во стандартов, 1985. С. 21—33.
- 14. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельско-хозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50-53.
- 15. *Витковская С.Е.* Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 1. С. 63—72.
- 16. *ФГБНУ* "Ленинградский НИИСХ Белогорка". http://lniish.ru/sorts/grain/leningradskiy.html
- 17. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М., 2003. 195 с.
- 18. *Воеводина Л.А., Воеводин О.В.* Магний для почвы и растений // Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2015. № 2(18). С. 70—81.
- Возбуцкая А.Е. Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968.
 429 с.
- 20. Ефимов В.Н., Калиниченко В.Г., Горлова М.Л. Применение микроэлементов при выращивании сельскохозяйственных культур (овощные, кормовые корнеплоды, многолетние травы) на почвах Северо-Запада Нечерноземной зоны РСФСР: Уч. пособ. Л.: ЛГАУ, 1991. 36 с.
- 21. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Зырина Н.Г. и Садовниковой Л.К. М.: Изд-во МГУ, 1985 208 с.
- 22. Amrani M., Westfall D.G., Petersen G.A. Zinc plant availability as influenced by zinc fertilizer sources and zinc water-solubility // Technic. Bul. TB97-4, Agricult. Exp. Station, Department of soil and crop sciences. September. 1997. 17 p.

Productivity of Plants of Barley and Interaction of Zinc, Calcium and Magnesia in the Soil—Plant System at Neutralization of the Soil Acidity Dolomitic Flour

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#}, K. F. Shavrina^a, and O. N. Yakovlev^a

^a Russian State Hydrometeorological University Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia
 ^b Agrophysics Research Institute Gragdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia
 [#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

It was established under the conditions of a multiyear micro-field experiment, that in the dose range of dolomite flour $0-0.9\,H_{\rm a}$ the grain yield, straw and barley chaff increased linearly. A close correlation was established between the ameliorant dose and the grain : straw ratio (r=0.925). It was revealed that during the liming of sod podzolic soil by dolomite flour, the competitive Mg–Zn interactions in the soil–plant system were manifested more intensively than the Ca–Zn interactions. The Zn content in the grain, straw, and barley of the barley decreased linearly with an increase in the ameliorant dose, a growth in pH, and an increase in the content of exchangeable compounds ${\rm Ca^{2^+}}$, ${\rm Mg^{2^+}}$ in the soil. The Mg content in the grain, straw and barley rude linearly increased in the dose range of dolomite flour $0-1.5\,H_{\rm a}$, and the Ca content was almost independent of dose.

Key words: barley, productivity, interaction of zinc, calcium, magnesium, soil acidity, neutralization, dolomite flour.

УЛК 631.416:631.67:631.445.56

ПОТЕРИ Са, Mg, K, Na, Fe И F ИЗ ОРОШАЕМОЙ ЛУГОВО-СЕРОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ МИГРАЦИИ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЮВИИРОВАНИЯ (ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ОПЫТА)

© 2020 г. А. В. Литвинович^{1,*}, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт 196600 С.-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 7, Россия ² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет 196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия ³ Санкт-Петербургский государственный университет 199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7—9, Россия *E-mail: avlayr@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.01.2019 г. После доработки 12.04.2019 г. Принята к публикации 10.10.2019 г.

Орошение лугово-сероземной супесчаной почвы сопровождалось вовлечением в миграционные потоки больших количеств щелочных и щелочно-земельных металлов. Запас подвижных катионов был весьма значителен. По способности к выщелачиванию их можно выстроить в следующий по убыванию ряд: Na > Ca > Mg > K. Средняя скорость вымывания для Ca и K составила: v = -35.2, и -3.98 мг/л, для Na и Mg: v = -16.1 и -1.16 мг/л соответственно. В результате многократного промывания почвы ни для одного из изученных катионов не удалось достичь полного удаления водорастворимых форм. Миграция железа не установлена. Потери фтора с промывной влагой были также весьма значительными. Средняя скорость потерь при его миграции составила: v = -0.176 мг/л. Выявлена разной силы положительная связь между содержанием фтора и натрия, кальция, калия и магния в фильтратах. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие процессы миграции щелочных, щелочноземельных металлов и фтора из лугово-сероземной почвы при промывании.

Ключевые слова: щелочные и щелочноземельные металлы, фтор, почва, орошение, миграция.

DOI: 10.31857/S0002188120010056

ВВЕДЕНИЕ

Нисходящая миграция растворенных веществ играет важную роль в формировании почв с промывным водным режимом. Масштаб миграции отдельных элементов весьма значителен, а аналитические исследования фиксируют обеднение верхней части профиля типоморфными элементами и основаниями.

Жидкая фаза почв является наиболее простой и доступной для изучения. Накоплен обширный объем первичной информации о составе почвенных растворов подзолистых, луговых, серых лесных и черноземных почв [1-7]. Прослежены изменения состава лизиметрических вод при вовлечении почв в хозяйственный оборот [8, 9]. Есть данные о составе жидкой фазы почв, испытывающих техногенное загрязнение [10, 11].

Земледельческое использование почв аридных регионов немыслимо без проведения ирригационных мероприятий. Орошение ведется по бороздам. Потери влаги при фильтрации достигают больших объемов. Вода в борозды подается непрерывно, без учета как фактической, так и плановой нормы оросительной влаги [12]. Например, на территории Ферганской долины (Узбекистан) при возделывании хлопчатника рекомендованная оросительная норма составляет 8000 м³/га при разовой норме полива от 700 до 900 м³ в начале вегетации, $800-1200 \text{ м}^3$ — во время цветения и плодоношения и $650-800 \text{ м}^3$ — во время созревания [12]. Фактический расход воды при однократном поливе достигает 1600—2000 м³ и более [13]. Это приводит к тому, что профиль орошаемых почв за сезон промачивается многократно, что дало осно-

Таблица 1. Валовой химический состав лугово-сероземной почвы, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	P_2O_5	SO ₃	K ₂ O
57.5	10.9	4.61	9.53	2.51	0.07	1.72	0.24	< 0.05	1.8

вания А.А. Роде [14] классифицировать водный режим орошаемых почв Средней Азии как ирригационный, для которого характерно многократное и глубокое (сквозное и не сквозное) за сезон промачивание профиля.

Изучением жидкой фазы почв Средней Азии в разные годы занимались многие исследователи [15—21]. Эти работы посвящены в основном засоленным и гипсоносным почвам.

Материалы сопряженного изучения масштаба потерь щелочных, щелочноземельных металлов и фтора при орошении техногенно-загрязненных почв, используемых для возделывания хлопчатника, в литературе отсутствуют. Не разработаны математические модели, адекватно описывающие потери кальция, магния, калия, натрия и фтора в результате элювиирования.

Цель работы — в лабораторном опыте на колонках (воронках) установить миграционную способность железа, кальция, магния, калия, натрия и фтора при орошении хлопчатника в почве, испытывающей техногенное загрязнение фтором, и провести ранжирование отдельных элементов по их способности к миграции.

В задачи исследования входило:

- определить "фонд" способных к миграции катионов железа, кальция, магния, калия, натрия и фтора при многократном промывании почвы;
- разработать эмпирические модели, адекватно описывающие миграционные потери химических элементов при орошении; рассчитать среднюю скорость утраты оснований по мере увеличения объема просочившейся влаги;
- установить корреляционную связь межу количеством вымываемого фтора и потерей кальция, магния, калия, натрия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения опыта на колонках почва была отобрана из пахотного слоя 0—25 см. Поле расположено на расстоянии 3.5 км от предприятия по производству аммофоса (г. Коканд, Узбекистан). В составе выбросов предприятия наибольшую угрозу представляют выбросы фтора.

Почва занята посевами хлопчатника. Физико-химическая характеристика почвы следующая: содержание частиц <0.01 мм - 15.7%, р $H_{\rm H,O}$ 8.1,

гумус — 0.8%, валовое содержание фтора — 437 мг/кг почвы. Это соответствует данным, приведенным в работе [22] для карбонатных почв. Содержание водорастворимого фтора — 5.5 мг/кг почвы. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 1.

Перед набивкой в воронки почву высушивали и измельчали, пропуская сквозь сито с диаметром ячеек 1 мм. Масса почвы в воронке — 300 г. Высота почвенного слоя — 17 см. Плотность набивки — 1.0—1.1 г/см³. Для разового промывания использовали 125 мл дистиллированной воды. Всего проведено 24 промывания. Общий объем просочившейся влаги — 3 л. Промежуток времени между отдельными промачиваниями почвы — не более 1—2 сут. Повторность четырехкратная. В элюатах каждой промывки устанавливали концентрацию фтора, кальция, магния, калия, натрия и железа.

Фтор в промывных водах определяли, используя фтор-селективный электрод. Концентрацию металлов устанавливали на рентгенфлюоресцентном спектрофотометре. Данные определений обрабатывали статистически [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения содержания химических элементов в промывных водах отдельных порций фильтратов сведены в табл. 2. Валовое содержание натрия в изученной почве в пересчете на Na_2O составляло 1.72%. В почвах натрий присутствует в 3 основных формах: необменной, обменной и водорастворимой. Для натрия характерны сравнительно слабая роль биологического круговорота в ландшафтах и большая величина водной миграции [24].

В нашем исследовании натрий характеризовался наибольшей податливостью к вымыванию. В элюате первого промывания его концентрация составила 42.5 г/л. В промывных водах 2-го срока она снижалась в 15 раз. Всего за 2 промывания концентрация натрия в промывных водах уменьшилась более чем в 60 раз. По мере увеличения объема просочившейся влаги содержание натрия продолжало снижаться. В элюате последнего промывания его концентрация оставалась высокой и составила 102 мг/л. Следовательно, полного удаления водорастворимых форм этого элемента

Таблица 2. Количество вымываемых элементов

№ промывания	Са	Mg	Na	K	F				
1	645 ± 13	460 ± 10	42 500 ± 11	216 ± 5	3.9 ± 0.4				
	80.6	57.5	5300	27.0	0.49				
2	635 ± 12	105 ± 6	2750 ± 14	92.3 ± 2.5	3.7 ± 0.3				
	79.4	13.1	344	11.5	0.46				
3	660 ± 16	60 ± 4	690 ± 11	66.4 ± 1.4	3.7 ± 0.4				
4	82.5	7.5	86.3	8.3	0.46				
4	690 ± 9	29 ± 2	520 ± 8	41.1 ± 1.2	3.4 ± 0.5				
5	86.3	3.6	65.0	5.13	0.43				
3	$\frac{795 \pm 12}{200.4}$	$\frac{13 \pm 1}{1.6}$	$\frac{240 \pm 6}{30.0}$	$\frac{26.4 \pm 0.8}{2.2}$	$\frac{3.8 \pm 0.5}{0.48}$				
6	99.4 820 ± 18	5.5 ± 0.8	$30.0 \\ 280 \pm 6$	3.3 18.3 ± 0.9	0.48				
O	$\frac{820 \pm 18}{103}$	$\frac{3.3 \pm 0.8}{0.7}$	$\frac{280 \pm 6}{35.0}$	$\frac{18.3 \pm 0.9}{2.28}$	$\frac{4.3 \pm 0.6}{0.54}$				
7	595 ± 12	1.5 ± 0.1	165 ± 7	13.3 ± 0.9	3.3 ± 0.8				
	$\frac{333 \pm 12}{74.4}$	$\frac{1.5 \pm 0.1}{0.2}$	$\frac{100 \pm 7}{20.6}$	1.66	$\frac{0.52 \cdot 0.6}{0.42}$				
8	210 ± 8	0.29 ± 0.03	100 ± 5	10.5 ± 0.2	2.09 ± 0.04				
	26.3	0.04	12.5	1.31	0.26				
9	43 ± 6	0.32 ± 0.02	162 ± 5	9.1 ± 0.1	2.00 ± 0.03				
	5.4	0.04	20.3	1.14	0.25				
10	85 ± 7	1.35 ± 0.04	290 ± 5	25.7 ± 0.4	1.8 ± 0.1				
11	10.6	0.17	36.3	3.2	0.23				
11	$\frac{40 \pm 5}{5.0}$	0.86 ± 0.05	$\frac{210 \pm 4}{26.2}$	11.2 ± 0.5	1.61 ± 0.04				
12	5.0	0.11	26.3	1.4	0.20				
12	$\frac{58 \pm 9}{7.3}$	$\frac{1.2 \pm 0.1}{0.14}$	$\frac{205 \pm 4}{26.2}$	$\frac{7.06 \pm 0.09}{0.88}$	$\frac{1.53 \pm 0.05}{0.18}$				
13	38 ± 5	0.92 ± 0.2	174 ± 5	7.06 ± 0.05	1.52 ± 0.01				
	$\frac{36 \pm 3}{4.75}$	$\frac{0.92 \pm 0.2}{0.12}$	$\frac{174 \pm 3}{21.75}$	$\frac{7.00 \pm 0.03}{0.88}$	$\frac{1.32 \pm 0.01}{0.19}$				
14	27 ± 3	0.81 ± 0.09	144 ± 7	11.6 ± 0.1	1.30 ± 0.02				
	3.4	0.10	18.0	1.45	0.16				
15	22 ± 2	0.76 ± 0.06	132 ± 6	10.0 ± 0.3	1.02 ± 0.03				
	2.8	0.095	16.9	1.26	0.13				
16	20 ± 2	0.68 ± 0.05	114 ± 6	14.5 ± 0.5	1.0 ± 0.1				
17	2.5	0.09	14.3	1.82	0.13				
17	$\frac{20 \pm 2}{2.5}$	0.78 ± 0.04	$\frac{78 \pm 1}{2}$	$\frac{7.1 \pm 0.2}{0.00}$	0.98 ± 0.01				
18	2.5	0.098	9.75	0.88	0.13				
10	$\frac{25 \pm 1}{3.1}$	$\frac{0.85 \pm 0.06}{0.11}$	$\frac{120 \pm 3}{15.0}$	$\frac{9.6 \pm 1.0}{1.19}$	$\frac{0.90 \pm 0.02}{0.11}$				
19	56 ± 4	0.11 0.91 ± 0.04	80 ± 3	3.9 ± 0.5	0.85 ± 0.03				
	$\frac{30 \pm 1}{7.0}$	$\frac{0.91 \pm 0.01}{0.11}$	$\frac{30 \pm 3}{10.0}$	$\frac{5.9 \pm 0.3}{0.49}$	0.11				
20	25 ± 2	0.82 ± 0.05	120 ± 3	5.8 ± 0.4	0.70 ± 0.02				
	3.1	0.10	15.0	0.73	0.09				
21	22 ± 1	0.81 ± 0.04	90 ± 5	3.73 ± 0.2	0.51 ± 0.01				
	2.8	0.10	11.25	0.47	0.06				
22	17 ± 2	0.70 ± 0.05	132 ± 5	3.32 ± 0.02	0.40 ± 0.01				
22	2.1	0.09	16.5	0.42	0.05				
23	$\frac{19 \pm 1}{2}$	0.76 ± 0.07	$\frac{90 \pm 6}{1112}$	3.7 ± 0.5	0.36 ± 0.05				
24	2.4	0.095	11.3	0.47	0.05				
4	$\frac{20 \pm 3}{2.5}$	$\frac{0.82 \pm 0.04}{0.10}$	$\frac{102 \pm 6}{12.75}$	$\frac{4.6 \pm 0.4}{0.57}$	$\frac{0.30 \pm 0.05}{0.04}$				
Сумма, мг	2.5 698	0.10 86.0	12.75 6190	0.57 77.8	0.04 5.7				
Thumenanne Har henton – volumentaring are menta + chemine vibratina thunge of vibrating menton – volumentaring are mentaring and service of the control of t									

Примечание. Над чертой — концентрация элемента \pm среднее квадратичное отклонение, мг/л; под чертой — количество вымытого элемента в каждой порции фильтрата с учетом объема просочившейся влаги, мг.

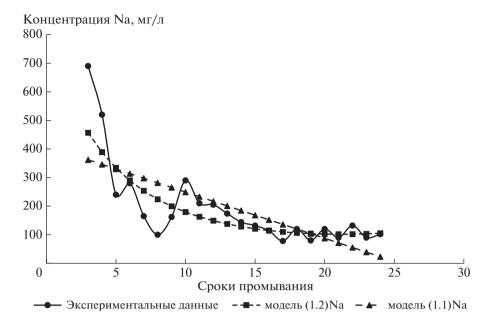


Рис. 1. Эмпирические модели динамики концентрации Na в промывных водах.

достичь не удалось. Всего за время проведения опыта было вымыто 6190 мг натрия.

Таким образом, "фонд" способных к миграции соединений натрия в изученной почве очень велик, а ведение поливного земледелия способствует перемещению больших масс этого элемента в нижележащие слои почвенного профиля.

Поскольку концентрация натрия в первые 2 срока промывания снижалась очень резко, экспоненциальной зависимости, чтобы описать динамику изменения содержания этого элемента в фильтратах во всем временном промежутке изучения, оказалось недостаточно. Построение эмпирических моделей пришлось начинать с 3-го срока. Причем последующее изменение концентрации натрия в промывных водах происходило также настолько резко, что экспоненциальную зависимость использовать все же пришлось.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания Na в промывных водах имеет вид:

$$y_{1.1} = 410.6 - 16.1t,$$
 (1.1)

где t — сроки (условное время t > 2).

Средняя скорость динамики содержания Na в промежутке от 3-го до 24-го промываний: $v_1 = -16.1 \, \mathrm{Mr/n}$.

Эмпирическая модель (1.1) статистически значима на высоком уровне значимости 0.1% (статистика F принимает величину F=19.6 при критической величине F(0.999, 1.20)=14.8). Коэффициент детерминации $R^2=0.49$. График модели (1.1) приведен на рис. 1.

Эмпирическую модель динамики содержания Na строили на основе многочлена 2-й степени и экспоненты:

$$y_{1,2} = \exp(6.7 - 0.19t + 0.005t^2),$$
 (1.2)

где t — сроки (условное время t > 2).

В начале данные динамики содержания Nа логарифмировали и строили эмпирическую модель на основе многочлена 2-й степени, которая оказалась статистически значимой на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F=22.8 при критической величине F(0.9999, 2.19)=15.5). Коэффициент детерминации $R^2=0.7$.

Далее использовали экспоненту для построения эмпирической модели (1.2) динамики содержания Na. График модели (1.2) приведен на рис. 1.

Вторым по способности к миграции катионом в изученной почве являлся кальций. На сегодняшний день проведено значительное количество исследований по выявлению основных факторов, влияющих на потерю кальция из почв с фильтрующейся влагой атмосферных осадков [25—27]. Среди них наибольшую величину имеют следующие: степень насыщенности поглощающего комплекса почвы кальцием, наличие "свободных" (не прореагировавших) карбонатов, наличие гипса, гранулометрический состав почвы и гидрологические факторы (количество и интенсивность выпадения осадков, температура воздуха и почвы).

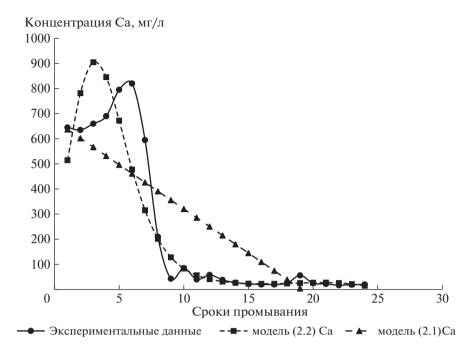


Рис. 2. Эмпирические модели динамики концентрации Са в промывных водах.

Миграционная способность кальция в почвах с промывным типом водного режима достаточно хорошо освещена в литературе. Установлены количественные потери этого элемента в почвах различных регионов мира. Подробная сводка этих публикаций приведена в работе [28].

Высокую подвижность кальция принято объяснять слабой способностью гумуса удерживать кальций [29] и большим ионным радиусом этого элемента, не позволяющим ему необменно закрепляться в почвах [30].

Валовое содержание кальция в изученной почве было очень велико. В составе почвы это 3-й по количеству химический элемент после кремния и железа. В пересчете на CaO его содержание составляло 9.53%.

Кальций — единственный из всех изученных катионов, концентрация которого в промывных водах в начальный период исследования увеличивалась. Рост содержания отмечен до 6-го срока эксперимента. В этом интервале его концентрация менялась от 635 до 820 мг/л. В водах 9-го промывания она уменьшилась до 43 мг/л и далее до конца эксперимента варьировала от 17 до 85 мг/л. Полного удаления водорастворимого кальция в опыте в результате многократного промачивания достичь не удалось. Суммарный объем вымытого кальция составил 698 мг, что в 8.8 раза меньше, чем натрия.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания Са в промывных водах имеет вид:

$$y_{2,1} = 672.35 - 35.2t,$$
 (2.1)

где t — сроки (условное время).

Средняя скорость динамики содержания Са во всем временном промежутке наблюдений: $v_2 = -35.2 \text{ мг/л}.$

Эмпирическая модель (2.1) статистически значима на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F = 42.6 при критической величине F(0.9999, 1.22) = 22.4) коэффициент детерминации $R^2 = 0.65$. График модели (2.1) приведен на рис. 2.

Эмпирическая модель динамики содержания Са на основе многочлена 4-й степени представляет собой уравнение:

$$y_{2.2} = \exp(5.49 + 0.94t - 0.2t^{2} + 0.012t^{3} - 0.0002t^{4}),$$
(2.2)

где t — сроки (условное время).

Эмпирическая модель (2.2) статистически значима на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F = 68.29 при критической величине F(0.9999, 4.19) = 10.75). Коэффициент детерминации $R^2 = 0.93$. График модели (2.2) приведен на рис. 2.

В почве, выбранной для исследования, валовое содержание MgO в 3.8 раза меньше содержания CaO. Магний — это катион, преимуществен-

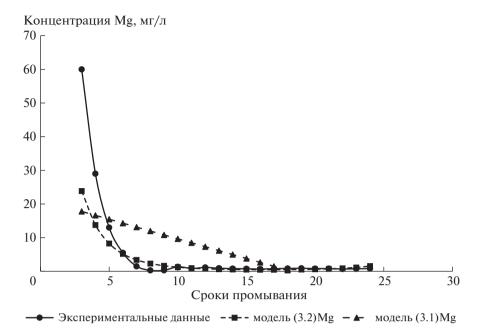


Рис. 3. Эмпирические модели динамики концентрации Мg в промывных водах.

но октаэдрического слоя, поэтому он трудно вытесняется из решетки минералов в сравнении с кальцием, который является поглощенным внутрислойным катионом. На путях миграции магния возникают 3 основных геохимических барьера:

- 1 биогеохимический (поглощение живым веществом);
- 2 силикатный (образование вторичных силикатов);
- 3 сорбционный (поглощение коллоидами глин и гумуса) [24].

Способность к миграции магния под действием просачивающейся влаги уступает кальцию. Для кальция не выражен силикатный барьер и слабо проявляется сорбционный.

Исследование показало, что характер миграции магния в почве близок к характеру миграции натрия и существенно отличается от кальция. Большая часть водорастворимого магния была удалена из почвы за 3 первых промывания. Уже в фильтрате 2-го промывания установлено резкое уменьшение (с 460 до 105 мг/л) его концентрации. В фильтратах с 13-го по 24-е промывание изменения содержания были незначительными и укладывались в диапазон 0.92—0.68 мг/л. Полного удаления этого элемента в результате многократного промывания достичь не удалось. Суммарный объем вымытого магния составил 85.9 мг. Это в 13.6 раза меньше, чем количество вымытого кальция.

Ввиду крайне сильного и резкого уменьшения содержания Mg за первый и второй условные сроки (содержание Mg уменьшилось за первые 2 промывания более чем в 7 раз) эмпирические модели содержания Mg строили для условных сроков t = 3, 4, ..., 24, т.е. для условных сроков t > 2.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания Mg в промывных водах имеет вид:

$$y_{3,1} = 21.3 - 1.16t,$$
 (3.1)

где t — сроки (условное время t > 2).

Средняя скорость динамики вымывания Mg для условных сроков $t = 3, 4 \dots 24; v_3 = -1.16$ мг/л.

Эмпирическая модель (3.1) статистически значима на высоком уровне значимости 1% (статистика F принимает величину F=8.667 при критической величине F(0.99, 1.20)=8.095). Коэффициент детерминации $R^2=0.3$. График модели (3.1) приведен на рис. 3.

Эмпирическую модель динамики содержания Mg строили на основе многочлена 2-й степени и экспоненты:

$$y_{3.2} = \exp(5.08 - 0.7t + 0.021t^2),$$
 (3.2)

где t — сроки (условное время t > 2).

В начале данные динамики содержания Mg логарифмировали и строили эмпирическую модель на основе многочлена 2-й степени, которая оказалась статистически значимой на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F=22.86 при критической величине

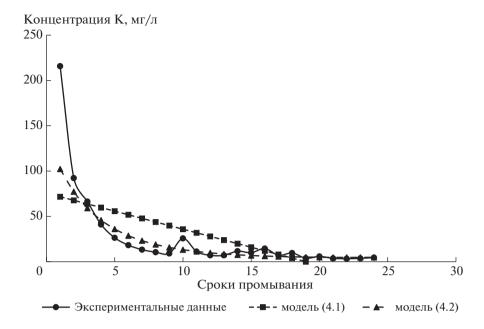


Рис. 4. Эмпирические модели динамики концентрации К в промывных водах.

F(0.9999, 2.19) = 15.5). Коэффициент детерминании $R^2 = 0.7$.

Далее, для построения эмпирической модели (3.2) динамики содержания Mg использовали экспоненту. График модели (3.2) приведен на рис. 3.

Валовое содержание K_2O в изученной почве составляло 1.8%. Миграционная способность калия заметно уступала подвижности натрия и кальция. Катион калия энергично поглощается отрицательно заряженными коллоидами и прочно удерживается в адсорбируемом состоянии. Кроме того, калий входит в состав минерального скелета и в такой форме недоступен для вымывания.

Наиболее обогащенным калием оказались элюаты первого промывания (216 мг/л). В водах 2-го промачивания его концентрация уменьшилась до 92.3 мг/л. В процессе проведения эксперимента содержание калия в элюатах снижалось и к концу проведения опыта составляло 4.57 мг/л. Суммарный объем вымытого калия за весь период наблюдения составил 77.8 мг, что близко к количеству выщелачиваемого магния и в 79.5 и 8.97 раза меньше, чем объемы вымытого натрия и кальция соответственно.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания K в промывных водах имеет вид:

$$y_{4.1} = 75.69 - 3.98t, (4.1)$$

где t — сроки (условное время).

Средняя скорость динамики содержания K во всем временном промежутке наблюдений: $v_4 = -3.98 \text{ мг/л}$.

Эмпирическая модель (4.1) статистически значима на высоком уровне значимости 0.2% (статистика F принимает величину F=13.4 при критической величине F(0.998, 1.22)=12.28). Коэффициент детерминации $R^2=0.37$. График модели (4.1) приведен на рис. 4.

Эмпирическую модель динамики содержания K строили на основе многочлена 2-й степени и экспоненты:

$$y_{4.2} = \exp(4.9 - 0.3t + 0.007t^2),$$
 (4.2)

где t — сроки (условное время).

В начале данные динамики содержания К логарифмировали и строили эмпирическую модель на основе многочлена 2-й степени, которая оказалась статистически значимой на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F=55.2 при критической величине F(0.9999, 2.21)=14.7). Коэффициент детерминации $R^2=0.84$.

Далее для построения эмпирической модели (4.2) динамики содержания калия использовали экспоненту. График модели (4.2) приведен на рис. 4.

Известно, что подвижность почвенного железа наиболее значительна в кислом интервале рН. Выбранная для исследования почва характеризовалась слабощелочной реакцией. Величина рН просачивающихся вод во всем временном промежутке изучения менялась незначительно, оставаясь в щелочном интервале 8.0—8.2 ед. рН. Именно этим следует объяснять то обстоятельство, что ни в одной из порций фильтрата не удалось установить наличие мигрирующего железа.

Накопление в почвах фтора происходит в результате оседания на них летучих выбросов предприятий химической и металлургической промышленности [31—33]. До 96% всех выбросов составляет фтористый водород. Существенным фактором, способствующим повышению содержания фтора в почвах сельскохозяйственного использования, является применение фторсодержащих удобрений и мелиорантов [31, 34, 35].

Фтор — активный металлоид, образующий со всеми элементами соединения различной растворимости. В результате происходит закрепление фтора почвенными компонентами. Весь фтор, содержащийся в почвах, можно разделить на следующие формы:

- силикатный, входящий в состав глинистых минералов;
 - труднорастворимые аморфные соединения;
 - водорастворимые минеральные соединения;
- органические и органо-минеральные соединения [36].

Тип почвы, ее гранулометрический состав, величина рН и концентрация фтора оказывают влияние на прочность фиксации этого элемента. В опыте [37] до 95% от внесенного количества фтора закреплялось тяжелым суглинком. Взаимодействие фтор-иона с глинистыми минералами проходит как прямое замещение фтор-ионов на легкодоступные ОН-ионы внешних слоев минерала и как обмен в результате диффузии в кристаллическую решетку. Во втором случае прочность связи возрастает. Максимальную адсорбцию элемента отмечают в интервале рН 5.5-5.6. За пределами этого диапазона поглощение фтора ослабевает, особенно в щелочном интервале [38]. Вследствие невысокого содержания глинистых частиц и щелочной реакции выбранной для исследования почвы, по всей вероятности, удельный вес такого закрепления не велик.

Кальций способен осаждать фтор в составе труднорастворимого соединения CaF_2 . В модельном опыте [39] поглощение фторидов суспензией $CaCO_3$ начиналось при концентрации фтора в растворе 4×10^{-4} моль/л. Существенно значимые количества фтора поглощались кальцитом при концентрации фтора $>10^{-3}$ моль/л. В данном случае имела место хемосорбция. Происходил обмен

фтора на CO_3^{-2} с образованием CaF_2 . В том же опыте закрепление фтора глинистыми минералами, гидроокисью железа при щелочном рН снижалось. При снижении рН < 6.5 установлено увеличение поглощения фтора гумусовыми кислотами.

Роль кальция в закреплении фтор-иона в изученной почве в форме флюорита скорее всего была значительной. Однако само по себе образование флюорита уменьшало, но не могло до конца предохранить грунтовые воды от загрязнения, т.к. растворимость фтора в воде (2—8 мг/л) больше ПДК [40].

Результаты изучения миграции фтора свидетельствовали о значительной его подвижности в лугово-сероземной почве. В фильтрате первого промывания его концентрация составила 3.9 мг/л и к концу эксперимента снизилась до 0.3 мг/л. За 24 промывания полного удаления водорастворимого фтора не произошло. Лишь к 15-му промыванию концентрация фтора снизилась до величины, меньшей ПДК, установленной для 3-го климатического пояса (1.2 мг/л). Вероятно, в почвах существует динамическое равновесие между различными формами фтора.

Относительно плавное и постепенное снижение концентрации фтора в промывных водах дало возможность для адекватного описания процесса использовать многочлен 2-й степени.

Линейная эмпирическая модель динамики содержания фтора в промывных водах имеет вид:

$$y_{5.1} = 4.07 - 0.176t,$$
 (5.1)

где t — сроки (условное время).

Средняя скорость динамики содержания фтора во всем временном промежутке наблюдений: $v_5 = -0.176 \text{ мг/л}.$

Эмпирическая модель (5.1) статистически значима на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F = 179.8 при критической величине F(0.9999, 1.22) = 22.4). Коэффициент детерминации $R^2 = 0.89$. График модели (5.1) приведен на рис. 5.

Эмпирическая модель динамики содержания фтора на основе многочлена 2-й степени:

$$y_{5.2} = 4.6 - 0.3t + 0.005t^2,$$
 (5.2)

где t — сроки (условное время).

Эмпирическая модель (5.2) статистически значима на высоком уровне значимости 0.01% (статистика F принимает величину F=119 при критической величине F(0.9999, 2.21)=14.7). Коэффициент детерминации $R^2=0.918$. График модели (5.2) приведен на рис. 5.

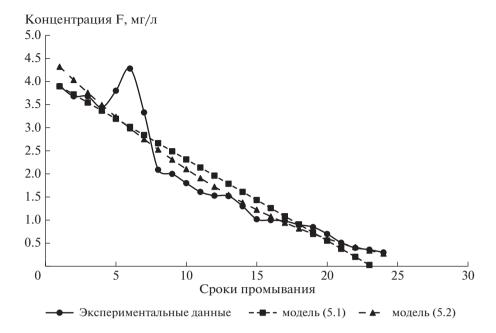


Рис. 5. Эмпирические модели динамики концентрации F в промывных водах.

В литературе имеются указания о влиянии гидрохимических факторов на вымывание фтора из почв. В работе [41] утверждали, что причину обогащения вод фтором следует искать не только в наличие в породах фторсодержащих минералов, но и в химическом составе вод. Например, в исследовании [42] установлена связь количества фтора в водах от соотношения солей натрия и кальция. В работе [43] показано, что в лабораторном опыте с фтором из почв вымывалось 20—40% содержащихся в них калия и натрия, но оставался кальций.

Высокая миграционная способность фториона дает основание предположить, что привнесенные фториды вступают в соединения, в той или иной степени подверженные растворению. Способность фтор-содержащих минералов (соединений) разрушаться под действием высокоминерализованных щелочных вод установлена в работе [44].

Для выяснения этого вопроса проведен корреляционный анализ статистических связей между переходящими в фильтрат химическими элементами. Коэффициенты корреляции вычисляли попарно между содержаниями фтора и кальция, а также калия, натрия и магния. Расчеты показали, что между содержаниями фтора и кальция существует сильная положительная связь: r=0.95. Корреляционная связь между содержаниями фтора и натриа, фтора и магния была слабой (r=0.36 и 0.45 соответственно). Связь между содержаниями фтора и калия — средняя положитель-

ная (r = 0.59). Все коэффициенты парной корреляции оказались положительными, что свидетельствовало о близком характере динамики показателей, соединенных в пары и согласованности рядов наблюдений. Можно предположить, что под действием просачивающейся влаги в первую очередь разрушаются соединения фтора с кальцием и калием и в меньшей степени — с натрием и магнием.

Построенные нелинейные эмпирические модели (1.2), (2.2), (3.2), (4.2), (5.2) позволили сделать вывод о том, что все проведенные эксперименты можно разбить на 3 группы:

в первую группу входит вариант с фтором. В этом варианте динамика изученного показателя имеет наиболее плавный и медленный характер среди всех остальных вариантов. Для адекватного описания динамики фтора достаточно использовать многочлен 2-й степени (модель (5.2));

во 2-ю группу входят варианты опыта с К и Са. В этих вариантах динамика изученных показателей имеет более резкий и быстрый характер. Для адекватного описания динамики недостаточно использовать алгебраические многочлены. Характер динамики изученных показателей таков, что необходимо использовать экспоненциальные зависимости (модели 4.2 и 2.2);

в 3-ю группу входят варианты с Na и Mg. В этих вариантах изученные показатели меняются наиболее резко и быстро. За 2 первых срока происходит значительное снижение изученных

показателей. Для того, чтобы описать динамику во всем промежутке времени изучения, даже экспоненциальных зависимостей оказывается недостаточно. В связи с этим, построение эмпирических моделей приходится начинать с 3-го срока. При этом последующие изменения происходят также быстро. Это все же приводит к необходимости использовать экспоненциальные зависимости.

Древнеорошаемые почвы Средней Азии составляют основу "Золотого фонда" земель орошаемой зоны. Известно, что несмотря на невысокое содержание гумуса эти почвы имеют водопрочную микроструктуру, отличаются высокой буферностью, обладают слабощелочной или близко к нейтральной величиной рН. Им свойственна высокая биологическая активность [45]. В связи с этим возникает вопрос: как при таких масштабах миграции питательных веществ при орошении на протяжении более чем тысячелетнего срока ведения сельскохозяйственного производства этим почвам удается сохранить высокий уровень плодородия? Из литературы известна высокая способность N-NO3 и серы к перемещению в профиле с поливной влагой [46, 47]. При этом потери азота настолько значительны, что приводят к снижению урожая сельскохозяйственных культур и загрязнению источников водоснабжения [48].

Основной причиной высокого плодородия почв данного генезиса является систематический привнос с поливной влагой взвешенных наносов, водорастворимых питательных веществ и гумуса [49, 50]. По данным [49], ежегодно на поля в составе взвешенных наносов поступает (кг/га): Са- $CO_3 - 2350$, $K_2O - 485$, $P_2O_5 - 45$, гумуса - 190 кг/га.

Таким образом, в орошаемых почвах проходят 2 противоположно направленных процесса: постоянный привнос на поверхность почвы питательных элементов и гумуса с поливной влагой и их выщелачивание в процессе орошения. В случае с техногенно-загрязненными почвами систематическое орошение не дает накапливаться в профиле значительного количества загрязняющих веществ [51]. Следовательно, поступающие с поливной влагой питательные элементы и гумус позволяют поддерживать высокий уровень плодородия орошаемых почв Средней Азии.

Кроме того, это также обусловлено более молодым возрастом древнеорошаемых почв. Их минеральная основа менее выветрена по сравнению с минеральной основой других типов почв пустынной зоны [52]. Последнее обстоятельство определяет повышенное содержание в них потен-

циальных резервов калия, фосфора, железа, микроэлементов.

выводы

- 1. При орошении лугово-сероземной супесчаной почвы в миграционные потоки вовлекаются большие количества щелочных и щелочноземельных металлов. По способности к выщелачиванию их можно выстроить в следующий по убыванию ряд: Na > Ca > Mg > K. Средняя скорость вымывания для Са и К во всем временном промежутке изучения составляла соответственно: v = -35.2 и -3.98 мг/л; средняя скорость вымывания Na и Mg, начиная с 3-го по 24-й сроки составляла: v = -16.1 и -1.16 мг/л соответственно.
- 2. В результате многократного промывания почвы ни для одного из изученных катионов не удалось достичь полного удаления водорастворимых форм изученных элементов. Запас подвижных катионов оказался весьма значителен. Миграции железа не установлено.
- 3. Потери фтора с промывной влагой также были весьма значительными. Средняя скорость потерь составляла: v = -0.176 мг/л. Выявлена различной силы корреляционная связь между содержаниями фтора и натрия, кальция, калия и магния, содержавшихся в фильтратах.
- 4. Представлены эмпирические модели, адекватно описывающие процессы миграции щелочных, щелочноземельных металлов и фтора из лугово-сероземной почвы при промачивании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Самойлова Е.Н.* Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во МГУ, 1981. 284 с.
- 2. Скрынникова И.Н. Почвенные растворы южной части лесной зоны и их роль в современных процессах почвообразования // Современные почвенные процессы в лесной зоне Европейской части СССР. М., 1959. С. 50–169.
- 3. *Быстрицкая Т.Л., Волкова В.В., Снакин В.В.* Почвенные растворы черноземов и серых лесных почв. М.: Наука, 1981. 148 с.
- 4. *Сеньков А.А.* Гологенез степных почв (на примере Ишинской равнины). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 152 с.
- 5. *Синкевич З.А.* Современные процессы в черноземах Молдавии. Кишинев, 1989. 214 с.
- Шоба В.Н., Сеньков А.А. Равновесный состав и свойства растворов почв // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1168—1177.
- 7. *Кауричев И.С., Иванова Т.Н., Ноздрунова Е.М.* О содержании низкомолекулярных органических кислот в составе водорастворимого органического вещества // Почвоведение. 1963. № 3. С. 27—35.

- 8. *Суворов А.К.* Миграция веществ в целинной и пахотной дерново-подзолистых суглинистых почвах: Дис. ... канд. с.-х. наук. Л.—Пушкин, 1971. 145 с.
- 9. *Чернов Д.В.* Миграция водорастворимых веществ в дерново-подзолистых суглинистых пахотных почвах: Дис. ...канд. с.-х. наук. Л.— Пушкин, 1985. 163 с.
- 10. *Копцик Г.Н., Лукина Н.В., Смирнова И.Е.* Влияние атмосферного промышленного загрязнения на состав почвенных растворов подзолов // Почвоведение. 2007. № 2. С. 223—234.
- 11. Лаврентьева Г.В., Круглов С.В., Анисимов В.С. Динамика катионного состава почвенного раствора известкованной дерново-подзолистой почвы при загрязнении Со и Сd и изменении рН // Почвоведение. 2008. № 9. С. 1092—1100.
- 12. *Лактаев Т.Н.* Полив хлопчатника. М.: Колос, 1978. 177 с.
- Тахтамышев Г.Н. О расчете фактической нормы воды при поливах по бороздам // Научн. тр. СамаркандСХИ. Т. XXII. Сер. агрохим. Самарканд, 1971. С. 94–97.
- 14. *Роде А.А*. Водный режим и его типы // Почвоведение. 1956. № 4. С. 1—15.
- 15. *Ковда В.А.* Происхождение и режим засоленных почв. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1946. Т. 1. 573 с.
- 16. *Минашина Н.Г., Шишов Л.Л., Гаврилова Г.К.* Гажевые солончаки, почвенные растворы, генезис // Почвоведение. 2004. № 5. С. 18-26.
- 17. *Молодцов В.А.* Изменение состава поглощенных оснований при промывках солончаком в монолитах // Почвы крупнейших ирригационно-мелиоративных систем в хлопкосеющей зоне. М., 1975. С. 161–166.
- Минашина Н.Г. Зависимость содержания и состава солей в почвенном растворе от влажности гипсоносной почвы // Почвоведение. 2005. № 7. С. 815— 824.
- Минашина Н.Г. Токсичные соли в почвенном растворе, их расчет и классификация почв по степени засоленности // Почвоведение. 1970. № 8. С. 92–106
- 20. Зимовец Б.А. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М., 1991. 249 с.
- Шавригин М.И. Солевой режим почв и состав почвенных растворов центральной части Барабы // Тр. Почв. ин-та АН. 1954. Т. 42. С. 104—171.
- 22. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 280 с.
- Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
- 24. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2004. 1027 с.
- Яковлева Л.В. Миграция оснований в дерновоподзолистых почвах Северо-Запада России. СПб., 2012. 106 с.
- 26. *Литвинович А.В., Небольсина З.П.* Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79—94.

- 27. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Интенсивность миграции кальция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной различными дозами мелиоранта (по данным модельного опыта) // Агрохимия. 2015. № 6. С. 84—89.
- 28. Шильников И.А., Аканова Н.И., Маренкова М.Г., Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А. Потери обменных катионов и подкисление почв при длительном применении удобрений // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М., 2013. Т. 2. С. 351—386.
- 29. *Бакина Л.Г.* Роль фракций гумусовых веществ в почвенно-экологических процессах: Дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2012. 399 с.
- 30. Горбунов Н.И., Юдина Л.Н., Зарубина Т.Г. Скорость нейтрализации кислот известью // Почвоведение. 1981. № 1. С. 150—156.
- 31. *Литвинович А.В.*, *Павлова О.Ю*. Фтор в системе почва—растение при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // Агрохимия. 2002. № 2. С. 66—76.
- 32. Weinstein L.H., Davison A. Fluorides in the environment. UK, 2004. 287 p.
- 33. Singh S.P., Tripathi S.K., Kumar V., Raha P. Monitoring of groundwater quality with respect to fluoride contamination around Hindalco industries LTD. Renukut, Sonbhadra district, Uttar Pradesh, India // Nat. Environ. Pollut. Technol. 2016. V. 15(2). P. 579—582.
- 34. *Gautam R., Bhardwaj N., Saini Y.* Fluoride accumulation by vegetable and crops grown in Nawa Tehsil of Nagaur district (Rajasthan, India) // J. Phytol. 2010. V. 2(2). P. 80–85.
- 35. Anshumali B.K., Bredman G. Fluoride in agricultural soil: a Review on its sources and toxicity to plants. global sustainability transitions: Impacts and innovations // Biohemie und Physiologie des Fluors. 2014. V. 3. P. 29–37.
- 36. Васяев Г.В., Шевченко А.С. Действие фторсодержащих удобрений на урожай растений и агрохимические свойства почвы // Записки ЛСХИ. 1974. Т. 218. С. 45—49.
- 37. *Pickering W.* The mobility of soluble tlucride in soils // Environ. Pollut. Ser. B. 1985. V. 9. № 4. P. 281–308.
- 38. *Romo L.A.*, *Roy R*. Studies of the substitution of OH[−] by F[−] in relation to profile olevelopment in Illionis // Soil. Sci. Soc. Amer. J. 1980. V. 44. № 2. P. 44–55.
- 39. Farrah H., Slavek J., Pickering W.F. Fluoride sorption by soil components: Calcium carbonate, humus acid manganese dioxibe silica // Austral. J. Soil Res. 1985. V. 23. № 3. P. 429–439.
- 40. *Дубровина И.В., Корнблюм Э.А.* Природа поглощения почвами фтора удобрений и мелиорантов // Почвоведение. 1984. № 9. С. 23—34.
- 41. *Посохов Е.В.* По поводу статьи А.А. Алексеева "Фтор в акротермах" // Геохимия. 1957. № 4. С. 346—347.

- 42. *Стрижова Г.П., Лисник Г.С., Крейдман Ж.Е.* Исследование и использование почв Молдавии. Кишинев: Штиинца, 1977. 185 с.
- 43. *Илькун Г.Н., Мотрук В.В.* Накопление и передвижение фтористых соединений в почвах // Растения и промышленная среда. Мат-лы III научн. конф. Киев, 1976. С. 52—55.
- 44. *Понкратова Г.П.* Фтористый натрий. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1983. 87 с.
- 45. *Розанов А.Н.* Сероземы Средней Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 547 с.
- Гаврилова Г.К., Парватов Е.Н. Динамика нитратов в почвах и грунтовых водах Ферганской опытной станции // Тр. СамаркандСХИ. 1978. Т. XXIV. C. 25–28.
- 47. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Осипов А.И. Содержание и запасы серы в техногенно-загрязненных почвах // Агрохимия. 1998. № 12. С. 64—70.

- 48. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Смирнов И.П., Сулейманов Т.И., Бойкова В.Н. Нитраты в источниках водоснабжения // Химизация сел. хоз-ва. 1992. № 1. С. 16—17.
- 49. *Молодцов В.А.* Ирригационные наносы оазисов долины р. Зеравшан и дельты р. Мургаб // Влияние орошения на почвы оазисов Средней Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 44—55.
- 50. *Лагунова Е.П.* Особенности гумусообразования в староорошаемых почвах Самаркандского оазиса // Почвоведение. 1959. № 2. С. 24—31.
- 51. *Литвинович А.В.* Процессы деградации хорошо окультуренных почв гумидных и аридных регионов в современных условиях: Дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГАУ, 2005. 280 с.
- 52. *Аранбаев М.П., Гаипова А.Г.* Минералогический и химический состав древне-оазисных почв пустынной зоны. Ашхабад: Ылым, 1980. 100 с.

Losses of Ca, Mg, K, Na, Fe and F from Irrigated Meadow-Gray Soil as a Result of Migration. Empirical Models of the Eluviation Process (According to Laboratory Experience)

A. V. Litvinovich^{a,#}, O. Yu. Pavlova^a, A. V. Lavrishchev^b, and V. M. Bure^{a, c}

^a Agrophysical Research Institute shosse Podbelskogo 7, St. Petersburg—Pushkin 196600, Russia ^b Saint-Petersburg State Agrarian University Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia ^c St. Petersburg State University Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia [#]E-mail: avlavr@rambler.ru

Irrigation of meadow-gray sandy loam soil was accompanied by the involvement of large amounts of alkaline and alkaline-earth metals in migration flows. The stock of mobile cations was very significant. According to their leaching capacity, they can be arranged in the following decreasing series: Na > Ca > Mg > K. the Average leaching rate for Ca and K was: v = -35.2, -3.98 mg/l, for Na and Mg: v = -16.1, -1.16 mg/l, respectively. As a result of repeated washing of the soil, it was not possible to achieve complete removal of water-soluble forms for any of the studied cations. Migration of iron is not established. The loss of fluorine from leaching by moisture was also significant. The average rate of losses during its migration was: v = -0.176 /l. A positive relationship between the content of fluorine and sodium, calcium, potassium and magnesium in filtrates was revealed of different strengths. Empirical models adequately describing the processes of migration of alkaline, alkaline earth metals and fluorine from meadow-gray-earth soil during washing have been developed.

Key words: alkaline and alkaline earth metals, fluorine, soil, irrigation, migration.

УЛК 631.433.3:631.445.12(571.54)

ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ ЛУГОВО-БОЛОТНЫХ ПОЧВ ДЕЛЬТЫ р. СЕЛЕНГИ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2020 г. Е. Ю. Мильхеев

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН 670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия E-mail: evg-milh@rambler.ru
Поступила в редакцию 20.03.2019 г.
После доработки 05.06.2019 г.
Принята к публикации 10.10.2019 г.

Представлены результаты многолетних исследований эмиссии CO_2 в течение вегетационных сезонов 2007-2014 гг. (май—сентябрь) с поверхности лугово-болотных почв дельты р. Селенги бассейна оз. Байкал (Западное Забайкалье). В зависимости от сочетания гидротермического режима почвы и погодных условий исследованные почвы эмитировали 315-402 г C/m^2 . Межгодовая вариабельность суммарных сезонных потоков углекислого газа составила 14%. Определяющую роль в изменениях скорости выделения CO_2 из почвы в течение вегетационного сезона играла температура почвы.

Ключевые слова: диоксид углерода, эмиссия, гидротермический режим, лугово-болотные почвы.

DOI: 10.31857/S000218812001007X

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия углекислого газа (СО2) из почв является одним из главных потоков в глобальном цикле углерода, составляя 58-100 Гт С/год [1]. Этот громадный поток СО2 происходит из почвенного пула углерода, по массе углерода более чем в 2 раза превышающего содержание С-СО2 в атмосфере [2]. По количеству углекислоты, выделяемой с поверхности почвы, можно судить об интенсивности процессов разложения органического вещества, характеризовать биологическую активность почв или продуктивность фитоценоза. Кроме того, выделяющийся с поверхности почвы углекислый газ является чувствительным и информативным показателем функционального состояния экосистемы в целом [3]. Однако, несмотря на огромную роль почвенного дыхания в общепланетарном цикле углерода, оценки суммарных потоков СО2 из почв большинства регионов нашей планеты остаются очень приблизительными. До сих пор слабо изученными в отношении почвенного дыхания остаются районы Дальнего Востока, Восточной Сибири, горные и полупустынные регионы. Отсутствие экспериментальных исследований в этих областях представляет основную трудность и значительно увеличивает неопределенности оценок общего дыхания почв Российской Федерации. В условиях меняющегося климата температура и влажность почвы являются наиболее значимыми экологическими факторами, определяющими

скорость деструкции органического вещества и интенсивность выделения CO_2 из почв. Высокая положительная корреляция между скоростью выделения CO_2 и температурой почвы обнаруживается как в глобальном масштабе [4], так и для почв отдельных экосистем и регионов [5]. В связи с этим изучение влияния гидротермических условий почвы на скорость эмиссии CO_2 приобретает особую актуальность. Исследования по выделению двуокиси углерода почвами Забайкалья практически не проводили, или они имеют фрагментарный характер [6, 7].

Цель работы — оценка сезонной эмиссии CO_2 , которая включает суммарную продукцию CO_2 в результате дыхания корней растений, микроорганизмов и животных с поверхности лугово-болотных почв во временном аспекте в зависимости от экологических факторов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный участок, на котором вели сезонные наблюдения за интенсивностью выделения СО₂ из почвы, располагался в периферической части дельты р. Селенги (52°08′ с.ш., 106°18′ в.д.; лугово-болотная почва). Район исследования относится к дельтовому лугово-болотному и лесостепному району. Большая часть этого района представляет собой приречную равнину р. Селенги, изрезанную многочисленными протоками и старицами.

Аллювиальные лугово-болотные почвы, преобладающие в периферической части современной дельты, занимают старичные понижения островов или приозерные понижения. Луговоболотные почвы формируются под злаково-разнотравно-осоковым сообществом и влиянием почвенно-грунтовых вод. Характерной чертой этих почв является тяжелый гранулометрический состав [8]. Лугово-болотные почвы понижений и депрессий с долгопоемным режимом затопления имеют оторфованный или перегнойный горизонт с творожистой структурой, с глубиной сменяющийся бесструктурным глеевым горизонтом с сизой окраской. Почва характеризуется (гор. ATd) слабокислой реакцией среды (рН_{н.О} 6.5), с суммой поглощенных оснований 30.5 мг-экв/100 г почвы и содержанием органического углерода Сорг 4.2%.

Экосистемы дельты р. Селенги развиваются в условиях континентального климата Восточной Сибири, климатические показатели которого, главным образом для весенне-летнего периода, несколько преобразованы влиянием оз. Байкал. Например, коэффициент континентальности в межгорных впадинах Забайкалья достигает 85—90, а на побережье Байкала снижается до 67—73 [9]. Климат района исследования характеризуется большими амплитудами температур воздуха в течение суток и года. Средняя годовая температура воздуха равна —1°С. Грунты промерзают на глубину 1.5—3.5 м. Среднегодовое количество осадков, составляющее 412 мм, распределяется по месяцам в течение года неравномерно.

Измерение эмиссии углекислого газа с поверхности почвы проводили в течение вегетационных сезонов 2007-2014 гг. (с мая по сентябрь включительно, 3 раза в месяц) на постоянных мониторинговых площадках абсорбционным методом в модификации Шаркова [10]: использовали полипропиленовые сосуды (d = 10 см, h = 15 см) с крышками. Сосуд-изолятор врезали в почву на глубину 5 см. В месте врезания сосуда-изолятора надземную часть растений срезали на уровне почвы. Внутри ставили чашечку (d = 5 см) с 10 мл 1 н. NaOH. Сосуд плотно закрывали крышкой на 24 ч. после чего извлекали чашку и на месте титровали раствор 0.2 н. НСІ по фенолфталеину. Выделенное почвой за экспозицию количество СО, рассчитывали с учетом холостого титрования (щелочь на период экспозиции помещали в сосуд без почвы объемом, равным объему свободного пространства в рабочем сосуде). Суммарные выделения СО2 за вегетационный сезон рассчитывали путем линейного интерполирования. Измерения скорости выделения СО2 из почв проводили с интервалом 7-10 сут, в трехкратной повторности. Параллельно с определением эмиссии СО₂ измеряли температуру

и влажность верхнего слоя почвы (0—5 см). Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что эмиссия углекислого газа почвами неодинакова в различные периоды вегетации и в зависимости от сочетания погодных условий, физиологического состояния растений и микробных сообществ имеет ярко выраженную динамику [11].

Своеобразие почвенных и климатических условий Западного Забайкалья влияет на сезонную продолжительность, характер тренда и общую эмиссию CO_2 в исследованных экосистемах. Результаты наших многолетних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO_2 из лугово-болотных почв свидетельствовали о том, что величина эмиссии углекислого газа из почвы отличалась неравномерностью как в течение вегетационного сезона, так и по годам наблюдений. Динамику эмиссионных потерь диоксида углерода определяли главным образом особенности температурно-влажностного режима почвы, и она имела, как правило, "пилообразный" вид, с максимальными показателями в летние месяцы или смещенными на начало или конец вегетации растений с минимумом в засушливый период (рис. 1). Несмотря на различия в режимах температуры и увлажнения в отдельные годы, сравнительную высокую влажность наблюдали, как правило, в начале и в конце вегетации (рис. 2).

Мониторинг эмиссии СО₂ свидетельствовал, что во все годы наблюдений начало вегетационного периода характеризовалось низкими показателями дыхания: минимальный поток СО2 был зафиксирован в 2012 г. и составил 3 г/ м^2 / сут, максимальный — в $2010 \, \text{г.} - 5 \, \text{г/м}^2 / \text{сут.}$ Этому периоду измерений была свойственна низкая температура почв $(2-4^{\circ}C)$, что обусловлено глубоким промерзанием и медленным весенним прогреванием почвы, а также избытком влаги в почве, накопленной в предшествующий холодный период года. В таких условиях углекислый газ также мог сорбироваться в почве [12]. Определенный вклад в эмиссию СО₂ в исследованных почвах вносила, вероятно, его диффузия из нижних слоев почвы. Известно, что оттаивание мерзлотного горизонта может способствовать высвобождению двуокиси углерода, окклюдированного в кристаллах льда [13].

С повышением температуры в течение вегетации и прогреванием верхних слоев почвы (1-2 декада июня) эмиссия CO_2 постепенно повышалась вследствие усиления активности микроорганизмов и растений, а также отчасти за счет десорбции, достигая в отдельные годы $25 \text{ г/M}^2/\text{сут}$ (2008 г.).

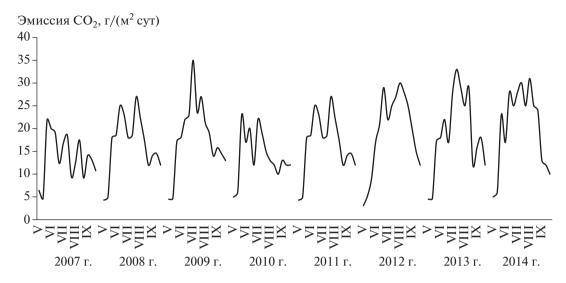


Рис. 1. Сезонная динамика эмиссии CO_2 из лугово-болотных почв (май—сентябрь) (2007—2014 гг.).

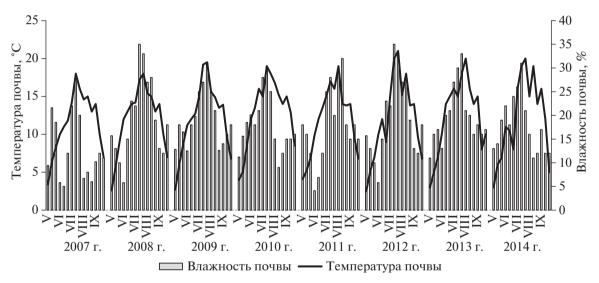


Рис. 2. Влажность и температура лугово-болотных почв (2007—2014 гг.).

Дальнейшее увеличение интенсивности выделения ${\rm CO_2}$ из почв совпадало с выпадением осадков и быстрым прогреванием почвы до $18-20^{\circ}{\rm C}$.

Своих наибольших абсолютных значений эмиссия диоксида углерода в зависимости от года исследований достигает с середины июля до середины августа, достигая в среднем 18—25 г/м²/сут. Максимумы эмиссии СО₂, как правило, отмечали после выпадения осадков. Повышение ее скорости в этих условиях было связано с активностью процессов минерализации растительных остатков и почвенного органического вещества. В этот период складывались наиболее благоприятные погодные условия для функционирования микробных сообществ и имел место активный дыхательный процесс корневых систем высших расте-

ний. Известно, что дыхание корней возрастает пропорционально нарастанию биомассы и максимума достигает в фазе цветения. В целом вклад дыхания корней может составлять от 6 до 80% от эмиссии CO_2 из почвы [14]. Именно в этом периоде были зарегистрированы самые высокие среднемноголетние суммы осадков и самая высокая температура воздуха. Вследствие этого наблюдали всплеск эмиссии углекислоты, который достигал иногда весьма значительных величин до $30 \ \Gamma/M^2/\text{сут}$.

Во второй половине августа в условиях неустойчивого увлажнения и постепенного понижения температуры почв выделение ${\rm CO}_2$ становилось неравномерным, что проявлялось в "пульсирующем" характере, чередовании его резких

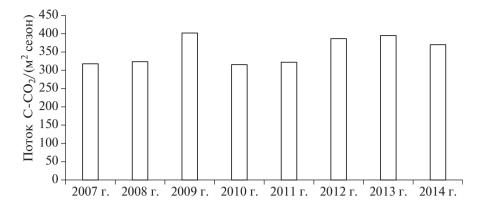


Рис. 3. Суммарные потоки углерода в виде углекислоты с поверхности лугово-болотных почв за вегетационный сезон (2007—2014 гг.).

подъемов и спадов. Подъемы и спады интенсивности дыхания почвы обусловлены усилением или ослаблением микробиологической активности, которая, в свою очередь, зависит от гидротермических условий и поступления в почву растительного опада.

Резкие изменения температуры и влажности почв, свойственные континентальному климату, определяют высокую вариабельность эмиссии углекислоты. Обычно поток СО₂ из почв возрастает при чередовании увлажнения и высушивания [15]. Увлажнение почв после засухи, увеличивая подвижность и доступность для микроорганизмов биофильных элементов, способствует выходу гидролитической микрофлоры из латентного состояния [16]. Чем продолжительнее и при более высокой температуре происходит иссушение почвы, тем интенсивнее минерализуются органические вещества после ее увлажнения [15].

Вместе с тем в исследованных почвах не наблюдали заметного усиления минерализации органического вещества после увлажнения. В наших исследованиях положительную связь между влажностью почв и эмиссией углекислого газа отмечали только в середине вегетации. В целом достоверной зависимости между выделением CO_2 и влажностью почвы не выявлено, коэффициент линейной корреляции составил r=0.37. Вероятно, в начале и в конце вегетационного периода выделение диоксида углерода из почв лимитировалось пониженной температурой почвы. Влияние влажности почвы на эмиссию CO_2 из почвы неоднозначно, и проследить его сложнее из-за сравнительно небольших изменений этого параметра.

Обращает на себя внимание довольно высокий коэффициент корреляции между интенсивностью дыхания и температурой почвы (r = 0.73). В начале вегетационного сезона, когда почва еще недостаточно прогрета, скорость эмиссии углекислоты низка, и только после повышения тем-

пературы атмосферного воздуха происходил подъем кривой дыхания.

В работе [11] отмечали, что связь эмиссии ${\rm CO}_2$ с температурой почвы почти всегда положительная и наиболее тесная в почвах естественных ценозов северо- и среднетаежных зон (r=0.54-0.79). Эта связь ослабевает в экосистемах южнотаежной зоны, а также в почвах агроценозов и в почвах под вырубками. Тогда как с влажностью почв эта связь менее тесная, и может быть как положительной, так и отрицательной.

Для оценки вклада экосистемы в поступление CO_2 в атмосферу необходима информация о его суммарной эмиссии из почв за сезон. Изменения температур и нестабильный режим атмосферного увлажнения являются, очевидно, основными экологическими факторами, определяющими варьирование эмиссии не только в течение вегетационного сезона, но и в отдельные годы (рис. 3). Общая за вегетацию эмиссия CO_2 , в виде углерода (C- CO_2) на лугово-болотной почве в разные годы изменялась от 315 до 402 г C- $CO_2/M^2/ce$ 30н, в среднем за 8 лет составляла 375 г $C/M^2/ce$ 30н. Межгодовая вариабельность суммарных сезонных потоков углекислого газа составила 14%.

Полученные оценки сезонных потоков углекислого газа из почв вполне соответствуют идентичным оценкам, имеющимся в литературе. Согласно [17], средняя удельная скорость продуцирования углекислого газа почвами России в течение вегетационного периода варьирует в пределах 30—610 г С/м²/сезон. Согласно [11], из луговых экосистем бореальных и умеренных зон с углекислым газом в атмосферу выделяется в среднем около 600 г С/м²/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения за интенсивностью эмиссии диоксида углерода почвой показали значительную из-

менчивость процесса дыхания почвы на протяжении вегетационного периода. Эмиссия CO_2 в значительной степени зависела от комплекса погодных и гидротермических условий в определенный год исследования. Отмечен ее минимум в начале вегетации, связанный с воздействием пониженных температур, максимум чаще всего приходился на периоды после выпадения осадков. Пики эмиссии углекислоты совпадали с повышением температуры и влажности почвы: с середины июля до середины августа, далее ход кривой выделения CO_2 из почвы повторял ход кривой температуры.

В условиях дефицита тепла и неустойчивого увлажнения для кривой динамики эмиссии CO_2 характерны чередующиеся подъемы и спады. Достоверных корреляционных связей между сезонными потоками CO_2 с поверхности лугово-болотных почв и влажностью почвы для всего 8-летнего ряда наблюдений найдено не было. Основным фактором, определяющим и контролирующим величины сезонных потоков CO_2 из почв, являлась температура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Quéré C. Le*. Global carbon budget // Earth Syst. Sci. Data. 2016. № 8. P. 605–649.
- 2. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochem. Cycles. 2009. V. 23. gb2023.
- 3. *Кудеяров В.Н.* Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 543—658.
- 4. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994 // Global Change Biol. 2002. V. 8. P. 800–812.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н. Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1045—1059.

- 6. Лаврентьева И.Н., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Оценка запасов органического углерода и потоков СО₂ в травяных экосистемах Западного Забайкалья // Почвоведение. 2017. № 4. С. 411—426.
- 7. *Чимитдоржиева Г.Д., Егорова Р.А., Мильхеев Е.Ю., Цыбенов Ю.Б.* Потоки углерода в степных экосистемах (на примере Южного Забайкалья) // Растит. мир Азиат. России. 2010. № 2. С. 33—39.
- 8. *Корсунов В.М., Гынинова А.Б., Сымпилова Д.П., Балсанова Л.Д., Корсунов А.В.* Разнообразие почв подтайги Селенгинского среднегорья // Почвоведение. 2002. № 5. С. 541–545.
- 9. *Жуков В.М.* Климат Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1960. 188 с.
- Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения СО₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987. № 1. С. 127—133.
- 11. *Курганова И.Н.* Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 50 с.
- 12. *Абросимова Л.Н.* Гистерезис и температурные зависимости процессов газообмена O₂ и CO₂ в почве // Почвоведение. 1979. № 6. С. 86–89.
- Федоров-Давыдов Д.Г., Гиличинский Д.А. Особенности динамики выделения CO₂ из мерзлотных почв // Дыхание почвы. Пущино: НЦБИ РАН, 1993. C. 76—101.
- 14. Благодатский С.А., Ларионова А.А., Евдокимов В.В. Вклад дыхания корней в эмиссию ${\rm CO_2}$ из почвы // Там же. С. 26—32.
- 15. *Шарков И.Н.* Минерализация и баланс органического вещества в почвах агроценозов Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1997. С. 33—59.
- 16. Паников Н.С., Палеева М.В., Дедыш С.Н., Дорофеев А.Г. Кинетические методы определения биомассы и активности различных групп почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1991. № 8. С. 109—120.
- 17. *Кудеяров В.Н., Курганова И.Н.* Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, общие оценки // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1112—1121.

Evaluation of Meadow-Boggy Soil Respiration of the Delta Selenga River (Western Transbaikalia)

E. Yu. Milheev

Institute of General and Experimental Biology SB RAS ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia E-mail: evg-milh@rambler.ru

Result of the investigation of the growing season 2007–2014 (may–september) for carbon dioxide emissions from meadow-boggy soils of the delta Selenga river of lake Baikal basin (Western Transbaikalia) was shown. Depending on the combination of hydrothermal regime of soil and weather conditions investigated soils emit $315-402~{\rm g~C/m^2}$. The interannual variability of the total seasonal carbon dioxide fluxes was 14%. A determining role in the changes of the rate of release of ${\rm CO_2}$ from the soil during the growing season was the temperature of the soil.

Key words: carbon dioxide, emissions, hydrothermal conditions, meadow-boggy soils.

——— Экотоксикология —

УДК 546.42:631.416.13:633.633.2:631.821:631.445.24

БИОВЫНОС 137 Cs И НИТРАТОВ МНОГОЛЕТНИМИ ТРАВАМИ ПРИ ИЗВЕСТКОВАНИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВ

© 2020 г. С. М. Пакшина¹, Л. П. Харкевич¹, Н. М. Белоус¹, Е. В. Смольский^{1,*}

¹ Брянский государственный аграрный университет 243365 Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2a, Россия *E-mail: sev_84@mail.ru
Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

Поступила в редакцию 25.12.2018 г. После доработки 18.03.2019 г. Принята к публикации 10.10.2019 г.

Исследовали влияние карбоната кальция, внесенного в слабокислую дерново-подзолистую песчаную почву в дозе, превышающей необходимую для нейтрализации гидролитической кислотности. Объектом исследования служил травостой, состоящий из *Dactylis glomerata* L., *Poa pratensis* L., *Bromopsis inermis* Holub. Установлено, что природный карбонат кальция, внесенный в слабокислую почву, увеличивал урожайность биомассы, транспирацию, доступность почвенной влаги корневой системе растений. Внесение известкового материала в неудобренную и удобренную полным минеральным удобрением почву увеличивало содержания нитратов и уменьшение удельной активности ¹³⁷Сѕ в сене многолетних трав. Для объяснения обнаруженных явлений была использована математическая модель корневого поглощения ионов, согласно которой адсорбция на корнях растений прямо пропорциональна разности межфазных потенциалов на границах раздела корень—почвенный раствор, почва—раствор, которая существенно меняясь при внесении природного карбоната кальция. Установлено, что основными факторами биовыноса ¹³⁷Сѕ и нитратов из почвы многолетними травами была разность между плотностью зарядов на поверхности корневой системы и почвы, зависящая от внесения природного карбоната кальция, биодоступности почвенной влаги корневой системе растений, числа Пекле, константы ионного обмена ¹³⁷Сѕ на ионы Са²⁺, Mg²⁺, K⁺. Полученные данные открывают возможные пути управления процессами биовыноса ¹³⁷Сѕ и нитратов из почвы продукцией растениеводства.

Ключевые слова: минеральные удобрения, природный карбонат кальция, ¹³⁷Cs, нитраты, математическая модель, адсорбция, константы ионного обмена, число Пекле.

DOI: 10.31857/S0002188120010111

ВВЕЛЕНИЕ

Известкование является методом химической мелиорации кислых почв, который заключается во внесении известковых удобрений, основанный на замене ионов H^+ и Al^{3+} почвы на содержащиеся в удобрениях ионы Ca^{2+} или Mg^{2+} . Дозу внесения карбонатов кальция рассчитывают по величине гидролитической кислотности почвы [1].

Установлено, что природный карбонат кальция, входящий в доломит, известняк, мергель, мел является минералом солевого типа. Заряд поверхности карбоната кальция зависит не только от преимущественной адсорбции или перехода в раствор одного из потенциалопределяющих ионов, но и их гидролиза и кислотно-основного равновесия в растворе. При рН раствора, превышающих изоэлектрическую точку (рН > 8.2-8.4), поверхность карбонатов кальция заряжается отрицательно, при рН < 8.2-8.4- положительно [2].

В работе [3] предложена формула для расчета поверхностного потенциала (ψ_0) коллоидных частиц с зависящим от величины рН зарядом. Формула для расчета ψ_0 имеет следующий вид:

$$\psi_0 = 59(ZPC - pH)$$
, мВ при 25°C, (1)

где *ZPC* – изоэлектрическая величина pH [3].

Для расчета плотности поверхностных зарядов (σ) частиц карбонатов кальция используют следующую формулу:

$$\sigma = \sqrt{C\varepsilon RT/2\pi} \operatorname{sh}(eZ\psi_0/2\kappa T), \qquad (2)$$

где C — количество ионов в 1 см³ раствора, R — газовая постоянная, T — абсолютная температура, °K, ε — диэлектрическая проницаемость, $K\pi^2/Дж \, M$, κ — постоянная Больцмана, Дж/°K, e — заряд электрона, $K\pi$, σ — поверхностная плотность зарядов, $K\pi/M^2$ [4].

Дополнительные данные о свойствах природных карбонатов кальция учитывают при анализе процессов адсорбции Са²⁺ на почвенном поглощающем комплексе (ППК), растворения и осаждения вновь образованного СаСО3 на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция в зависимости от рН почвенного раствора. При величинах рН раствора, меньших изоэлектрической точки, путем адсорбции мицеллами карбоната кальция из раствора удаляются преимущественно ионы CO_3^{2-} , и $CaCO_3$ растворяется. При растворении CaCO₃ в почвенном растворе и ППК увеличивается содержание Ca. При величинах рН раствора, больших изоэлектрической точки, удаляются из раствора ионы Са, которые адсорбируются на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция, достраивая его кристаллическую решетку.

В работе [5] получены линейные обратно пропорциональные зависимости содержания поглощенного кальция в ППК от количества карбонатов кальция в мощном, обыкновенном, южном черноземах, а также в пустынно-песчаной почве при рН, превышающем изоэлектрическую точку. При рН почвенного раствора, превышающем 8.2, с увеличением содержания CaCO₃ уменьшается содержание поглощенного иона Ca²⁺ в почве.

По данным работ [6—11], изменение рН почвы при внесении минеральных удобрений изменяет интенсивность процесса поглощения ¹³⁷Cs из почвы культурами разных видов.

Цель работы — исследование и теоретическое обоснование роли природных карбонатов кальция в биовыносе многолетними травами ¹³⁷Cs и нитратов при величинах рН почвы меньше изоэлектрической точки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в период с 2001 по 2003 г. в Новозыбковском р-не Брянской обл. Почва опытного участка — дерново-подзолистая песчаная на древнеаллювиальных отложениях и имеет следующую агрохимическую характеристику: pH_{KCl} 6.4, гидролитическая кислотность — 0.66 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований — 11.6 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями — 94.6%, содержание гумуса — 1.2% (по Тюрину), содержание подвижного фосфора и обменного калия — соответственно 337 и 62 мг/кг почвы (по Кирсанову). Плотность загрязнения 137 Cs территории исследования в период исследования составляла 526-666 кБк/м².

Объектом исследования служила сеяная травосмесь, состоящая из следующих видов многолетних трав: ежи сборной ($Dactylis\ glomerata\ L.$), мятлика лугового ($Poa\ pratensis\ L.$), костреца безостого ($Bromopsis\ inermis\ Holub.$). В качестве минеральных удобрений использовали N_{aa} , K_x и $P_{cr.}$ Имея высокую степень насыщенности основаниями, почва опытного участка не нуждалась в известковании. Для выяснения роли природного карбоната кальция в биовыносе 137 Cs и нитратов использовали высокую дозу доломитовой муки, с содержанием CaO и MgO соответственно 30 и 25%. Доза внесения доломитовой муки, равная 9 т/га, составила 0.36% от массы почвы в слое $0-20\ cm.$

Схема опыта включала следующие варианты: 1- контроль, 2- CaCO $_3\cdot$ MgCO $_3$, 3- N180P60K100, 4- N180P60K100 + CaCO $_3\cdot$ MgCO $_3$. Площадь делянки 40 m^2 , повторность опыта четырехкратная. Учет урожая проводили вручную.

Агрохимический анализ почвы провели методами, принятыми в агрохимической службе. Величину рН определяли ионометрическим методом (ГОСТ-24483-84), содержание P_2O_5 и K_2O по Кирсанову (ГОСТ-206207-84), содержание гумуса — по Тюрину (Γ OCT-26612-83), сумму поглощенных оснований – по Каппену-Гильковицу (Γ OCT-27034-85), содержание P_2O_5 – по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ-26207-84). Почвенные образцы для определения удельной активности ¹³⁷Cs отбирали в вариантах опыта на глубине пахотного горизонта (0-20 см), растительные пробы – на тех же делянках. Почвенные и растительные образцы отбирали с 2-х несмежных поверхностей. При определении концентрации радиоцезия в растительных и почвенных образцах и тяжелых металлов руководствовались следующими методиками: "Методические указания по определению естественных радионуклидов в почвах и растениях" (1985) "Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства" (1992). Анализы проведены в лаборатории массовых анализов Центра химизации и сельскохозяйственной радиологии "Брянский". Удельную активность ¹³⁷Cs в почвенных и растительных образцах измеряли на универсальном спектрометрическом комплексе "Гамма Плюс" (НПП "Доза" $P\Phi$). Ошибка измерений не превышала 10%.

Макроэлементный химический анализ фитомассы трав выполнен во Всероссийском научноисследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) на спектрометре Elan-6100 [11]. Необходимые метеорологические и фитоклиматические показатели в периоды вегетации были рассчитаны по данным метеостанции "Красная Гора", наиболее близко расположенной к месту проведения исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены метеорологические и фитоклиматические показатели в периоды вегетации 2001—2003 гг. Показано, что в 2001 и 2003 гг. установились приблизительно одинаковые погодные условия. Период вегетации многолетних трав в 2002 г. характеризовался по сравнению с 2001 и 2003 годами повышенной температурой воздуха, высокой испаряемостью, чрезвычайно низкой величиной коэффициента увлажнения (**КУ**), характерной для зоны черноземов степи, большим дефицитом атмосферной влаги, повышенными показателями радиационного баланса и ФАР. Результаты 2002 г. оказали существенное влияние на средние показатели за годы исследования.

В табл. 2 приведены средние данные урожайности сена многолетних трав, транспирации, коэффициента использования ФАР, транспирационного коэффициента (КТ), биодоступности почвенной влаги в период вегетации в разных вариантах опыта.

Действие природного карбоната кальция на продуктивность многолетних трав сравнивали с контролем и вариантом с внесением полного минерального удобрения. Внесение $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ в удобренную минеральными удобрениями и неудобренную почву повышало все показатели продуктивности многолетних трав, за исключением KT.

Как было доказано в работе [12], дозы и вид минеральных удобрений не влияют на величину КТ, которая зависит от вида растения и почвенно-климатических условий возделывания. Величины КТ показали, что природный карбонат кальция проявлял свойства минерала солевого типа.

Урожайность, транспирация, $K_{\rm фар}$ по сравнению с контролем и вариантом с внесением NPK при добавлении CaCO₃ · MgCO₃ увеличились соответственно на: 6.6 ц/га, 44 мм, 0.24% и 5.2 ц/га, 34 мм, 0.19%.

В табл. 3 представлены данные элементного состава сена многолетних трав. Содержание азота, калия, магния в сене многолетних трав при внесении $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ в удобренную и неудоб-

Таблица 1. Метеорологические и фитоклиматические показатели в период вегетации многолетних трав

	Показатели								
Год	t	P	ΣE_0	Н	KY	$H \Sigma E_0$	Q_{c}	Q_{Φ}	
2001	15.6	73.0	399	293	0.73	-106	984	458	
2002	16.3	63.8	563	185	0.33	-378	1390	646	
2003	15.0	72.4	401	350	0.87	-51	991	461	
Средние	15.6	69.7	454	275	0.64	-179	1120	522	

Таблица 2. Показатели продуктивности фитоценоза

Вариант	Урожай- ность, т/га	$\Sigma_{_{ m B}}E_{_{ m T}},$	<i>К</i> _{фар} , %	KT
Контроль	2.83	185	1.02	654
$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	3.49	229	1.26	656
N180P60K100	6.15	402	2.21	654
N180P60K100 +	6.67	436	2.40	654
$+ CaCO_3 \cdot MgCO_3$				

Примечание. $\Sigma_{\rm B}E_{\rm T}$ — транспирация, $K_{\rm фар}$ — коэффициент использования травами фотосинтетически активной радиации, $\Sigma_{\rm B}E_{\rm T}/\Sigma_{\rm B}E_{\rm O}$ — относительная транспирация, КТ — транспирационный расход воды (т) на формирование 1 т воздушно-сухой фитомассы трав.

Таблица 3. Элементный состав сена многолетних трав

	Содержание, %								
Вариант	фос- фор	азот	калий	каль- ций	маг- ний				
Контроль	0.29	1.62	2.05	0.76	0.40				
$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	0.42	1.50	1.78	0.75	0.31				
N180P60K100	0.43	3.11	2.59	0.51	0.33				
N180P60K100 +	0.36	2.38	2.48	0.71	0.24				
+ CaO ₃ · MgCO ₃									

ренную почву уменьшалось. Исключение составляли кальций и фосфор.

При анализе результатов с внесением природного карбоната кальция в неудобренную и удобренную почву была использована математическая модель адсорбции ионов на поверхности корневой системы растения. Решение модели имеет следующий вид:

$$K_d = \exp[-(\varphi_{\kappa} - \varphi_{\Pi})], \tag{3}$$

Q, МБк/га, A, $q, \kappa B \kappa / \tau, \kappa \Gamma / \tau$ C, NO₃, NO₃ т/га Вариант $\Sigma Em/\Sigma Eo$ Pe Cs-137, мг/кг Бк/кг 137**C**s 137Cs NO_3 NO_3^- Контроль 0.41 0.88 385 684 0.59 1.05 1.09 2.02 CaCO₃ · MgCO₃ 0.86 0.39 1.78 0.5 252 1160 0.89 4.08 N180P60K100 346 0.88 0.75 12230 0.53 1.87 7.52 2.13 $N180P60K100 + CaO_3 \cdot MgCO_3$ 0.96 2.47 2.09 10.77 0.72 312 0.48 16140

Таблица 4. Влияние известкования почвы на биовынос ¹³⁷Сs и нитратов посевами травосмеси многолетних трав

где K_d — отношение концентрации иона на поверхности корней растений к концентрации в почвенном растворе, ϕ_{κ} , ϕ_{π} — межфазные потенциалы на границах раздела корень—почвенный раствор и почва—раствор [13].

При замене межфазных потенциалов на поверхностную плотность зарядов почвы и корней растений формулу (3) приводят к следующему виду:

$$K_d = \exp(-\lambda \Sigma_{\rm B} E_{\rm T}), \tag{4}$$

где λ — параметр биовыноса ионов из почвы корневой системой, $\Sigma_{\rm B} E_m$ — транспирация за период вегетации. Формула λ имеет следующий вид:

$$\lambda = 1.8 \times 10^{3} (\sigma \kappa - \sigma \Pi) Pe \frac{\sqrt{(z_1 + z_2)/2}}{T},$$
 (5)

где σ к, σ п — соответственно поверхностная плотность зарядов корней и почвы, Pe — число Пекле, Z_1 , Z_2 — валентность аниона и катиона соли, T — абсолютная температура среды [14].

В данной работе величину λ находили по экспериментальным данным, используя равенство:

$$\ln K_{\rm ch} = \lambda \Sigma_{\rm B} E_m, \tag{6}$$

где $K_{\rm ch}$ — коэффициент снижения активности цезия-137 в растении (отношение содержания иона в растворе в контроле и в варианте) [15]. Формула (6) выведена при анализе опытных данных биовыноса цезия-137 из почвы разными видами культур [15].

В табл. 4 приведены относительная транспирация посевов в течение вегетации, число Ре, содержание нитратов, удельная активность ¹³⁷Сs фитомассы трав, вынос ¹³⁷Сs и нитратов 1 т транспирационной влаги и суммарный вынос ¹³⁷Сs и нитратов за период вегетации при внесении известкового материала в удобренную и неудобренную почву. Показано, что при внесении природ-

ного карбоната уменьшался биовынос 137 Cs и увеличивалось содержание нитратов в фитомассе трав. Содержание NO_3^- в сене многолетних трав в вариантах, за исключением контроля, превышало МДУ, равное 1000 мг/кг.

Согласно уравнению (5), интенсивность биовыноса ионов зависела от плотности поверхностных зарядов корневой системы и почвы, которая определяла напряженность электростатических полей и интенсивность потока влаги к корневой системе, числа Ре, которое характеризует вклад диффузионного и конвективного переноса ионов в общем потоке раствора. Показано, что внесение известковых материалов в кислом интервале рН вызывало увеличение доступности влаги корневой системе растений и конвективного потока раствора, при котором переносятся ионы в основном за пределом двойного электрического слоя (ДЭС), приводя к уменьшению удельной активности ¹³⁷Сs в фитомассе трав и, наоборот, к существенному увеличению содержания ионов NO_3^- , находящихся вследствие отрицательной адсорбции за пределом ДЭС.

Для выяснения роли карбоната кальция и минеральных удобрений в корневом поглощении 137 Сs и других катионов были рассчитаны константы ионного обмена 137 Сs на катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ . В табл. 5 представлена характеристика адсорбционной способности корневой системы многолетних трав, рассчитанная по формулам (4) и (6). Показано, что адсорбция NO_3^- на корнях растений была очень высока и увеличивалась с внесением $CaCO_3$ в почву. Адсорбция P также была высокой, но снижалась в удобренной почве. Карбонат кальция, внесенный в удобренную и неудобренную почву, снижал адсорбцию 137 Cs, K^+ , Mg^{2+} . Таким образом, закономерности на-

Dominous	K_d							Cs ¹³⁷	Cs ¹³⁷	Cs ¹³⁷	K ^{Ca²⁺}
Вариант	NO_3^-	P	N	¹³⁷ Cs	K	Ca	Mg	$K_{K^+}^{Cs^{137}}$	$K_{Ca^{2+}}^{Cs^{137}}$	$K_{Mg^{2+}}^{Cs^{137}}$	$K_{\mathrm{Mg}^{2+}}^{\mathrm{su}}$
Контроль	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	1.70	1.45	0.92	0.66	0.87	1	0.78	0.76	0.66	0.75	1.28
N180P60K100	1.78	1.49	1.92	0.90	1.27	0.67	0.83	0.71	1.10	0.99	0.81
$N180P60K100 + CaO_3 \cdot MgCO_3$	2.37	1.23	1.47	0.81	1.21	0.93	0.60	0.67	0.84	1.05	1.35

Таблица 5. Характеристика адсорбционной способности корневой системы многолетних трав

копления ¹³⁷Cs и нитратов в надземной фитомассе трав совпадали с корневым поглощением катионов и анионов.

Внесение $CaCO_3$ в почву оказывало большое влияние на процессы ионного обмена на поверхности корней. Показано, что при внесении известкового материала в неудобренную почву доля адсорбированного ¹³⁷Cs была меньше доли адсорбированных ионов K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Величины констант ионного обмена $K_{K^+}^{Cs^{137}}$, $K_{Ca^{2+}}^{Cs^{137}}$, $K_{Mg^{2+}}^{Cs^{137}}$ значили, что эффективная адсорбция ¹³⁷Cs на поверхности корней возможна только при значительном поглощении во внутрь корня ионов K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Поглощение ¹³⁷Cs корнями в наибольшей степени, чем K^+ и Mg^{2+} , задерживал Ca^{2+} .

При внесении известкового материала в удобренную почву поглощение 137 Сs корнями в наибольшей степени задерживал K^+ . Величина $K_{\text{са}^{2+}}^{\text{сs}^{137}}$, равная 1.10, в варианте с полным минеральным удобрением указывала на эффективную адсорбцию 137 Сs и ускоренный перенос его из корней в другие органы растения. Данные, полученные в результате исследования поведения 137 Сs в системе почва—растения (многолетние травы), сопоставимы с данными, полученными на других сельскохозяйственных культурах [16, 17].

Добавление дополнительно к полному минеральному удобрению карбоната кальция изменяло направление процесса ионного обмена, при котором снижалась доступность ¹³⁷Cs и повышалась доступность нитратов посевам трав.

выводы

Анализ результатов экспериментально-полевых опытов по исследованию влияния природного карбоната кальция на биовынос ¹³⁷Сs и нитратов многолетними травами, возделываемых на слабокислой дерново-подзолистой песчаной почве, позволил сделать следующие выводы.

- 1. Природный карбонат кальция, внесенный в ненуждающуюся в известковании почву, вызывал повышение урожайности, транспирации, коэффициента использования ФАР, биодоступности почвенной влаги корневой системе растения.
- 2. Внесение $CaCO_3$ в неудобренную и удобренную полным минеральным удобрением почву вызывало увеличение содержания нитратов, превышающее МДУ (1000 мг/кг), и уменьшение удельной активности ¹³⁷Cs в сене многолетних трав, которая не превышала допустимый уровень (400 KK).
- 3. Природный карбонат кальция, внесенный в почву, уменьшал долю адсорбированного 137 Cs на поверхности корней травосмеси по сравнению с долями K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и снижал доступность 137 Cs.
- 4. Выявлено, что основными факторами биовыноса 137 Сs и нитратов из почвы фитомассой многолетних трав являются разность между плотностью зарядов на поверхности корневой системы и почвы, зависящая от внесения природного карбоната кальция, биодоступность почвенной влаги корневой системе растений, число Пекле, константы ионного обмена 137 Сs на ионы K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} .
- 5. Для получения фитомассы многолетних трав, возделываемых на кислых дерново-подзолистых почвах, с содержанием нитратов и удельной активностью ¹³⁷Сs, не превышающие допустимый уровень, достаточно внесения известковых удобрений в дозе, необходимой для нейтрализации гидролитической кислотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
- 2. Григоров О.Н., Левашова Г.Л. Исследование электрокинетических свойств природных карбонатов кальция методом потенциала течения на открытой поверхности // Электрокинетические явления в дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 6—9.

- 3. Parks G.A., De Bruyh P.L. The zero point of charge of oxides // Y. Phys. Chem. 1962, V.66. P. 967–973.
- 4. *Воюцкий С.С.* Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 512 с.
- Пакшина С.М. Исследование роли природных карбонатов кальция в солонцовом процессе // Докл. PACXH. 2003. № 3. С. 24—26.
- 6. Бельченко С.А., Ториков В.Е., Шаповалов В.Ф., Белоус И.Н. Технологии возделывания кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения и их влияние на содержание тяжелых металлов и цезия-137 // Вестн. Брянск. ГСХА. 2016. № 2. С. 58–67.
- 7. *Коренев В.Б., Воробьева Л.А., Белоус И.Н.* Урожайность кормовых и зерновых культур и накопление ¹³⁷Сs в зависимости от внесения возрастающих доз калийных удобрений // Вестн. Брянск. ГСХА. 2013. № 5. С. 3–6.
- 8. Фесенко С.В., Панов А.В., Алексахин Р.М. Методический подход к обоснованию защитных мероприятий в сельских населенных пунктах в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиац. биол. Радиоэкология. 2001. Т. 41. № 4. С. 415—426.
- 9. Жученко Ю.М. Математическое моделирование потоков радионуклидов из сельскохозяйственных и естественных экосистем с целью радиационной реабилитации загрязненных территорий: Автореф. дис.... д-ра биол. наук. Обнинск, 1998. 40 с.
- 10. Фирсакова С.К. Луговые биогеоценозы как критические радиоэкологические системы и принципы ведения луговодства в условиях радиоактивного загрязнения (на примере Белорусского Полесья

- после аварии на ЧАЭС): Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 1992. 465 с.
- 11. Харкевич Л.П. Эффективность способов обработки почвы и агрохимических приемов при производстве кормов на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодьях юго-запада России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Брянск: БрянскГСХА, 2011. 45 с.
- 12. *Шатилов И.С.* Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях // Научные основы программирования урожаев культур. М.: Колос, 1977. С 53–66.
- 13. *Пакшина С.М.*, *Петухов В.Р.* Влияние двойных электрических слоев поверхности корня и почвенных частиц на доступность питательных элементов растениям // Агрохимия. 1976. № 5. С. 97—102.
- 14. *Железная А.Б.* Формула Волобуева—Пакшиной и их использование. М., 2006. 80 с.
- 15. Пакшина С.М., Белоус Н.М., Силаев А.Л., Смольский Е.В. Количественная оценка биологического выноса ¹³⁷Сѕ из почвы надземной массой мятликовых трав при внесении минеральных удобрений // Радиация и риск. Бюл. нац. радиац.-эпидемиол. регистра. 2017. Т. 26. № 4. С. 99—110.
- 16. *Алексахин Р.М., Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А.* Поведение ¹³⁷Сs в системе почва—растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклида в урожае // Агрохимия. 1992. № 8. С. 127—138.
- 17. *Моисеев И.Т., Агапкина Г.И., Рерих Л.А.* Изучение поведения ¹³⁷Сs в почвах и его поступления в сельскохозяйственные культуры в зависимости от различных факторов // Агрохимия. 1994. № 2. С. 103—118.

Biocarrying Out ¹³⁷Cs and Nitrates Long-Term Herbs at Lime Application of Cespitose and Podsolic Sandy Soils

S. M. Pakshina^a, L. P. Harkevich^a, N. M. Belous^a, and E. V. Smolsky^{a,#}

^a Bryansk State Agricultural University ul. Sovetskaya 2a, Bryansk region, Vygonichsky district, d. Kokino 243365, Russia [#]E-mail: sev 84@mail.ru

Influence of carbonate of the calcium brought in the subacidic cespitose and podsolic sandy soil in the dose exceeding necessary for neutralization of hydrolytic acidity is investigated. As object of probes served the herbage consisting of *Dactylis glomerata* L., *Poa pratensis* L., *Bromopsis inermis* Holub. It is established that the natural carbonate of calcium brought in the subacidic soil causes increase in productivity, transpiration, availability of soil moisture to the root system of plants. Entering of limy material into the soil which is not fertilized and fertilized by full mineral fertilizer causes increase in content of nitrates and reduction of specific activity ¹³⁷Cs in hay of long-term herbs. For explanation of the found phenomena the mathematical model of root absorption of ions according to which adsorption on roots of plants is directly proportional the differences of interphase potentials on limits of the section root – soil solution, the soil – solution which significantly changes at introduction of natural carbonate of calcium has been used. It is revealed that major factors of biocarrying out ¹³⁷Cs and nitrates from the soil long-term herbs is the difference between firmness of charges on surface of root system and the soil depending on introduction of natural carbonate of calcium, bioavailability of soil moisture to the root system of plants, Peclet's parameter, constants of ion exchange ¹³⁷Cs on ions of Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺. The obtained data open possible ways of steering of biocarrying out processes ¹³⁷Cs and nitrates from the soil products of crop production.

Key words: mineral fertilizers, natural carbonate of calcium, ¹³⁷Cs, nitrates, mathematical model, adsorption, constants of ionic exchange, Peclet's number.

——— МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ —

УЛК 631.423.3

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОСФОРА И КАЛИЯ В УГЛЕАММОНИЙНОЙ ВЫТЯЖКЕ ИЗ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МАССОВЫХ АНАЛИЗОВ

© 2020 г. Ю. М. Логинов

Общество с ограниченной ответственностью "КИНЖ-АГРО" 127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

E-mail: loginov.vniia@mail.ru Поступила в редакцию 09.02.2019 г. После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Для широкого и открытого использования предложен модернизированный метод массового анализа количественного определения извлекаемых из почв фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке (рН 9.0 при $25 \pm 2^{\circ}$ С, по методу Мачигина), окрашенной гуминовыми соединениями. Суть модернизации заключается в том, что при определении извлеченного фосфора, окрашенную гуминовыми соединениями вытяжку не требуется осветлять марганцовокислым калием с серной кислотой или специально подготовленным активированным углем. В предлагаемом методе после добавления молибденовокислого аммония, образующего с фосфором комплексное соединение синего цвета, окрашенную гуминовыми соединениями вытяжку из почвы прямо спектрофотометрируют на спектральной длине волны 898 нм, в отличие от ранее использовавшейся 710 нм. Для реализации предлагаемой методики разработаны поточно-декадная технология анализа и специальное оборудование для автоматизированного и полуавтоматизированного одновременного определения фосфора и калия в указанной почвенной вытяжке. При этом разработана технология для удаления диоксида углерода, выделяющегося при добавлении молибдата аммония с серной кислотой в углеаммонийную почвенную вытяжку, который мешает спектрофотометрированию при определении фосфора. Модернизированная методика определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из почв аттестована ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (свидетельство об аттестации № 686/242— (01.00250)-2015 от 18.09.2015) и внесена в Реестр Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (код ФР.1.31.2015.22036). Методика и представленное оборудование внедрены и используются в лабораториях агрохимслужбы России, Казахстана, Украины, аналитической лаборатории Приднестровья. В процессе разработки методики и оборудования были получены патенты на способы измерений и устройства для определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке, зарегистрированные в России.

Ключевые слова: фосфор, калий, химический анализ, щелочные вытяжки, почва, спектрофотометрия, пламенная фотометрия.

DOI: 10.31857/S0002188120010068

ВВЕДЕНИЕ

Количество химических элементов в почве, необходимых для развития растений, определяется их доступностью и способностью растений извлекать их из почвы. Для анализа различных типов почв используют разные почвенные вытяжки, которые условно характеризуют обеспеченность растений тем или иным элементом, необходимым для развития растений.

Среди элементов, играющих важную роль для развития растений, являются фосфор и калий. Из большого количества методик извлечения подвижных соединений фосфора и калия в почвах, описанных К.Е. Гинзбург [1], наиболее целесооб-

разными для массовых анализов в агрохимслужбе в Советском Союзе, а в последующем и в Российской Федерации, были выбраны 3 вытяжки в зависимости от типа почвы: солянокислая, уксуснокислая и углеаммонийная, позволяющие одновременно количественно определять подвижные фосфор и калий: по ГОСТ Р 54650—2011 [2] для одновременного определения подвижных форм фосфора и калия в минеральных горизонтах подзолистых, дерново-подзолистых, серых лесных и других почвах, вскрышных и вмещающих породах лесной зоны используют 0.2 моль/дм³ (0.2 н.) раствор соляной кислоты, при соотношении почвы к раствору 1:5 (вытяжка по Кирсанову) [3]; по ГОСТ 26204-91 [4] для определения подвижных

форм фосфора и калия в некарбонатных черноземах, серых лесных и других почвах, вскрышных и вмещающих породах степной и лесостепной зон используют раствор уксусной кислоты концентрации 0.5 моль/дм^3 (0.5 н.) при соотношении почвы к раствору 1:25 (вытяжка по Чирикову) [5]; по ГОСТ 26205-91 [6] для определения подвижных форм фосфора и калия в сероземах, серо-бурых, бурых, каштановых, черноземах и других почвах, вскрышных и вмещающих породах пустынной, полупустынной, сухостепной и степной зон, в карбонатных почвах других зон используют 1%-ный раствор углекислого аммония ($10 \text{ г/дм}^3 \text{ (NH}_4)_2\text{CO}_3$) при соотношении почвы к раствору 1:20 (вытяжка по Мачигину) [7].

В 2000 г. вышел сборник отраслевых стандартов по методам анализа фосфора и калия в указанных почвах с учетом последних аналитических разработок и технологии проведения анализов [8]. Из приведенных методов определения фосфора и калия с использованием указанных экстрагентов наиболее сложным является метод с извлечением фосфора из почвы 1%-ным раствором углекислого аммония.

Цель работы — ознакомить в открытом доступе заинтересованных специалистов с модернизированной методикой массового количественного определения фосфора и калия, извлеченных из почвы 1%-ным раствором углекислого аммония [9].

В процессе разработки методики и оборудования были получены патенты на способы измерений и устройства для определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке, зарегистрированые в России, один из них приведен в ссылке [10].

Указанная методика аттестована ФГУП ВНИ-ИМ им. Д.И. Менделеева (свидетельство об аттестации № 686/242—(01.00250)-2015 от 18.09.2015) и внесена в Реестр Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (код ФР.1.31.2015.22036).

В этой методике описаны полуавтоматизированная и автоматизированная технологии определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке. Полуавтоматизированная технология была опубликована в работе [11], автоматизированный вариант изложен в данной публикации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Щелочные вытяжки, полученные из карбонатных черноземных и сероземных почв, как правило, в большей или меньшей степени окрашены гуминовыми соединениями, что не позволяет проводить прямое спектрофотометрирование этих вытяжек для определения количества фос-

фора. Среди широко используемых разнообразных типов таких вытяжек можно отметить вытяжку 1%-ным раствором (NH_4) $_2CO_3$ pH 9.0 по Мачигину, вытяжку 0.5 н. раствором $NaHCO_3$ pH 8.5 по Олсену, вытяжку раствором смеси NH_4HCO_3 и (NH_4) $_2C_2O_4$ pH 8.7 по Мещерякову ([1], стр. 145). В этих вытяжках соотношение массы почвы к объему экстрагента составляет 1 : 20.

Действующий ГОСТ 26205-91 [6] определения фосфора в углеаммонийной вытяжке, окрашенной гуминовыми соединениями, предписывает обесцвечивать смесью серной кислоты и марганцовокислого калия с последующим 2-минутным кипячением для окисления органической компоненты вытяжки. После добавления в обесцвеченную вытяжку окрашивающего реагента молибдата аммония раствор фотометрируют на спектральной длине волны 710 нм.

Многолетние исследования автора данной публикации с коллективом сотрудников показали, что если окрашенную гуминовыми соединениями почвенную вытяжку после добавления окрашивающего реагента на основе молибдата аммония прямо фотометрировать в спектральном диапазоне длин волн 898—900 нм, то гуминовая составляющая существенно не влияет на количественное определение фосфора ([12], стр. 104). Однако в этом случае органически связанный фосфор в гуминовой составляющей не влияет на определение подвижного фосфора и не завышает содержания его после окисления органической составляющей.

Исследования автора показали, что в ряде случаев органически связанный фосфор может завышать содержание подвижного фосфора в 2 раза ([12], стр. 106). На это обращает внимание и К.Е. Гинзбург ([1], стр. 146). Классическое обесцвечивание окрашенных гуминовыми соединениями почвенных вытяжек активированным углем очень трудоемко при массовых анализах подвижного фосфора в почвенных пробах. В этом случае требуется тщательная и кропотливая очистка активированного угля от примесей [13].

В предлагаемой методике для определения подвижного фосфора с прямым спектрофотометрированием почвенной вытяжки после добавления в нее реагента для окрашивания выделяется диоксид углерода, который мешает спектрофотометрированию пробы.

Для решения этой проблемы при использовании полуавтоматической технологии анализа фосфора, выделяющийся диоксид углерода предварительно откачивается с помощью специально разработанного для этой цели оборудования [9, 11].

При автоматическом определении фосфора и калия на специально разработанных автоанализаторах проточного типа удаление диоксида углерода обеспечивается специальной конструкцией гидравлической системы автоанализатора ([10, 12], стр. 107).

В случае полуавтоматического определения фосфора, при очень большом содержании в почвенной вытяжке гуминовой составляющей (оптическая плотность >0.060~E, база кюветы 10~мм и λ 900 нм), которое может внести заметную погрешность при определении подвижного фосфора, полученную почвенную вытяжку анализируют дважды: с добавлением окрашивающего реактива и без его добавления. Первый результат корректируют вычитанием полученного результата без добавления окрашивающего реактива.

Автоанализаторы проточного типа в этом случае имеют 3 канала: 2 канала для определения фосфора (с окрашиванием и без окрашивания пробы) и один канал для определения калия. Обычно при невысоких концентрациях гуминовой составляющей используют 2 канала автоанализатора: один для определения фосфора и один для определения калия.

Уменьшение концентрации гуминовой составляющей можно получить кратным разведением почвенной вытяжки исходным экстрагентом с последующей коррекцией количества фосфора в почвенной вытяжке. В этом случае используют двухканальный анализатор для одновременного определения фосфора и калия.

Наши исследования по определению содержания фосфора в карбонатных почвах показали, что содержание органического вещества в почвенных пробах не коррелирует с содержанием в них подвижного фосфора ([12], стр. 103—106). Проведенные исследования позволили предположить, что данный метод и технология могут быть использованы при анализе подвижного фосфора и в других щелочных вытяжках.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОДВИЖНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ ФОСФОРА И КАЛИЯ В УГЛЕАММОНИЙНОЙ ВЫТЯЖКЕ ИЗ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОТОЧНО-ДЕКАДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА ПО МВИ—66373620—003-2015. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ

1.2. Подготовка растворов и реактивов

1.2.1. Приготовление экстрагирующего раствора углекислого аммония массовой концентрацией $C = 10 \text{ г/дм}^3 \text{ рH 9.0.}$ На приготовление 1 дм³ раствора требуется $10.0 \pm 0.1 \text{ г}$ измельченной, хорошо

перемешанной соли углекислого аммония, которую переносят в мерную колбу, растворяют в дистиллированной воде и доводят объем до метки. При большом объеме работ используют выверенные стеклянные бутыли на 10 или 20 л или пластиковые, химически стойкие к щелочам и кислотам канистры.

В связи с нестойкостью используемого химического соединения его концентрацию и рН в приготовленном экстрагирующем растворе необходимо предварительно проверить и, если необходимо, довести концентрацию и рН до нужных величин. Вначале измеряют рН исходного раствора экстрагента, а потом определяют концентрацию приготовленного раствора $(NH_4)_2CO_3$.

Для этого в 3 конические колбы отбирают по 5 см³ приготовленного раствора, прибавляют по 50 см³ воды, 2 капли метилового оранжевого и титруют раствором соляной кислоты концентрации 0.1 моль/дм³ до перехода желтой окраски в оранжевую. Для вычисления используют среднее арифметическое результатов 3-х титрований. Точную концентрацию раствора углекислого аммония $[1/2(NH_4)_2CO_3]$ моль/дм³ вычисляют по уравнению:

$$C_2 = C_1 V_1 / V_2, (1)$$

где C_2 — концентрация углекислого аммония, моль/дм³; C_1 — концентрация раствора соляной кислоты, моль/дм³; V_1 — объем раствора соляной кислоты, израсходованный на титрование, см³; V_2 — объем раствора углекислого аммония, отобранный на титрование, см³.

Алгоритм приготовления раствора углекислого аммония с необходимыми параметрами (требованиями) дан в ссылке [1, стр. 147–148]. В указанной ссылке расчет концентрации растворов $(NH_4)_2CO_3$ дан в нормальной массе. В настоящей статье, а также в ГОСТ 25-6205-91 данный расчет представлен в молярной массе, т.е. берется 1/2 молярной массы углекислого аммония.

Допустим, было установлено, что исходный раствор ($\mathrm{NH_4}$) $_2\mathrm{CO_3}$ имеет рН 8.0, а концентрацию $C_{[1/2(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO_3}]}=0.121$ моль/дм 3 при необходимых рН (9.0 ± 0.2) и $C_{[1/2(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO_3}]}=(0.208\pm0.010)$ моль/дм 3 . Тогда поступают следующим образом. В начале доводят раствор крепким аммиаком до рН 9.0 ± 0.2 . Затем титрованием повторно определяют концентрацию полученного раствора ($\mathrm{NH_4}$) $_2\mathrm{CO_3}$ рН 9.0.

Предположим, что после корректировки рН концентрация экстрагента оказалась $C_{[1/2(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO}_3]} = 0.178$ моль/дм³. Ее необходимо довести до кон-

центрации $C_{[1/2(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO}_3]} = 0.208$ моль/дм³, т.е. увеличить на 0.030 моль/дм³. Необходимое количество добавляемого углекислого аммония на каждый 1 дм³ раствора в данном случае рассчитывают по формуле:

$$K = 10 \times 0.030/0.121,$$
 (2)

где K — масса добавляемого $(NH_4)_2CO_3$ на каждый 1 дм³ раствора, 10 — масса в г/дм³ с исходной концентрацией $(NH_4)_2CO_3$ в моль/дм³, 0.030 — разница между требуемой и исходной концентрацией $(NH_4)_2CO_3$ в моль/дм³, 0.121 — исходная концентрация $(NH_4)_2CO_3$ в моль/дм³.

В конкретном случае эта величина равна $2.48 \, \mathrm{r}$. Таким образом, на каждый литр приготовленного раствора необходимо добавить дополнительно $2.48 \, \mathrm{r}$ соли $(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO_3}$. Полученную при этом концентрацию проверяют повторным титрованием. Если концентрация приготовленного раствора выше заданной, добавляют дистиллированную воду. Если концентрация ниже заданной, добавляют углекислый аммоний.

Допустимо применять раствор (NH₄) $_2$ CO $_3$ концентрацией $C_{[1/2({\rm NH_4})_2{\rm CO}_3]}=(0.208\pm0.010)$ моль/дм 3 и рH = 9.0 ± 0.2 .

1.2.2. Приготовление компонентов для окрашивающего раствора. Приготовление реактива А.

Готовят разведенную в воде серную кислоту концентрацией $C_{[1/2\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4]}=5$ моль/дм³ из исходной концентрированной $\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4$.

Пример приготовления. Предварительно измеряют плотность исходной серной кислоты ареометром или иным плотномером. Предположим, что измеренная плотность исходной концентрированной H_2SO_4 составляет 1.84 г/см³. В 1 дм³ разведенной серной кислоты концентрацией $C_{[1/2\text{H},SO_4]} = 5$ моль/дм³ содержится 245.2 г H_2SO_4 . Такое количество содержится в 133.2 см³ исходной концентрированной кислоты, указанной плотности. Мерным цилиндром, вместимостью 200 или 250 см³, отмеривают 133 см³ концентрированной кислоты, осторожно приливают ее с перемешиванием в мерную колбу вместимостью 1 дм³, заполненную до половины объема дистиллированной водой, и после охлаждения доводят дистиллированной водой до метки. Перемешивают содержимое. Такой же алгоритм и для другой плотности исходной концентрированной H₂SO₄.

Навески молибденовокислого аммония (6.0 \pm \pm 0.1) г и сурьмяновиннокислого калия (0.15 \pm \pm 0.01) г растворяют, соответственно, в 200 и 100 см³ воды при слабом нагревании. Охлажден-

ные растворы приливают к 500 см³ раствора серной кислоты концентрации $C_{[1/2\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4]} = 5$ моль/дм³ и доводят объем водой до 1 дм³. Раствор А тщательно перемешивают и хранят в склянке из темного стекла.

Приготовление окрашивающего реактива Б.

Навеску аскорбиновой кислоты (1.20 ± 0.01) г растворяют в $220~{\rm cm}^3$ реактива A, доводят объем раствора дистиллированной водой до $1~{\rm дm}^3$ и тщательно перемешивают. Раствор может храниться в стеклянной посуде из темного стекла несколько дней в холодильнике. Качество реактива определяют тестовыми пробами при окраске градуировочной шкалы.

1.2.3. Приготовление реактивов без окрашивающего реагента молибдата аммония. Навеску (0.15 ± 0.01) г сурьмяновиннокислого калия растворяют в 300 см³ воды при слабом нагревании. Охлажденный раствор приливают к 500 см³ раствора серной кислоты концентрации $C_{[1/2\text{H}_2\text{SO}_4]} = 5$ моль/дм³ и доводят объем водой до 1 дм³. Раствор тщательно перемешивают и хранят в склянке с плотно закрытой пробкой.

Приготовление конечного раствора для холостой пробы на канале без молибдата аммония. Навеску аскорбиновой кислоты (1.20 ± 0.01) г растворяют в $220 \, \text{см}^3$ реактива, без молибдата аммония переносят в мерную колбу вместимостью $1 \, \text{дм}^3$, доводят дистиллированной водой до метки и тщательно перемешивают. Раствор хранят в герметично закрытых емкостях.

1.2.4. Приготовление исходного смешанного раствора массовой концентрации $P_2O_5 - 0.1 \, \text{г/дм}^3$ и $K_2O - 0.5 \, \text{г/дм}^3$. Для приготовления раствора используют либо индивидуальные вещества, либо готовые стандарт-титры (фиксаналы). Стандарттитры для приготовления градуировочных растворов: Фиксаналы. СТО 66373620-001-2015. Поставляются ООО "КИНЖ-АГРО".

Приготовление из индивидуальных веществ. Навески 0.192 г однозамещенного фосфорнокислого калия и 0.686 г хлористого калия помещают в мерную колбу вместимостью 1 дм³, растворяют в экстрагирующем растворе 1%-ного углекислого аммония, доводят объем раствором до метки и тщательно перемешивают. Раствор хранят в герметично закрытых емкостях.

Приготовление из стандарт-титров (фиксаналов).

Содержимое пробирок № 1 и № 2 количественно переносят в мерную колбу вместимостью 1 дм^3 , растворяют в экстрагирующем растворе

	ровочных растворах									
	№ раствора	Объем исходного раствора, см ³	Концентрация P_2O_5 , мг/дм ³	Концентрация K_2O , мг/дм ³						
	1	0	0	0						
	2	2.5	0.5	2.5						
	3	5.0	1.0	5.0						
	4	10.0	2.0	10.0						
5		20.0	4.0	20.0						
	6	40.0	8.0	40.0						

Таблица 1. Концентрации фосфора и калия в градуировочных растворах

1%-ного углекислого аммония, доводят объем раствором до метки и тщательно перемешивают. Раствор хранят в герметично закрытых емкостях.

1.2.5. Приготовление воды, содержащий этиловый спирт для промывки гидравлической системы автоанализатора. Раствор готовят из расчета 200 см³ этилового спирта на 10 дм³ дистиллированной воды.

1.2.6. Приготовление градуировочных растворов. В мерные колбы вместимостью $500 \, \mathrm{cm}^3$ помещают указанные в табл. 1 объемы исходного раствора, приготовленного по 1.2.4. Объемы растворов доводят до метки экстрагирующим раствором — 1%-ным $(\mathrm{NH_4})_2\mathrm{CO_3}$ и перемешивают. Во избежание пузырьков воздуха на внутренних стенках кювет фотометра колориметрического градуировочные растворы следует готовить на прокипяченной воде или на воде непосредственно из-под дистиллятора. Такую же воду используют в автоанализаторах для гидравлического канала фосфора с добавлением этилового спирта из расчета $20 \, \mathrm{cm}^3$ спирта на $1 \, \mathrm{дm}^3$ воды.

1.2.7. Приготовление градуировочных растворов для анализа почвенных вытяжек. Для градуировки используют 10-ячеечную аналитическую кассету однорядную или двухрядную (в случае укомплектования приборов этими кассетами), заполненную градуировочными растворами в следующем порядке:

№ ячейки 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 № град. раствора 5 1 1 2 3 4 5 6 1 1

Примечания. 1. В ячейках ряда даны номера градуировочных растворов из табл. 1. 2. Указанное заполнение ячеек кассеты градуировочными растворами используют в 3-канальной схеме автоанализатора (рис. 1) при прямом определении подвижных форм фосфора и калия в почвенных вытяжках, сильно окрашенных гуминовыми со-

единениями. В остальных случаях используют 2-канальную схему автоанализатора (рис. 2) и ту же схему заполнения ячеек градуировочными растворами. В этом случае используют однорядную кассету или один ряд двухрядной кассеты. 3. В случае использования других типов аналитических кассет (с большим количеством ячеек) их ячейки заполняют в том же порядке, а оставшиеся заполняют раствором № 1.

2. ПОТОЧНО-ДЕКАДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОСФОРА И КАЛИЯ В УГЛЕАММОНИЙНОЙ ВЫТЯЖКЕ ИЗ ПОЧВ ПРИ МАССОВЫХ АНАЛИЗАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВАРИАНТ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Подготовка почвенных проб

Образцы почв после удаления растительных и минеральных включений доводят до воздушносухого состояния при температуре не выше 35—40°С в проветриваемом помещении или сушильных шкафах. Затем их измельчают с одновременным просеиванием через сито с круглыми отверстиями диаметром 1—2 мм на мельнице для размола почв, например, ИП-1 производства ООО "Вибротехник".

Размолотые образцы хранят в пластиковых емкостях вместимостью 300—500 см³, плотно закрытых крышками, которые устанавливают в металлические пеналы (рис. 3) для доступности их при хранении на складе.

2.2 Выполнение технологических операций

В предлагаемой технологии транспортным "челноком" всей аналитической линии являются унифицированные технологические кассеты КБМ, которые содержат 10 емкостей из полиэтилена, емкостью $\approx 200\,$ см 3 , крепящиеся в каркасе из нержавеющей стали (рис. 4).

Под эти кассеты конструируют все необходимое технологическое оборудование: тележки для транспортировки кассет, устройство для взвешивания пробы с пропорциональным дозированием экстрагента в зависимости от массы взвешенной пробы, взбалтыватели содержимого кассет, центрифугу для осаждения твердой фракции суспензии в емкостях кассеты, и другое оборудование.

Технологический поток анализа начинается с взвешивания размолотой воздушно-сухой почвы, переноса навески в емкость технологической кассеты КБМ, и добавления в нее экстрагента. Эта операция осуществляется на первой позиции ав-

86 ЛОГИНОВ

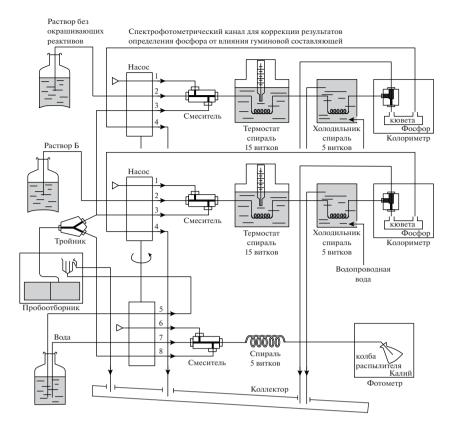


Рис. 1. Трехканальная гидравлическая схема проточного автоанализатора ЦИАК-П.

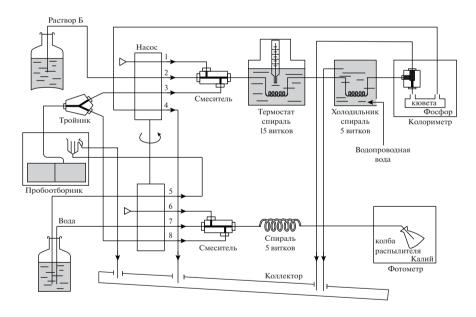


Рис. 2. Двухканальная гидравлическая схема проточного автоанализатора ЦИАК-П.

томатизированным весовым комплексом ВКПД-ЕТ (комплекс разработан специалистами ООО "СКБ "Пробанаучприбор") (рис. 5). Тележку ТТП с кассетами КБМ (рис. 6) и тележку с почвенными образцами (рис. 7) подвозят к весовому

комплексу. Оператор устанавливает кассету на транспортер устройства и специальной выверенной меркой, вмещающей 5 г воздушно-сухой почвы, отбирает почвенную пробу и загружает ее в стакан для взвешивания. Почву предварительно



Рис. 3. Пеналы с емкостями для хранения размолотых воздушно-сухих проб почвы.



Рис. 4. Технологичекая кассета КБМ для помещения навески почвы и добавления экстрагента.

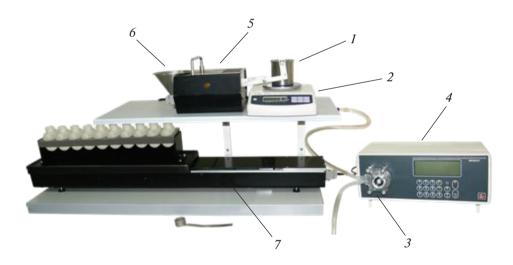


Рис. 5. Весы ВКПД-ЕТ для автоматического взвешивания пробы почвы и дозирования объема экстрагента пропорционально массе навески: 1 — стакан для помещения пробы почвы и взвешивания пробы, 2 — электронные весы, 3 — перистальтический насос прижимного действия для дозирования экстрагента, 4 — электронный блок управления комплексом, 5 — механизм поворота стакана для переноса навески почвы в бункер, 6 — бункер приема навески для загрузки в емкость кассеты, 7 — транспортер перемещения кассеты.

перемешивают ложкой или шпателем на всю глубину коробки.

После автоматического взвешивания и переноса навески в бункер устройства она ссыпается в емкость кассеты, в которую добавляется экстра-

гент в объеме, пропорциональном массе навески при соотношении 1: 20. Эта операция осуществляется с помощью перистальтического насоса с шаговым двигателем. После автоматического перемещения кассеты на один шаг процедура по-



Рис. 6. Тележка ТТП для транспортировки кассет КБМ к аналитическим позициям: на нижнем ярусе тележки находятся крышки КК для герметизации кассет КБМ. На крышке тележки производится операция герметизации кассет КБМ.

вторяется для следующего почвенного образца. Загруженная кассета закрывается крышкой и устанавливается на свое место в тележке.

Далее тележка с загруженными кассетами транспортируется на позицию 2, где происходит 5-минутное возвратно-поступательное взбалтывание содержимого кассет для извлечения фосфора и калия с частотой колебаний ≈200/мин (рис. 8). При указанной частоте взбалтывания кассеты устанавливаются в вертикальном положении.

На позиции 3 кассеты в тележках отстаиваются в течение 18 ч при температуре 24°C в помещении или в термостате.

На позиции 4, после предварительного встряхивания содержимого технологической кассеты КБМ, производится разделение суспензии на жидкую и твердую фракцию с помощью центрифуги Ц-2000 (рис. 9). Скорость вращения ротора центрифуги ≈1000 об./мин, экспозиция — 4 мин, экспозиция с полным циклом до остановки рото-



Рис. 7. Тележка ТТП для транспортировки пеналов с почвенными пробами к весовому комплексу ВКПД-ЕТ: вскрытие емкостей с образцом почвы и отбор меркой для взвешивания производится на крышке тележки.

ра — 7 мин. В центрифугу помещают 4 кассеты с содержимым без крышки в 2 противоположные люльки. Перед установкой парные кассеты должны быть уравновешены грузиками-балансами с точностью \pm 5 г (используются торговые или иные подходящие весы).

На позиции 5 с помощью 10-канального переливного устройства ДП-02 (рис. 10) производится одновременный перенос жидкой фракции из десяти емкостей технологической кассеты КБМ в 10 ячеек аналитической кассеты КА (рис. 11). Эту операцию обеспечивает многоканальный перистальтический насос неприжимного действия указанного устройства. Для этого 10 заборных трубок устройства погружают в чистую зону жидкой фракции в емкостях кассеты КБМ (ниже зоны растительных остатков и выше зоны твердой фракции суспензии). Включают перистальтический насос, и первыми порциями почвенной вытяжки промывают силиконовые трубки одновременно всех каналов, сливая в ванночку для удаления в канализацию. Затем устанавливают гребенку со сливными трубками над ячейками аналитиче-



Рис. 8. Взбалтыватель кассет КБМ для извлечения фосфора и калия из почвы: взбалтывание содержимого 6-ти кассет КБМ, закрытых крышками КК.

ской кассеты КА и заполняют их анализируемыми пробами.

На последней позиции 6 выполняют определение фосфора и калия в полученных вытяжках на отечественном автоанализаторе проточного типа ЦИАК-П (рис. 12).

Принцип работы многоканальных автоанализаторов проточного типа в случае спектрофотометрических измерений заключается в непрерыв-



Рис. 9. Центрифуга Ц-2000 для разделения твердой и жидкой фракций суспензий почвы.

ном измерении и регистрации поглощения светового потока протекающей жидкостью через проточную кювету при требуемой спектральной длине волны. В случае пламенно-фотометрических измерений работа указанных автоанализаторов заключается в непрерывном измерении и регистрации эмиссии пламени на выбранной спектральной длине волны при постоянном поступлении жидкости в распылитель горелки. Часто эти 2 принципа работы автоанализаторов объединены, как и в нашем случае, в одном приборе (спектрально-аналитический комплекс описываемого анализатора разработан В.В. Кузнецовым).

Многоканальный перистальтический насос прижимного действия, непрерывно сдавливая эластичные трубки вращающимися валиками, одновременно прокачивает жидкость по нескольким каналам (рис. 1, 2). Это позволяет вводить в гидравлический поток зоны анализируемых проб, которые отделяются друг от друга зонами дистиллированной воды.

При количественном определении 2-х показателей — содержания фосфора и калия — отбираемая проба делится на 2 части с помощью тройника и отдельных гидравлических каналов.

В случае спектрофотометрических измерений фосфора при поступлении зоны пробы в смеситель она смешивается с реактивом Б, который туда непрерывно поступает. Далее зона пробы с реактивом Б поступает в спираль термостата и по-

90 ЛОГИНОВ

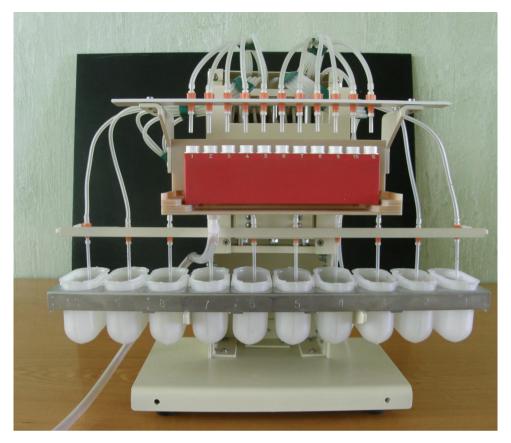


Рис. 10. Десятиканальное переливное устройство ДП-02 для переноса жидкости из технологических кассет в кассеты аналитические KA: из технологической кассеты (устанавливается внизу) перекачивается жидкость в аналитическую кассету (устанавливается вверху).

сле нагревания в нем окрашивается в синий цвет. Затем она охлаждается в холодильнике и поступает в проточную кювету колориметра с предварительным удаления пузырьков воздуха через пузырькоотделитель.

Поглощение светового потока при прохождении зоны пробы через проточную кювету спектрофотометра регистрируется и обрабатывается для получения требуемых результатов программой компьютера, которая задает циклы работы узлов автоанализатора (программа для работы автоанализатора ЦИАК-П разработана Я.Г. Матвеевым).

В случае пламенно-фотометрических измерений калия при поступлении зоны пробы в смеситель она смешивается с дистиллированной водой и после прохождения через стеклянную спираль поступает в распылитель пламенного фотометра для количественного измерения калия.

На монитор выводятся градуировочные графики, регистрограммы (рис. 13) и табличные результаты измерений содержания фосфора и калия. Последние распечатываются на принтере.

В случае необходимости количественного определения фосфора в вытяжках из почв, сильно окрашенных гуминовыми соединениями, используют 3-канальную схему автоанализатора (рис. 1).

В этом случае корректирующий канал фосфора без использования окрашивающих реактивов вначале градуируют с использованием градуиро-

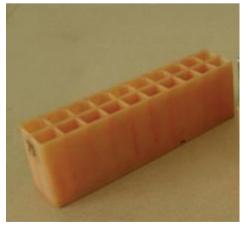


Рис. 11. Аналитическая кассета КА для автомата подачи проб автоанализатора ЦИАК-П.

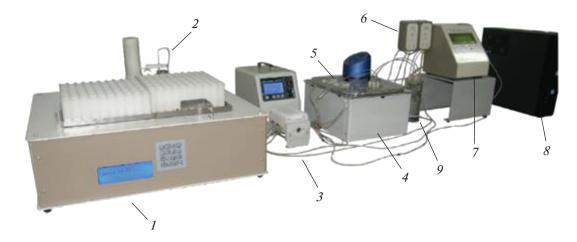


Рис. 12. Автоанализатор проточного типа ЦИАК-П: I — автомат подачи проб ПА-1 с аналитическими кассетами КА, 2 — канюля (полая игла) с циклом работы (отбор пробы из ячейки кюветы — промывка дистиллированной водой из промывной склянки (на рисунке не показана)), 3 — многоканальный перистальтический насос прижимного действия, 4 — водяной термостат с автоматической регулировкой температуры воды, 5 — смесители на крышке термостата, 6 — 2 спектрофотометра (колориметра) на корпусе пламенного фотометра для определения фосфора с окрашивающим реагентом и без него, 7 — пламенный фотометр для определения калия, 8 — компьютер для управлениея узлами комплекса и регистрацией результатов анализа, 9 — холодильник между водяным термостатом и пламенным фотометром в виде стакана с вертикальной спиралью внутри.

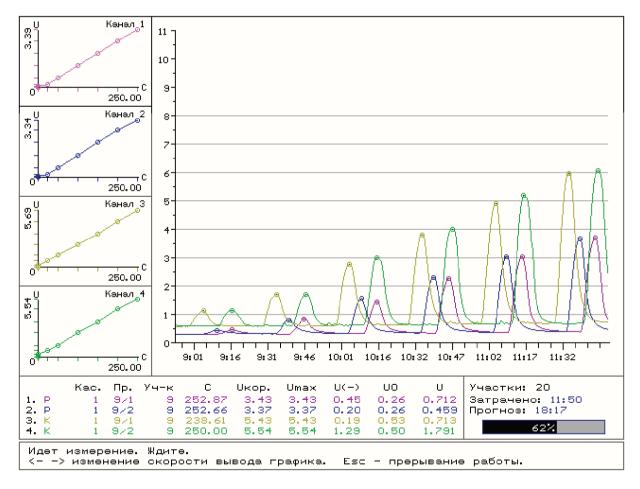


Рис. 13. Одна из регистрограмм определения фосфора и калия на экране монитора автоанализатора проточного типа (4-канальный вариант измерений фосфора и калия).

вочной шкалы по 1.2.7 с окрашивающими реактивами по 1.2.2. Затем окрашивающий реактив заменяют на конечный раствор без окрашивающего компонента по 1.2.3, предварительно промыв канал дистиллированной водой. При измерении гуминовой составляющей необходимо контролировать величину показателя холостой пробы экстрагирующего раствора на канале без молибдата аммония по п. 1.2.3. Для этого в процессе измерения анализа почвенных вытяжек в одну из ячеек кассеты заливают холостую пробу. Если полученный результат будет превышать величину сигнала базовой линии, то его надо вычитать из данных, полученных при измерении гуминовой составляющей.

При использовании автоанализаторов проточного типа для определения фосфорных соединений по реакции фосфорномолибденовой сини необходимо соблюдать определенные соотношения между количеством анализируемого фосфора, извлеченного из почвы, и количеством реактивов: молибденовокислого аммония, серной кислоты, аскорбиновой кислоты (эту зависимость подробно рассматривает К.Е. Гинзбург в [1], С. 110. Там же даны ссылки на первоисточники). В противном случае можно получить хороший градуировочный график, который не будет соответствовать реальному содержанию фосфора в почвенной вытяжке.

Показанный на рис. 12 автоанализатор проточного типа включает автомат подачи проб, в который загружают аналитические кассеты (рис. 11) с градуировочными растворами и с анализируемыми вытяжками из почв. Кинематика иглы (канюли) с механизмом поворота на 180° обеспечивает автоматический отбор пробы из ячейки кюветы и последующую промывку канала дистиллированной водой.

Перистальтический насос прижимного действия обеспечивает непрерывную подачу в гидравлическую систему всех требуемых растворов: дистиллированной воды, окрашивающего экстрагента и пробы. Тройник, крепящийся на корпусе автомата подачи проб, разделяет отобранную пробу на 2 гидравлических канала для определения фосфора и калия. На верхней панели водяной бани крепятся смесители, обеспечивающие смешивание реактивов для определения фосфора и калия. Водяной термостат со стеклянной спиралью обеспечивает быстрое развитие окраски фосфорномолибденовой сини. Холодильник охлаждает поток жидкости после термостата. Окрашенная жидкость поступает в проточную кювету спектрофотометра (колориметра), который связан с компьютером для обработки полученных результатов в анализа содержания фосфора. В канале калия после спирали для смешивания жидкость поступает в распылитель пламенного фотометра для определения калия. Пламенный фотометр также связан с компьютером, обрабатывающим полученную информацию.

Производительность автоанализатора составляет 120 проб/ч одновременно для 2-х показателей.

Описываемая методика и представленное оборудование внедрены и используются в лабораториях агрохимслужбы России, Казахстана, Украины, аналитической лаборатории Приднестровья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод и аналитическое оборудование для определения фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из почв в настоящее время используют в лабораториях агрохимслужбы и странах ближнего зарубежья.

Метрологические характеристики методики, рассчитанные специалистами ВНИИМ им. Д.И. Менделеева на основании статистической обработки большого объема аналитического материала, приведены ниже.

Относительная расширенная неопределенность измерений по данной методике (при коэффициенте охвата k=2) составляет: 15% — для фосфора (P_2O_5), 13% — для калия (K_2O).

Величины относительной расширенной неопределенности измерений соответствуют границам относительной суммарной погрешности при доверительной вероятности P = 0.95.

Представленная в данном материале поточнодекадная технология массовых анализов не только фосфора и калия, но и других агрохимических была изначально показателей разработана В.М. Клычниковым, возглавлявшим в 1960-е гг. лабораторию массовых анализов почв Всесоюзного института удобрений и агропочвоведения им Д.Н. Прянишникова. Несколько позднее эта технология и методы анализа были усовершенствованы А.Н. Орловой, С.Г. Самохваловым и автором данной публикации с их коллективами, работавшими в Центральном институте агрохимического обслуживания - впоследствии ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова.

Для внедрения указанной технологии в лаборатории агрохимслужбы СССР были привлечены коллективы предприятий ТНПО "Аналитприбор" (г. Тбилиси), ВНИИНаучприбор, завода "Госметр", НПО "Буревестник" (г. Ленинград), НПО "Агроприбор" (г. Москва) и 16 заводов Министерства приборостроения, средств управления и систем автоматизации СССР, а также ряд предприятий ГДР и ВНР.

В результате все 200 агрохимических лабораторий страны были оснащены первоклассным по тому времени аналитическим оборудованием. Некоторое из этого оборудования до сих пор работает в лабораториях Агрохимслужбы РФ.

В настоящее время в лаборатории Агрохимслужбы России, Казахстана и Белоруссии поступает новое отечественное аналитическое оборудование, не уступающее по параметрам лучшим зарубежным образцам. Некоторое из этого оборудования описано в данной статье.

Автор выражает благодарность С.М. Кривенкову за подготовленные рисунки к статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Гинзбург К.Е.* Методы определения фосфора в почве // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
- 2. ГОСТ Р 54650—2011 Почвы. Определение подвижных форм фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
- Кирсанов А.Т. Методы определения потребности почв в фосфорных удобрениях // Тр. Почв. ин-та. 1935. Т. 12. С. 11–23.
- ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных форм фосфора и калия по методу Чирикова в молификации ЦИНАО.
- 5. *Чириков Ф.В.* Инструкция по учету форм фосфатов в почве // Программно-методические указания по географической сети опытов с удобрениями. М.: Сельхозгиз, 1947.

- 6. ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.
- 7. *Мачигин Б.П.* Методы агрохимических, агрофизических и микробиологических исследований в поливных и хлопковых районах. Ташкент: Изд-во АН УзбССР, 1952, 440 с.
- 8. ОСТ 256-2000, ОСТ 257-2000, ОСТ 258-2000. Сборник отраслевых стандартов. Почвы. Методы анализа. Методики выполнения измерений концентраций фосфора и калия. М., 2000.
- 9. Методика измерений массовой концентрации подвижных минеральных форм фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из почв с использованием поточно-декадной технологии анализа. МВИ—66373620—003-2015. М., 2015.
- 10. Способ автоматизированного прямого определения доступного растениям фосфора в углеаммонийной почвенной вытяжке, окрашенной гуминовыми соединениями, и устройства для осуществления способа. Пат. на изобр. № 2578955. Приоритет изобр. 02 сентября 2014 г.
- 11. *Логинов Ю.М.* Новые способ и методика прямого определения подвижных форм фосфора и калия в углеаммонийной вытяжке из карбонатных почв // Плодородие. 2012. № 4 (66). С. 45–47.
- 12. Логинов Ю.М., Стрельцов А.Н. Автоматизация аналитических работ и приборное обеспечение мониторинга плодородия почв и качества продукции растениеводства. М.: Агробизнесцентр, 2010. 324 с.
- 13. *Глазунова Н.М., Похлебкина Л.П., Кривицкая Е.Ф.* Сравнение методов определения подвижных фосфатов в почвах // Химия в сел. хоз-ве. 1968. № 12. С. 19—24.

Modernized Method for Determination of Phosphorus and Potassium in Carbon Ammonium Extract from Soils Using Mass Analysis Technology

Yu. M. Loginov

Limited Liability Company "KINZH-AGRO" ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia E-mail: loginov.vniia@mail.ru

A modernized method of mass analysis of determination of phosphorus and potassium extracted from soils by alkaline extraction, stained with humic compounds is proposed. The extract painted with humic compounds does not need to be clarified with potassium permanganate with sulfuric acid or specially prepared activated carbon. The extract from the soil is directly spectrophotometric at a spectral wavelength of 898 nm, in contrast to the previously used 710 nm. The proposed technology for removing carbon dioxide released by the addition of ammonium molybdate with sulphuric acid ammonium in soil extract, which interfere with the spectrophotometry in the determination of phosphorus. The flow-decade technology of the analysis and the equipment providing simultaneous determination of phosphorus and potassium with productivity of 120 samples per hour is developed. In the process of developing methods and equipment, a number of patents were obtained for measuring methods and devices for determining phosphorus and potassium in carbon-ammonium extraction, registered in Russia.

Key words: phosphorus, potassium, chemical analysis, flow technology, alkaline extracts, soil, spectrophotometry, flame photometry.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

- 1. В журнале "Агрохимия" публикуются оригинальные теоретические, проблемные, экспериментальные и методические статьи, соответствующие профилю журнала, а также аналитические обзоры, рецензии и хроники. Работы, ранее опубликованные, редакция не принимает.
- 2. Объем экспериментальных статей не должен превышать 25 машинописных страниц (включая таблицы и список литературы), обзоров 35 страниц. Повторение одних и тех же данных в таблицах и рисунках не допускается.
- 3. Статьи должны сопровождаться направлением на опубликование от того учреждения, в котором выполняли работу, и экспертным заключением, в котором говорится об отсутствии сведений, запрещенных к опубликованию. К статье необходимо приложить договор о передаче авторского права РАН (текст договора на имя главного редактора журнала размещен на сайте РАН www.ras.ru). Статьи и сопроводительные документы должны быть представлены только в электронном виде и присланы в редакцию по электронной почте. Адрес электронной почты редакции: j.agrochem@mail.ru. Текст, таблицы и рисунки следует размещать в одном файле.
- 4. Присылаемую в редакцию статью подписывают все авторы. При этом обязательно указывают фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, контактный телефон, адрес электронной почты одного из авторов, с которым следует вести переписку.
- 5. Текст и таблицы должны быть напечатаны в формате Word, Times New Roman, 14 пунктов через 2 интервала. Таблицы, подрисуночные подписи и рисунки печатаются на отдельных листах. Все страницы должны быть пронумерованы.
- 6. Начало статьи оформляется по образцу: название, инициалы и фамилии авторов, полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнена работа, почтовый адрес каждого учреждения с индексом, страна, адрес электронной почты. Далее приводится расширенная аннотация (до 1 страницы), а также ключевые слова. Аннотация должна включать цель работы, методику кратко и основные результаты. Кроме того, все эти данные необходимо представить на английском языке в конце рукописи на отдельной странице.

- 7. Рисунки желательно выполнять в формате PDF, обеспечивающем четкость всех деталей и возможности редактирования.
- 8. Материал статьи излагается в последовательности: введение, методика исследования, результаты и их обсуждение, выводы (заключение), список литературы. Эти подзаголовки должны быть указаны в тексте статьи.

Заглавие статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

Аннотация должна содержать главную информацию о статье: суть экспериментов, результаты и их интерпретацию.

Во введении нужно логически обосновать проведение данного исследования, показать актуальность и новизну, ответить на вопросы: что известно в данной области, что остается неизвестным, какова цель настоящей публикации.

Методика исследования должна содержать сведения: где, когда, на какой почве (субстрате) проводили опыты; агрохимическую характеристику и другие характеристики почвы с указанием методов определения; об условиях выращивания растений; об аналитических методах и использованных приборах и реактивах (с указанием фирмы на языке оригинала и производящей страны). Для малоизвестных или новых методов необходимо подробное их изложение с указанием всех примененных реактивов, при этом нужно приводить ошибку определения и чувствительность метода. Обязательно давать ссылку на классификацию, по которой дано название почвы.

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P_2O_5 и K_2O , пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выраженные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе ($N_{100}P_{75}K_{100}$).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; названия микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L., *Sinorhizobium meliloti*.

В конце методического раздела следует указать повторность в опыте, методы статистической обработки. Необходима статистическая обработка всех количественных данных. При ее использовании в методике нужно указать, что означает плюс-минус в таблицах и отклонение от среднего на графиках: стандартную ошибку среднего или стандартное отклонение. Если для данной задачи предложено несколько различающихся методов статистической обработки, то необходимо дать ссылку на конкретный использованный метод.

Результаты и их обсуждение. Изложение результатов должно заключаться в выявлении следующих из таблиц и рисунков закономерностей, а не пересказе их содержания.

Количественные данные, представленные без ошибок, округляются до 3-х значащих цифр. Например, величина 1044 округляется до 1040, 1045 — до 1050, величина 1.253 округляется до 1.25, 1.257 — до 1.26 и т.п.

Все виды ошибок (метрологические и статистические) приводить не более, чем с двумя значащими цифрами (начиная с первой ненулевой цифры слева); в соответствии с этим сами величины (в том числе средние) округляются до того же числа десятичных знаков, которые содержатся в их ошибке.

При обсуждении результатов следует сравнить полученную информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна.

Выводы (или **заключение**) должны быть конкретными и вытекать из непосредственно полученного материала.

При описании методики, обсуждении результатов и в выводах следует употреблять глаголы в прошедшем времени.

- 9. В статье необходимо использовать физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-2002 и РД 50-160-79), агрохимические термины в соответствии с ОСТами 10 294-2002 10 297-2002. При названии различных химических соединений желательно использовать терминологию ИЮПАК. В таблицах употребляются символы химических элементов.
- 10. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.
- 11. При обозначении удобрений (азотных, фосфорных, калийных, комплексных, сложных, смешанных) целесообразно пользоваться сокращениями:

 N_{aa} — аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

N_а – аммоний сернокислый;

 N_{M} — мочевина (карбамид);

 N_c — селитра натриевая;

 $N_{c\kappa}$ — селитра калийная;

 N_{ckll} — селитра кальциевая;

 N_{II} — цианамид кальция;

 $N_{\rm ва}$ — водный аммиак;

 N_{6a} — безводный аммиак;

 P_c — суперфосфат простой;

 P_{cr} — суперфосфат простой гранулированный;

 $P_{c\pi}$ — суперфосфат двойной;

 P_{Π} – преципитат;

Роф – обесфторенный фосфат;

 P_{ϕ} — фосфоритная мука;

 $P_{\text{фиг}}$ — фосфатшлак;

 K_x — калий хлористый;

K_c – калий сернокислый;

 $K_{\text{мг}}$ – калимагнезия;

 $A\Phi$ – аммофос;

ДАФ – диаммофос;

ДАФК – диаммофоска;

АЗФК – азофоска;

КАФ – карбоаммофос;

КАФК – карбоаммофоска;

МФК – метафосфат калия;

НАФ – нитроаммофос;

 $H\Phi$ – нитрофос;

НФК – нитрофоска;

НАФК – нитроаммофоска;

 $\Pi \Phi A$ — полифосфат аммония;

ФМ – фосфат мочевины;

ЖКУ – жидкое комплексное удобрение;

ОМУ — органо-минеральное удобрение, (с расшифровкой состава двух последних видов удобрений в разделе "Методика исследований").

Другие сокращения необходимо расшифровать.

12. Формулы, на которые есть ссылки в тексте, должны быть пронумерованы. Пронумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы ставится у правого края страницы в круглых скобках. Все ссылки в тексте на литературные источники даются на языке оригинала и нумеруются. Фамилии и названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский алфавит, пишутся в русской транскрипции. Номера

ссылок в тексте должны идти строго по порядку упоминания и быть заключены в квадратные скобки.

13. Список литературы составляется по порядку упоминания работ в тексте статьи. Для всех библиографических источников приводятся фамилии и инициалы всех авторов и полное название цитируемой работы.

Примеры оформления библиографического описания

Для монографий:

Кореньков Д.А. Методы применения изотопа ¹⁵N в агрохимии. М.: Колос, 1977. 158 с.

Hewitt E.L. Plant mineral nutrition. London: The English University Press, 1974. 219 p.

Для сборников:

Clarkson D.T. Regulation of the absorbtion and release of nitrate by plant cell: a review of current ideas and methodology // Fundamental, ecological and agricultural aspect of nitrogen metabolism in higher plants. Dordrecht; Boston; Lancaster: Martinus Nijhoff Publishes, 1986. P. 3–27.

Ловцова Н.М. Влияние регуляторов роста на интенсивность дыхания укореняющихся зеленых черенков облепихи // Ростовые процессы и их регуляция / Под ред. Якушкиной Н.И. М.: МОПИ, 1992. С. 98—101.

Ладонин В.Ф., Посмитная Л.В., Петросян А.Г. К вопросу оценки загрязнения зерна озимой пшеницы в условиях комплексного применения средств химизации // Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов". Пущино, 1988. С. 177.

Для трудов:

Варзунова T.A. Влияние минеральных удобрений на урожай зерна горохоовсяной смеси // Тр. Сев.-Зап. ВНИИ молоч. и лугопастб. хоз-ва. 1971. Вып. 6. С. 17—20.

Булгакова Н.Н. Влияние дозы азота на включение в метаболизм нитрата запасного фонда при разных условиях выращивания // Бюл. ВИУА. № 112. 1999. С. 10-11.

Для журналов:

Монастырский О.А. Факторы эволюции высокотоксичных штаммов рода *Fusarium* в агроценозе // С.-х. биология. 1998. № 1. С. 28—34.

Baer R.G., Collet F.G. In vivo determination of parametres of nitrate utilization in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings grown with low concentration of nitrate in the nutrient solution // Plant Physiol. 1981, V. 68, № 6, P. 1237–1243.

Для авторефератов и диссертаций:

Глянько А.К. Реакция растительного организма на азотное питание и температуру среды (физиолого-экологические механизмы): Дис. ... д-ра биол. наук в форме научн. докл. Иркутск, 2000. 56 с.

Котлярова Т.И. Особенности усвоения азота корнями и листьями разных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФР АН СССР, 1987. 22 с.

Для патентных документов:

Шаповалов А.А., Таци В.П., Пуцын Ю.Г. Соли 1-фенил-3-(1,2,4-триазол-4-ил) мочевины, обладающие свойством регуляторов роста растений: А. с. 1732651 (РФ) // Б.И. 1992. № 14. С. 25.

Шаповалов А.А., *Пуцыкин Ю.Г.*, *Егоров Б.Ф.* Способ борьбы с сорными растениями, гербицидная композиция и синергист, повышающий активность гербицидов: Пат. 2130260, РФ // Б.И. 1998. № 5. С. 30.

- 15. Рукопись статьи направляется на рецензирование члену редколлегии журнала или ведущему специалисту в данной области исследований. Срок рецензирования статьи 1 месяц. Положительная рецензия достаточна для приема к публикации. Если в рецензии имеются замечания, рукопись отправляется автору на переработку. Сроки переработки статьи 4 месяца. Переработанную автором статью редакция направляет рецензенту на повторное рецензирование.
- 16. Статьи, оформленные без соблюдения изложенных правил, редакцией к рассмотрению не принимаются и возвращаются автору.
- 17. Рассылка оттисков опубликованных статей осуществляется в электронном виде на адрес электронной почты, указанный авторами для переписки.
- 18. Плата за публикацию рукописей не взимается.