

Номер 1

ISSN 0002-1881

Январь 2025



# АГРОХИМИЯ



НАУКА

— 1727 —

# СОДЕРЖАНИЕ

---

Номер 1, 2025

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

- Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при периодическом известковании  
*А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова, А. А. Иванов, А. В. Купреева, С. Ю. Разумовская, Э. М. Шихаметов* 3
- Сорбция калия засоленными почвами Западного Забайкалья  
*С. Б. Сосорова, М. Г. Меркушева, И. Н. Лаврентьева, Л. Н. Болонева* 11
- Влияние агрохимикатов на основе побочных продуктов животноводства, осадка сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы, продуктивность и макроэлементный состав зерновых культур  
*В. А. Касатиков, Н. П. Шабардина* 26

### Удобрения

- Эффективность серосодержащих удобрений при возделывании гороха в условиях черноземных почв Курской области  
*Ж. Н. Минченко, В. И. Лазарев* 31
- Применение азотных листовых подкормок для повышения урожайности томатов в условиях Астраханской области  
*Н. В. Тютюма, А. Н. Бондаренко* 39

### Регуляторы роста растений

- Участие жасмоновой кислоты в передаче сигналов из корней в побеги растений гороха в условиях засоления  
*Г. Р. Ахиярова, Г. Х. Вафина, А. В. Коробова, И. И. Иванов, А. Р. Гиниятуллин, Э. Р. Гаффарова, М. И. Гарипова, Г. Р. Кудоярова* 47

### Агроэкология

- Запасы, химический состав ветоши и войлока леймусовых сообществ (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) юга Восточного Забайкалья и оценка их устойчивости к разложению  
*М. Г. Меркушева, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева, Н. К. Бадмаева* 55

### Экотоксикология

- Диагностическое значение некоторых показателей азотного режима почв для оценки экологического состояния нефтезагрязненных почв  
*А. О. Герасимов, Ю. М. Поляк, Л. Г. Бакина* 66
- Содержание тяжелых металлов в агрочерноземе Южного Предуралья при внесении осадков сточных вод в качестве удобрения  
*О. А. Мелентьева, И. М. Габбасова, Т. Т. Гарипов, И. К. Хабиров* 75
- Влияние внесения удобрений и мелиоранта на подвижность тяжелых металлов в слоях чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого  
*С. В. Пугаев, Л. Н. Прокина* 81

### ОБЗОРЫ

- Современные способы применения пестицидов и методов их определения в сельскохозяйственной продукции  
*А. А. Брагин, А. Д. Базык, Н. А. Павлова* 89

# Contents

No. 1, 2025

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

- Changes in the Acid-Base Properties of Sod-Podzolic Light Loam Soil during Periodic Liming  
*A. V. Pasynkov, E. N. Pasynkova, A. A. Ivanov, A. V. Kupreeva,  
S. Yu. Razumovskaya, E. M. Shikhametov* 3
- Potassium Sorption by Saline Soils of Western Transbaikalia  
*S. B. Sosorova, M. G. Merkusheva, I. N. Lavrentieva, L. N. Bologneva* 11
- Effect of Agrochemicals Based on Animal by-Products, Sewage Sludge on the Nitrogen Regime of Sod-Podzolic Soil, Productivity and Macronutrient Composition of Cereals  
*V. A. Kasatikov, N. P. Shabardina* 26

### Fertilizers

- Effectiveness of Sulfur-Containing Fertilizers in the Cultivation of Peas in the Conditions of Chernozem Soils of the Kursk Region  
*J. N. Minchenko, V. I. Lazarev* 31
- Use of Nitrogen Leaf Fertilizing to Increase the Yield of Tomatoes in the Astrakhan Region  
*N. V. Tyutyuma, A. N. Bondarenko* 39

### Plant growth regulators

- Participation of Jasmonic Acid in the Long-Distance Signalling from Roots to Shoots of Peas Plants under Salinity  
*G. R. Akhiyarova, G. Kh. Vafina, A. V. Korobova, I. I. Ivanov, A. R. Giniyatullin, E. R. Gaffarova,  
M. I. Garipova, G. R. Kudoyarova* 47

### Agroecology

- Stocks, Chemical Composition of Grassland Litter and Felts of Leymus Communities (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) in the South of Eastern Transbaikalia and Assessment of Their Resistance to Decomposition  
*M. G. Merkusheva, L. N. Boloneva, I. N. Lavrentieva, N. K. Badmaeva* 55

### Ecotoxicology

- Diagnostic Value of Some Indicators of Soil Nitrogen Regime for Assessing the Ecological State of Oil-Pollutant Soils  
*A. O. Gerasimov, Yu. M. Polyak, L. G. Bakina* 66
- Content of Heavy Metals in Agrochernozem of the Southern Cis-Urals after Introduction of Sewage Sludge as a Fertilizer  
*O. A. Melentyeva, I. M. Gabbasova, T. T. Garipov, I. K. Khabirov* 75
- Effect of Fertilizers and Meliorants on the Mobility of Cd, Pb, Cu and Zn in Layers of Leached Heavy Loam Chernozem  
*S. V. Pugaev, L. N. Prokina* 81

## REVIEWS

- Modern Trends in the Use of Pesticides and Methods for Their Determination in Agricultural Products  
*A. A. Bragin, A. D. Bazyk, N. A. Pavlova* 89

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

УДК 631.414:631.445.24:631.821.1

## ИЗМЕНЕНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗВЕСТКОВАНИИ

© 2025 г. А. В. Пасынков<sup>1</sup>, Е. Н. Пасынкова<sup>1,\*</sup>, А. А. Иванов<sup>1</sup>,  
А. В. Купреева<sup>1</sup>, С. Ю. Разумовская<sup>1</sup>, Э. М. Шихаметов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ленинградский научно-исследовательский институт “Белогорка” – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха

188338 д. Белогорка, Гатчинский р-н, Ленинградская обл., Россия

\*E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

В полевом опыте в звене зернотравяного севооборота (ячмень с подсевом клевера и тимopheевки – многолетние травы первого и второго года пользования) изучили изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при периодическом известковании с целью установления оптимальных доз извести при ее длительном периодическом применении. Сравнение средних величин урожайности зерна ячменя и сена многолетних трав за 3 года опыта в вариантах с однократным и периодическим известкованием показало преимущество периодического внесения извести в дозе по 1.0  $H_r$ . В варианте с периодическим внесением извести по 1.0  $H_r$  кислотность была существенно ниже, чем в контроле и в вариантах с дозами 0.5 и 0.25  $H_r$ , при этом последние варианты по величине кислотности существенно не различались. Периодическое известкование приводило к существенному снижению содержания  $Al^{3+}$ , Fe и Mn. При этом отмечено существенное увеличение показателей  $S$  и  $V$  и снижение  $H_r$ . Каких-либо существенных изменений в содержании фосфора, калия и гумуса под действием периодического применения извести не установлено. Показали, что оптимальной дозой извести при периодическом ее применении является доза по 1.0  $H_r$ .

**Ключевые слова:** известь, дерново-подзолистая почва, периодическое известкование, кислотно-основные свойства почвы.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010014, **EDN:** VCVDFW

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что дерново-подзолистые почвы, как наиболее распространенные в Нечерноземье России, имеют сравнительно низкий естественный уровень плодородия и в большинстве случаев характеризуются кислой реакцией, сравнительно низким содержанием органического вещества и основных элементов минерального питания. Поэтому разработка и внедрение приемов их эффективного использования всегда имела особое значение. В последнее время важность эффективного использования дерново-подзолистых почв существенно возросла по причине наблюдающегося ускоренного процесса их деградации. Одной из основных причин сложившегося положения является практически полное прекращение работ по сохранению и повышению плодородия почв начиная с 1990-х гг. При этом известно, что применение извести, минеральных и органических удобрений на дерново-подзолистых почвах Нечерноземья

России является необходимым условием получения высоких и стабильных урожаев возделываемых культур с регламентируемыми ГОСТами или требуемыми потребителями технологическими качествами [1–8].

Выше было отмечено, что в настоящее время резко сократилось применение удобрений, а также и извести, поэтому возникает необходимость в разработке рациональной системы их применения, которая предотвратила бы резкое снижение урожая и способствовала сохранению созданного ранее уровня плодородия. То есть в сложившихся условиях важное значение приобретает вопрос об уточнении рекомендуемых ранее доз извести для максимального эффективного ее использования, что нашло свое отражение в работах последних лет [9–12]. При этом наиболее корректно данную задачу можно решить в условиях длительных стационарных полевых опытов [1–3, 5, 8, 9, 11]. Имея контрольный вариант без внесения извести и широкий интервал доз ее

применения в течение длительного времени, можно изучить не только влияние различных доз и кратности внесения извести на урожайность сельскохозяйственных культур, но и изменения широкого спектра кислотно-основных свойств дерново-подзолистых почв Нечерноземья.

Цель работы — сравнительная оценка эффективности различных доз извести при периодическом известковании дерново-подзолистой почвы.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в 2021–2023 гг. в длительном стационарном полевом опыте по изучению эффективности известкования, заложенном в 1957 г. Опыт признан достоянием российской сельскохозяйственной науки, включен в реестр “Географической сети опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами” и имеет аттестат длительного опыта № 001 (1999 г.). Схема опыта представляет собой контрольный вариант (без известкования) и 11 вариантов с различными дозами извести при однократном и периодическом ее применении. Размещение делянок — систематическое со смещением внутри каждого повторения, как это было принято в 1950-е гг. Повторность — четырехкратная. Более детально с результатами полувексовых исследований при проведении данного стационарного опыта можно ознакомиться в работах [2, 3]. В настоящей работе представлены результаты 3-летнего изучения кислотно-основных свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в 10-й ротации севооборота при периодическом и однократном применении извести в дозах, эквивалентных 1.0, 0.5 и 0.25  $H_r$ , как имеющих в настоящее время наиболее важное практическое значение [5].

Опыт проведен в звене зернотравяного севооборота со следующим чередованием культур: ячмень с подсевом клеверно-тимофеечной смеси (2021 г.), клевер + тимopheевка 1-го года пользования (2022 г.) и клевер + тимopheевка 2-го года пользования (2023 г.) на сено. В опыте высевали ячмень сорта Балтиец, клевер сорта Волосовский 86 и тимopheевку сорта Ленинградская 204 селекции Ленинградского НИИСХ.

Гидротермические условия, сложившиеся в период проведения полевого опыта, представлены в табл. 1, где фазы вегетации приведены для злакового компонента смеси. При этом фаза кущения тимopheевки совпадала с фазой начала роста и ветвления растений клевера, фаза трубкования — с фазой бутонизации бобовой культуры, а фазы цветения совпадали у обеих изученных культур.

В первый год гидротермические условия характеризовались резким недостатком влаги в вегетативный период растений ячменя (и соответственно, клевера

и тимopheевки, находящихся под его покровом) и избыточным увлажнением — в репродуктивный. Необходимо отметить, что значительная часть осадков выпала в последние дни перед наступлением фазы полной спелости ячменя. По этой причине существенного влияния выпавшие осадки на урожай зерна ячменя не оказали. Таким образом, резкий недостаток влаги, сочетающийся с повышенными температурами в вегетативный и недостаточное увлажнение в репродуктивный период ячменя, привели к получению низкого урожая зерна покровной культуры и сравнительно высокой гибели растений клевера, что в дальнейшем и обусловило преобладание растений тимopheевки в составе смеси. Следующий период: от уборки покровной культуры и до окончания осенней вегетации трав в этот год характеризовался, как и в первую половину вегетации, недостаточным увлажнением ( $ГТК = 0.84$ ).

Во второй год проведения опыта возобновление весенней вегетации началось в сроки, близкие к среднепогодным. Период: возобновление вегетации — трубкование характеризовался нормальным ( $ГТК = 1.25$ ), трубкование — колошение ( $ГТК = 0.85$ ) — недостаточным увлажнением, а в предуборочный период наблюдался резкий недостаток влаги. В следующий период (от уборки и до окончания осенней вегетации многолетних трав) наблюдалось избыточное увлажнение ( $ГТК = 3.04$ ).

В третий год возобновление весенней вегетации началось раньше среднепогодных значений на 1.5 недели. В начальный период вегетации наблюдалось недостаточное увлажнение, сочетающееся с пониженными температурами. В период трубкования — колошения наблюдался менее сильный, но тоже недостаток влаги ( $ГТК = 0.55$ ). В предуборочный период (третья декада июня и первая — июля 2023 г.) выпало значительное количество осадков, однако какого-либо существенного влияния на урожайность трав они не оказали. В целом период возобновления вегетации — уборка в третий год опыта можно охарактеризовать как засушливый ( $ГТК = 0.87$ ). Таким образом, гидротермические условия, сложившиеся в различные межфазные периоды, были не всегда благоприятными для роста и развития растений изучаемых культур и не способствовали формированию высокого уровня урожайности.

После учета урожая во все годы отбирали образцы почвы для исследования агрохимических показателей. Определение величины  $pH_{KCl}$  проведено потенциометрическим методом, содержания  $P_2O_5$  и  $K_2O$  — по методу Кирсанова, обменного  $Al^{3+}$  — по методу Соколова,  $H_r$  — по методу Каппена в модификации ЦИНАО,  $S$  — по методу Каппена,  $V$  — расчетным путем, содержание гумуса — по методу Тюрина [13]. Перечисленные выше аналитические работы, а также подвижность фосфатов (по методу

**Таблица 1.** Величина гидротермического коэффициента в период вегетации (ГТК по Селянинову)

Культура	Год	Период вегетации				
		П – К	К – Т	Т – Кол	Кол – ПС	П – ПС
Ячмень + многолетние травы	2021	0.62	0.60	0.19	1.83	0.93
		УПК – ОВ	ВВ – Т	Т – Кол	Кол – У	У – ОВ
Многолетние травы 1-го года пользования	2022	0.84	1.25	0.85	0.19	3.04
Многолетние травы 2-го года пользования	2023	—	0.29	0.55	1.43	—

Примечание. Ячмень: П – посев, К – кущение, Т – трубкование, Кол – колошение, ПС – полная спелость; многолетние травы (фазы приведены в соответствии со злаковой культурой): УПК – уборка покровной культуры, ОВ – окончание осенней вегетации, ВВ – возобновление весенней вегетации, У – уборка многолетних трав.

Карпинского–Замятиной) определяли методами [14] в отделе агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ. Содержание подвижных форм Fe и Mn проведено в соответствии с методом М-МВИ-80-2008, принятым в Агрохимслужбе России (ацетатно-аммонийный буфер pH 4.8), на атомно-абсорбционном спектрофотометре в аккредитованной лаборатории. Статистическую обработку полученных экспериментальных данных провели методом дисперсионного и регрессионного анализов по [15], в среднем за годы исследования – согласно [16] с использованием пакета статистических программ «Statistica 6» (Stat-Soft Inc., США).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано (табл. 2), что гидротермические условия, сложившиеся в период проведения полевого опыта, оказывали существенное влияние на уровень урожайности зерна ячменя и сена многолетних трав. В силу сложившихся гидротермических условий в первый год (2021 г.), урожай зерна ячменя в контроле составил лишь 0.71 т/га.

Периодическое внесение извести достоверно повышало урожайность зерна ячменя только при внесении ее по 1.0  $H_r$ . Во всех вариантах с однократным применением извести существенных изменений урожайности зерна ячменя по сравнению с контролем

**Таблица 2.** Урожайность сельскохозяйственных культур при периодическом и однократном известковании, т/га

Вариант	Урожайность, т/га			
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	средняя, т к.е./га
	ячмень + многолетние травы	многолетние травы (сено)		
		1-го года пользования	2-го года пользования	
1. Без известкования	0.71	3.76	3.27	1.40
2. Известкование по 1 $H_r$ *	0.89	4.54	4.07	1.72
3. Известкование по 1 $H_r$ **	0.79	3.99	3.56	1.51
4. Известкование по 0.5 $H_r$ *	0.82	4.07	3.36	1.50
5. Известкование по 0.5 $H_r$ **	0.74	3.67	3.17	1.38
6. Известкование по 0.25 $H_r$ *	0.77	4.02	3.38	1.48
7. Известкование по 0.25 $H_r$ **	0.68	3.52	3.15	1.33
Среднее в опыте	0.77	3.80	3.42	1.45
Среднее I	0.83	4.21	3.60	1.57
Среднее II	0.74	3.73	3.29	1.41
$HCP_{05}$	0.13	0.51	0.44	—

Примечания. 1. Среднее I – среднее в вариантах периодического известкования, Среднее II – среднее в вариантах однократного известкования. То же в табл. 3, 5. 2. Нумерация вариантов та же в табл. 3, 5.

\* Периодически.

\*\* Один раз за все время проведения полевого опыта.

не установлено. Сравнение средних величин урожайности зерна в вариантах с однократным и периодическим известкованием показало преимущество последнего: 0.74 и 0.83 т/га соответственно.

Во 2-й год только начальный период вегетации характеризовался нормальным увлажнением, однако, начиная с фазы трубкования и вплоть до учета урожая, наблюдали резкий недостаток влаги (табл. 1). Урожай сена многолетних трав в контрольном варианте составил 3.76 т/га. Периодическое внесение извести достоверно повышало урожайность сена по сравнению с контролем только в варианте по 1.0  $H_r$ , а однократное внесение извести не оказывало существенного влияния на урожайность сена. Сравнение средних величин урожайности сена в вариантах с однократным и периодическим известкованием показало преимущество периодического: 3.73 и 4.21 т/га соответственно.

В 3-й год опыта урожайность сена многолетних трав в среднем в опыте была меньше, чем во 2-й: 3.42 и 3.80 т/га соответственно. Урожайность сена в контрольном варианте в текущем году составила 3.27 т/га, т.е. была тоже меньше, чем в предыдущем году. Периодическое внесение извести по 1.0  $H_r$  достоверно повышало урожайность сена по сравнению с контролем. Однако при периодическом внесении извести в дозах 0.5 и 0.25  $H_r$  достоверной прибавки урожая сена по сравнению с контролем не получено. Возделывание многолетних трав при однократном внесении извести в изученных дозах не оказало существенного влияния на урожайность сена. То есть в оба года проведения полевого опыта в варьировании урожайности сена многолетних трав наблюдали одинаковые тенденции. Сравнение средних величин урожайности сена в вариантах с однократным и периодическим известкованием, как и в предыдущий год,

показало преимущество последнего: 3.29 и 3.60 т/га соответственно.

Необходимо отметить, что в годы проведения полевого опыта средние величины урожайности зерна ячменя и сена многолетних трав в вариантах с однократным известкованием были практически одинаковы с таковой в контроле. Иными словами, однократное применение извести закончило свое положительное влияние на урожайность изученных культур.

Расчет сбора кормовых единиц (к.е.) (ячмень — 1.15, сено — 0.48 к.е.) с единицы площади показал аналогичные тенденции, которые отмечены в варьировании урожайности изученных культур при периодическом и однократном применении извести. Определение ботанического состава смеси многолетних трав показало в оба года доминирующее положение тимopheевки, как известно, культуры, более устойчивой к засухе и кислотности. При сравнении средних величин доли тимopheевки, как менее ценной по отношению к клеверу культуры, в вариантах с однократным и периодическим известкованием в оба года проведения полевого опыта отмечено преимущество периодического: 89.3 и 83.6% — тимopheевка, 10.7 и 16.4% — клевер соответственно.

Ввиду того, что при проведении исследования агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы изменялись в одном и том же направлении, ниже приведен анализ их усредненных показателей за 3-летний период.

Данные, представленные в табл. 3, показали, что действие извести при периодическом ее внесении продолжается до настоящего времени.

Во всех вариантах с периодическим известкованием почва характеризовалась как среднекислая, в вариантах с однократным ее применением и в контроле

**Таблица 3.** Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при известковании (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант, №	рН	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mn	Fe	Гумус, %	ПФ*, мг/л	Al <sup>3+</sup>	S	H <sub>г</sub>	V, %
		мг/кг						мг/100 г	ммоль/100 г		
1	4.25	254	116	24	40	3.23	0.95	0.63	7.6	3.59	67.9
2	4.65	237	112	16	19	3.26	1.06	0.20	9.6	3.03	76.0
3	4.22	260	120	21	34	3.01	0.99	0.87	5.7	3.93	59.2
4	4.49	254	110	15	19	2.86	1.03	0.29	8.8	3.24	73.1
5	4.14	237	113	22	34	2.98	0.98	1.06	5.9	4.18	58.5
6	4.52	243	113	17	24	3.21	0.95	0.39	6.0	3.48	63.3
7	4.13	250	117	20	43	3.12	0.95	1.31	5.1	4.01	56.0
Среднее	4.34	248	115	19	30	3.10	0.99	0.68	7.0	3.64	64.9
Среднее I	4.55	245	112	16	21	3.11	1.01	0.29	8.1	3.25	70.8
Среднее II	4.16	249	117	21	37	3.04	0.97	1.08	5.6	4.04	57.9
НСП <sub>05</sub>	0.09	19	12	4	10	0.26	0.04	0.19	1.7	0.20	4.7

\* ПФ — подвижность фосфатов.

она находилась уже в градации сильнокислой. В варианте с периодическим внесением извести по 1.0  $H_r$  кислотность была существенно ниже, чем в контроле и в вариантах с дозами 0.5 и 0.25  $H_r$ , при этом последние по величине кислотности существенно не различались. Необходимо отметить, что в вариантах с дозами извести 0.5 и 0.25  $H_r$  при однократном применении кислотность уже была существенно выше, чем в контроле. При сравнении средних величин pH в вариантах с однократным и периодическим известкованием отмечено существенное снижение кислотности при проведении периодического внесения извести. В обоих случаях, чем меньше была доза извести, тем выше кислотность почвы.

Исследование показало, что каких-либо существенных изменений в содержании фосфора, калия и гумуса под действием периодического и однократного применения извести на данный момент проведения полевого опыта не установлено. Однако следует отметить устойчивую тенденцию к повышению содержания фосфора и калия и к снижению — содержания гумуса в варианте с однократным известкованием по сравнению с периодическим в дозе 1.0  $H_r$ . Вероятно, это связано с увеличением выноса этих элементов минерального питания более высокими урожаями в варианте с периодическим известкованием. Аналогичное явление было отмечено уже и в более ранний период проведения данного полевого опыта [2, 3].

По сравнению с контролем сумма поглощенных оснований ( $S$ ) и степень насыщенности ( $V$ ) ими была существенно больше, а гидролитическая кислотность ( $H_r$ ) — достоверно ниже в вариантах с периодическим внесением извести по 1.0 и 0.5  $H_r$ . При этом существенных различий по величине  $S$ ,  $V$  и  $H_r$  при внесении извести по 0.25  $H_r$  по сравнению с контролем не обнаружено. Во всех вариантах с однократным известкованием каких-либо существенных изменений  $S$  по сравнению с контролем не установлено, а величина  $H_r$  в данном случае была достоверно больше, а  $V$  — меньше при всех уровнях применения извести. При сравнении средних величин  $S$ ,  $V$  и  $H_r$  в вариантах с однократным и периодическим известкованием отмечено существенное повышение показателей  $S$  и  $V$  и снижение величины  $H_r$  при периодическом применении извести.

В работах [1–3] показано, что доминирующую роль в формировании кислотности дерново-подзолистых почв играет обменный  $Al^{3+}$ . Определение содержания обменного  $Al^{3+}$  в почве показало, что во всех 3-х вариантах при периодическом известковании его содержание существенно было меньше, чем в контроле. При этом все варианты с периодическим известкованием в дозах по 1.0, 0.5 и 0.25  $H_r$  между собой по содержанию обменного  $Al^{3+}$  существенно не различались. Определение содержания обменного  $Al^{3+}$  в почве в вариантах с однократным известкованием показало, что во всех вариантах оно

содержание было существенно больше, чем в контроле. При этом варианты с известкованием в дозе по 1.0 и 0.5  $H_r$  по содержанию  $Al^{3+}$  между собой существенно не различались, в варианте с внесением извести по 0.25  $H_r$  отмечено максимальное содержание  $Al^{3+}$  в опыте (1.31 мг/100 г почвы), что было существенно больше, чем при проведении известкования более низкими дозами. При сравнении средних величин содержания обменного  $Al^{3+}$  в вариантах с однократным (1.08) и периодическим (0.29 мг/100 г почвы) известкованием отмечено существенное (более чем в 3.5 раза) его снижение при периодическом.

Выше было отмечено, что доминирующую роль в формировании кислотности дерново-подзолистых почв играет обменный  $Al^{3+}$ , значительно меньшая роль принадлежит Fe и Mn. Поэтому одной из задач проведенного исследования, кроме определения обменного  $Al^{3+}$ , являлось определение содержания подвижных форм Fe и Mn. Показано, что в контрольном варианте содержание Fe составляло 40, Mn — 24 мг/кг. Практически такое же их содержание отмечено и в вариантах с однократным известкованием: 37 и 21 мг/кг почвы. Периодическое известкование приводило к существенному снижению содержания подвижных форм как Fe, так и Mn, при этом в абсолютном выражении сильнее снижалось содержание подвижных форм Fe, чем Mn.

При проведении исследования кислотно-основных свойств почв определенный интерес представляют зависимости между ними. Однако для выявления зависимости какого-либо показателя плодородия почв ( $Y$  — зависимая) от величины pH ( $X$ , ед. — независимая переменная) рекомендуется перевод зависимой переменной в логарифмы (lg), т.к. показатель pH по своей сути является логарифмом [2, 3]. По этой причине какие-либо зависимости, в которых показатель pH служит в качестве зависимой или независимой переменной, будут иметь следующий вид:  $lg Y = a_0 + b \cdot X(pH)$  или  $Y(pH) = a_0 + b \cdot lg X$  [17].

Проведение регрессионного анализа показало [17], что содержание обменного  $Al^{3+}$  и подвижных форм Fe и Mn ( $lg Al^{3+}$ ,  $lg Fe$  и  $lg Mn$  соответственно) было статистически значимо на принятом в агрохимических исследованиях уровне значимости ( $p < 0.05$ ) связано с величиной  $pH_{КС}$ . При этом более тесно с содержанием  $Al^{3+}$  и менее тесно — с содержанием Mn ( $R^2 = 0.870$  и  $0.672$  соответственно). Отмеченное выше свидетельствовало о том, что кислотность почвы не определяется только количеством ионов  $Al^{3+}$ , а является комплексным показателем, о чем более детально показано ранее в работах [1–3].

Данные, представленные в табл. 4, показали, что содержания Fe и  $Al^{3+}$ , а также Fe и Mn были связаны тесной положительной зависимостью. При этом содержание Fe более тесно связано с содержанием Mn, чем  $Al^{3+}$ , а зависимость содержания Mn



от содержания  $Al^{3+}$  в почве оказалась незначимой. Возможно, это было связано со сравнительно малым количеством наблюдений или узким интервалом варьирования зависимой и независимой переменных [17]. По этой причине возникла необходимость увеличения общего количества наблюдений в последующий период проведения исследования.

Кроме определения содержания подвижного фосфора по методу Кирсанова (количественный фактор), одной из задач исследования являлось определение степени подвижности фосфатов (ПФ) (фактор интенсивности). В работах [2, 3, 18] отмечено повышение подвижности фосфатов при уменьшении кислотности дерново-подзолистой почвы, происходящих при ее известковании.

Проведение статистической обработки полученных данных с общим числом наблюдений  $n = 48$  позволило получить уравнение регрессии, отражающее зависимость подвижности фосфатов ( $lg Y$ ) от величины кислотности почвы ( $X$ , ед. рН). На рис. 1 в пределах полученных экспериментальных данных представлено уравнение регрессии и графическое изображение полученной зависимости.

При этом интервал варьирования величины рН составил 4.05–5.32, а подвижности фосфатов – 0.94–1.38 мг/л ( $lg$ : –0.027...+0.140 соответственно). Известно, что  $lg 10$  равен 1,  $lg 1$  – нулю, а при величинах  $< 1$  десятичный  $lg$  – отрицательный.

Необходимо отметить, что хотя в разработанном уравнении коэффициент корреляции и значим на принятом в агрохимических исследованиях уровне  $p < 0.05$  (при  $n = 48$   $r_{крит} = 0.285$ ), однако сравнительно низкая его величина и, соответственно, коэффициента детерминации ( $R^2$ ) позволяют сделать предположение о том, что на величину подвижности фосфатов, кроме статистически значимого влияния кислотности (рН), оказывали существенное влияние, вероятно, и другие, неучтенные в данном случае факторы.

Известно, что одним из основных показателей уровня плодородия пахотных почв, как и их целинных аналогов, является содержание общего азота ( $N_{общ}$ ). Это положение очень важно для дерново-подзолистых почв, т.к. азот в них находится в первом минимуме [19]. Поэтому одной из задач исследования являлось определение содержания  $N_{общ}$  в почве и его фракционного состава в зависимости от доз

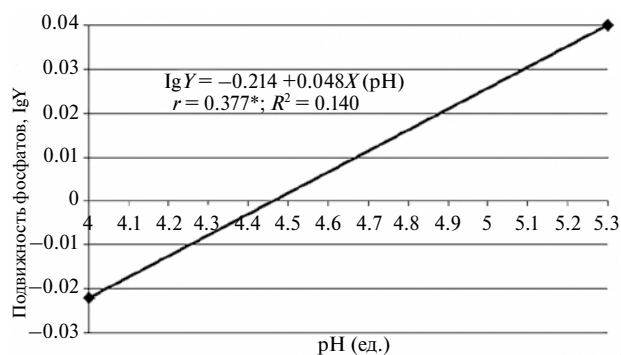


Рис. 1. Зависимость подвижности фосфатов ( $lg Y$ ) от величины рН ( $X$ , ед.).

и кратности применения извести, т.к. исследование фракционного состава азота почвы за весь период проведения данного полевого опыта не проводили.

Данные, представленные в табл. 5, показали, что большая часть азота в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве была представлена негидролизуемой фракцией (66.7–77.0%), т.е. азотом битумов, гуминов, меланинов и необменным аммонием [20].

Фракции трудногидролизуемого и легкогидролизуемого азота, в меньшей степени доступные для растений, составляют 14.9–21.0% и 6.9–10.7% соответственно, а фракция минерального азота, непосредственно используемая в питании растений, – лишь 1.24 – 1.58%.

Исследование показало, что содержание  $N_{общ}$  в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве варьировало в пределах 1280–1960 мг/кг. При этом из 3-х вариантов с периодическим известкованием только в варианте с внесением извести по 1.0  $H_r$  отмечено существенное повышение его содержания по сравнению с контролем. Однократное известкование по 1.0 и 0.5  $H_r$  не оказывало, а применение извести по 0.25  $H_r$  – существенно снижало содержание  $N_{общ}$  в почве. При этом существенных различий между периодическим и однократным известкованием по содержанию  $N_{общ}$  в указанных выше дозах применения извести не установлено.

Исследование показало, что наиболее важная и непосредственно используемая в питании растений фракция минерального азота составляла небольшую

Таблица 4. Взаимосвязи содержания обменного  $Al^{3+}$  и подвижных форм Fe и Mn

Уравнение регрессии	$r$	$R^2$
$Y(Fe) = 21.101 + 14.011X(Al^{3+})$	0.780*	0.609
$Y(Mn) = 17.303 + 2.979X(Al^{3+})$	0.486	0.236
$Y(Fe) = -18.521 + 2.538X(Mn)$	0.867*	0.752

\* Статистически значимо при  $p < 0.05$ . То же на рис. 1.

**Таблица 5.** Содержание общего азота и его различных фракций в пахотном слое (0–20 см) дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы

Вариант, №	$N_{\text{общ}},$ мг/кг	$N_{\text{min}}$		$N_{\text{лг}}$		$N_{\text{тг}}$		$N_{\text{н}}$	
		мг/кг	% от $N_{\text{общ}}$	мг/кг	% от $N_{\text{общ}}$	мг/кг	% от $N_{\text{общ}}$	мг/кг	% от $N_{\text{общ}}$
1	1680	20.7	1.24	116	6.9	249	14.9	1290	77.0
2	1960	27.5	1.40	183	9.3	297	15.2	1450	74.1
3	1750	25.9	1.48	146	8.3	286	16.3	1290	73.8
4	1750	27.0	1.55	165	9.5	274	15.7	1280	73.3
5	1680	25.0	1.49	144	8.6	270	16.1	1240	73.8
6	1560	23.5	1.51	140	9.0	270	17.4	1120	72.1
7	1280	20.1	1.58	137	10.7	268	21.0	850	66.7
Среднее	1660	24.2	1.46	147	8.9	273	16.7	1220	73.0
Среднее I	1750	26.0	1.49	163	9.3	280	16.1	1280	73.2
Среднее II	1570	23.7	1.52	142	9.2	275	17.8	1130	71.4
$HCP_{05}$	240	5.2	—	37	—	$F_9 < F_T$	—	$F_9 < F_T$	—

Примечание.  $N_{\text{min}}$  — содержание минерального азота ( $\Sigma N-NH_4 + N-NO_3$ ),  $N_{\text{лг}}$ ,  $N_{\text{тг}}$  и  $N_{\text{н}}$  — соответственно содержание легкогидролизующего, трудногидролизующего и негидролизующего азота. То же в тексте.

часть азотного фонда дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и была равна 1.24–1.58% от содержания  $N_{\text{общ}}$ . По сравнению с контролем только в вариантах с периодическим известкованием по 1.0 и 0.5  $H_T$  отмечено существенное повышение содержания минерального азота. В варианте с периодическим и однократным известкованием в дозе по 0.25  $H_T$  достоверных различий в содержании минерального азота по сравнению с контролем не отмечено.

Определение содержания легкогидролизующего азота показало, что по сравнению с контролем только в вариантах с периодическим известкованием по 1.0 и 0.5  $H_T$  отмечено существенное повышение его содержания. Возможно, отмеченное выше существенное повышение содержания общего, минерального и легкогидролизующего азота было связано с тем, что в известкованных почвах усиливалась мобилизация запасов азота и активизировалась деятельность нитрифицирующих и азотфиксирующих микроорганизмов [3]. По сравнению с контролем не отмечено достоверных различий в содержании легкогидролизующего азота в варианте с периодическим и однократным известкованием по 0.25  $H_T$ . То есть в изменении содержания легкогидролизующего азота наблюдали тенденции, аналогичные изменениям в содержании минерального азота.

Содержание трудногидролизующего азота варьировало в пределах 249–297 мг/кг и составляло 14.9–21.0% от содержания  $N_{\text{общ}}$ . При этом его содержание, как и содержание негидролизующего азота, не зависело от сроков и кратности применения извести ( $F_9 < F_T$ ). Фракция негидролизующего азота, определяемая как разность между содержанием  $N_{\text{общ}}$  в почве и суммой 3-х фракций ( $N_{\text{min}} + N_{\text{лг}} + N_{\text{тг}}$ ), составляла в среднем

1280 мг/кг, или 73.2% от его содержания. При этом следует отметить тенденцию к возрастанию содержания трудногидролизующего азота при периодическом известковании и тенденцию к снижению его негидролизующей фракции по сравнению с контрольным, а также с вариантами с однократным внесением извести.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая уровень продуктивности звена зернотравяного севооборота и основные тенденции к изменению кислотно-основных свойств, содержания общего азота и его фракционного состава, основных элементов минерального питания и гумуса дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, оптимальной дозой извести при периодическом ее внесении является доза по 1.0  $H_T$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленев Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
2. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.
3. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ЛНИИСХ РАСХН, 2010. 354 с.
4. Митрофанова Е.М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и последствия извести на фосфатный режим дерново-поверхностно-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2016. № 7. С. 36–43

5. Чекмарев П.А., Купреев Е.М., Ермаков А.А. К проблеме кислотности почв Нечерноземной зоны Российской Федерации // Достиж. науки и техн. АПК. 2017. № 31(7). С. 14–19.
6. Сорокин И.Б., Сиротина Е.А. Известкование — один из факторов повышения плодородия почв Томской области // Агрохим. вестн. 2019. № 1. С. 7–10. DOI: 1024412/0235-2516-2018-10057
7. Некрасов Р.В., Овчаренко М.М., Аканова Н.И. Агроэкологические основы химической мелиорации почв // Земледелие. 2019. № 4. С. 3–8.
8. Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Влияние минеральных удобрений на фоне последствия известности на продуктивность многолетних трав в условиях республики Коми // Агрохим. вестн. 2023. № 6. С. 24–28. DOI: 1024412/1029-2551-2023-6-004
9. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
10. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шафрина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2016. № 7. С. 3–11.
11. Корченкина Н.А., Гувеннов А.И., Богомолова Ю.А., Махалов Р.М. Последствие известкования и длительного внесения удобрений на динамику физико-химических свойств светло-серой лесной почвы // Агрохим. вестн. 2017. № 5. С. 2–6.
12. Окорков В.В., Шукин И.М., Окоркова Л.А., Шуккина В.И., Козлов А.А. О приоритетности и нужждаемости в известковании кислых почв Владимирской области // Владимир. земледелец. 2022. № 4(102). С. 32–38. DOI: 1024412/2225-2584-2022-4-32-38
13. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
14. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 202–203.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1968. С. 90–92.
16. Афанасьев Р.А. К методике дисперсионного анализа результатов многолетних полевых опытов // Агрохимия. 2004. № 5. С. 85–91.
17. Пасынков А.В., Пасынкова Е.Н. Особенности использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях // Агрохимия. 2022. № 10. С. 71–83. DOI: 10.31857/S0002188122100088
18. Адрианов С.Н. Формирование фосфатного режима дерново-подзолистых почв в разных системах удобрения. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.
19. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
20. Пискунов А.С. Азот почвы и эффективность азотных удобрений на зерновых культурах в Предуралье. Пермь: Пермский СХИ, 1994. 168 с.

## Changes in the Acid-Base Properties of Sod-Podzolic Light Loam Soil during Periodic Liming

A. V. Pasyнков<sup>a</sup>, E. N. Pasynkova<sup>a, #</sup>, A. A. Ivanov<sup>a</sup>, A. V. Kupreeva<sup>a</sup>, S. Yu. Razumovskaya<sup>a</sup>, E. M. Shikhametov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Leningrad Scientific Research Institute of Agricultural “Belogorka” — Branch of the A.G. Lorch Federal Research Center of Potato,

Gatchinsky district, Leningrad region, d. Belogorka 188338, Russia

<sup>#</sup>E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

In a field experiment in the link of the grain-grass crop rotation (barley with sowing of clover and phleum — perennial grasses of the 1st and 2nd year of use), changes in the acid-base properties of sod-podzolic light loamy soil during periodic liming were studied in order to establish optimal doses of lime with its long-term periodic use. A comparison of the average yields of barley grain and hay of perennial grasses over 3 years of testing in variants with single and periodic liming showed the advantage of periodic lime application in a dose of 1.0  $H_a$ . In the variant with periodic lime application of 1.0  $H_a$ , the acidity was significantly lower than in the control and in the variants with doses of 0.5 and 0.25  $H_a$ , while the latter variants did not differ significantly in terms of acidity. Periodic liming led to a significant decrease in the content of  $Al^{3+}$ , Fe and Mn. At the same time, there was a significant increase in  $S$  and  $V$  indicators and a decrease in  $H_a$ . No significant changes in the content of phosphorus, potassium and humus under the influence of periodic application of lime have been established. It was shown that the optimal dose of lime for its periodic use is 1.0  $H_a$ .

**Keywords:** lime, sod-podzolic soil, periodic liming, acid-base properties of the soil.

## СОРБЦИЯ КАЛИЯ ЗАСОЛЕННЫМИ ПОЧВАМИ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ<sup>§</sup>

© 2025 г. С. Б. Сосорова<sup>1,\*</sup>, М. Г. Меркушева<sup>1</sup>, И. Н. Лаврентьева<sup>1</sup>,  
Л. Н. Болонева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670004 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

\*E-mail: soelma\_sosorova@mail.ru

Впервые в статических условиях изучена сорбция калия засоленными почвами Западного Забайкалья и дана количественная оценка ее параметров. Установлено, что уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха удовлетворительно описывают адсорбцию калия изученными почвами. Показано, что максимальная сорбционная емкость почв ( $A_{\max}$ ) в отношении калия менялась в пределах 5.1–137 мМ  $K^+$ /кг, что указывало на различие сорбционных мест. Выявлена относительно высокая сорбция  $K^+$  солончаками глеевым и типичным. Величина  $A_{\max}$  в гумусовых горизонтах изменялась в 2.6 раза, в нижележащих – в 15.6 раза и была минимальной в солончаке квазиглеевом. Константа адсорбционного равновесия ( $K_L$ ) варьировала в широком диапазоне от 0.32 до 26.8 л/мМ с меньшими показателями в гумусовых горизонтах, что свидетельствовало о менее прочном связывании в них калия. Величины коэффициента емкости уравнения Фрейндлиха ( $K_F$ ) составляли в гумусовом горизонте от 3.1 до 91 л/кг = мМ  $K^+$ /кг, в минеральных – от 3.2 до 69.5. Высокие величины коэффициента распределения ( $K_d$ ) были характерны для солончака глеевого и низкие – квазиглеевого (4.28–184 л/кг). Относительно высокая величина максимальной буферной емкости по отношению к калию (МБЕК) выявлена в солончаках глеевом и типичном, относительно минимальная – в квазиглеевом. По способности сорбировать калий засоленные почвы Западного Забайкалья образовали следующий убывающий ряд (средневзвешенное в слое 0–30 см): солончак глеевый > солончак типичный > аллювиальная светлогумусовая засоленная > солончак соровый > солончак темный > солончак квазиглеевый. Четкой корреляции между параметрами адсорбции калия с некоторыми показателями свойств почв не выявлено. Наблюдали лишь слабую зависимость поглощения ионов калия от реакции почвенной среды и содержания физической глины.

**Ключевые слова:** калий, сорбция, почва, Забайкалье, солончаки.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010027, **EDN:** VCSZEK

### ВВЕДЕНИЕ

Калий наряду с азотом и фосфором является важнейшим элементом минерального питания растений. Его физиологическая роль весьма многообразна. Он принимает активное участие в регулировании физического состояния коллоидов клетки, в процессах метаболизма, в работе ферментативных систем, повышении морозоустойчивости культур [1, 2]. Доступность калия растениям зависит от превращения его подвижных и неподвижных форм в почвах, т.е. процессов мобилизации и иммобилизации питательного элемента. Выраженность этих процессов определяется рядом факторов: типом почвы, степенью насыщенность ее калием, минералогическим

составом, содержанием илстой фракции и энергии связи калия с гранулометрическими фракциями, внесением удобрений, фиксирующей способностью почв, а также их водным режимом.

В почве калий практически целиком представлен минеральными соединениями, и его количество варьирует от 0.01 до 3%  $K_2O$ . Источники калия – калиевые полевые шпаты (ортоклаз и микроклин), мусковит, биотит, вторичные глинистые минералы, такие как иллиты, вермикулиты, хлориты и смешанослойные минералы [3].

Современные исследования показали, что значительные запасы калия в почвах и динамическое равновесие между различными его формами затрудняют выбор показателей, характеризующих способность почвы обеспечить калийное питание растений [4–6]. Несмотря на то, что в Забайкалье калийное состояние

<sup>§</sup> Работа выполнена в рамках госзадания № 0271-2021-0004, FWSM-2021-0004.

почв, а также процессы превращения и динамики его соединений изучены достаточно полно в автоморфных и пойменных почвах [7–13], данных о сорбционной способности почв региона по отношению к калию крайне мало [14, 15], тогда как показатели адсорбции–десорбции наряду с другими характеристиками являются основой для продуктивного регулирования плодородия почв [6], в том числе и засоленных. Соленакпление и повышение концентраций натрия оказывает неоднозначное воздействие на поглощение ионов калия. Токсическое действие ионов натрия связывают с тем, что они конкурируют с  $K^+$ , которые необходимы для осморегуляции, фотосинтеза, синтеза белка и других ключевых процессов жизнедеятельности растений [16–19]. Наряду с накоплением в растениях ионов натрия нарушение ионного гомеостаза при засолении происходит в результате снижения концентрации ионов калия в растениях [20]. Однако благодаря высокой селективности и активности калиевых каналов концентрация  $K^+$  на несколько порядков превышает содержание  $Na^+$  в цитоплазме клеток растений, что необходимо для нормального хода многих физиологических процессов и солеустойчивости растений. Вместе с тем засоление создает проблемы с поглощением калия из растворов с его низкой концентрацией. Поскольку в природных условиях содержание калия в почвенном растворе часто бывает довольно низким (обычно 0.3–5.0 мМ, но может снижаться до 1 мкМ), засоление приводит к его дефициту в растениях [21]. Считается, что именно дисбаланс между концентрацией ионов калия и натрия, а не накопление ионов натрия как таковое, объясняет отрицательное действие засоления на растения [20].

Общая площадь засоленных почв в России, по подсчетам [23], составила 66.441 млн га (3.9% от земельного фонда РФ), из них на сельскохозяйственные угодья приходится 39.2 млн га, или 21.4% от площади сельскохозяйственных угодий. По данным [24], 4.5 млн га засоленных почв заняты под пашни. Солончаки на территории России распространены в аридных зонах Поволжья, Северного Кавказа, юга Западной и Восточной Сибири. Каждый регион характеризуется определенными провинциальными особенностями их свойств и химизма засоления [25].

В Западном Забайкалье солончаки занимают надпойменные террасы, незаливаемые равнинные и прибрежные территории, прилегающие к содово-солевым озерам, а также пониженные участки пойм с неглубоким залеганием минерализованных грунтовых вод, а процессы соленакпления в них имеют специфические особенности. В сухостепной зоне наиболее распространены сульфатный, сульфатно-содовый, сульфатно-хлоридно-содовый, хлоридно-сульфатно-содовый и содовый типы засоления этих почв [26]. Общая их площадь в структуре почвенного покрова сельскохозяйственных угодий

Республики Бурятия составляет 27.17 тыс. га. Основное использование солончаков – пастбищное (79.5%) и сенокосное – 11.9% [27]. В то же время они наряду с каштановыми почвами являются приоритетными объектами охраны почв согласно Национальной стратегии сохранения биоразнообразия РФ [28]. В этой связи актуальным является экологически безопасное, агрохимически и экономически эффективное их использование, в частности с применением калийных удобрений. Для разработок их доз должны быть учтены все свойства почв, в том числе сорбционные.

Цель работы – изучение сорбционных свойств засоленных почв Западного Забайкалья по отношению к ионам калия.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования – солончаки сорový, типичный, темный, квазиглеевый, глеевый и аллювиальная светлогумусовая засоленная почва, формирующиеся в днищах мезозойских котловин забайкальского типа геоморфологической области Забайкальского среднегорья: Удинской, Иволгинской, Оронгойской, Гусиноозерской, Боргойской [27].

Исследование проводили в 2010–2012, 2022 гг. в сухостепной зоне на территории Заиграевского, Селенгинского, Иволгинского и Джидинского административных районов Республики Бурятия (рис. 1).

Классификация почв дана согласно [29] и рекомендациям [30].

Разрез 14 (h – 564 м над ур.м., 52°02.252' с.ш., 108°36.640' в.д.) заложен на берегу о. Гуджирное (Заиграевский р-н). Растительность отсутствует. Почва – солончак сорový содово-хлоридно-сульфатный (Sodic Solonchaks (Alcalic, Arenic, Sulfatic)).

Разрез 13 (h – 554 м над ур.м., 52°01.857' с.ш., 108°25.201' в.д.) заложен в 200 м на запад от разреза 1

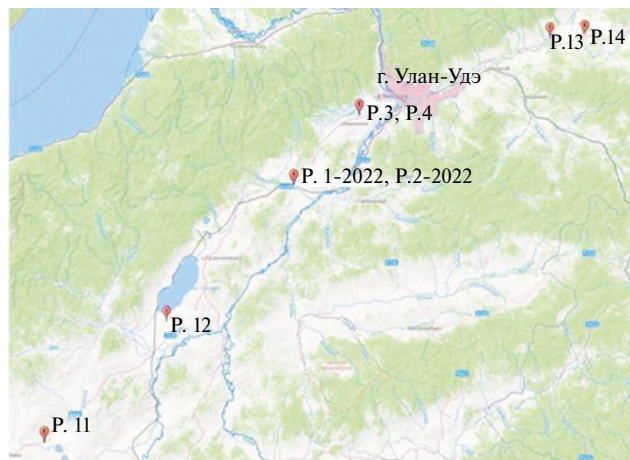


Рис. 1. Картограмма расположения почвенных разрезов.



под чиево-разнотравным сообществом. Почва — солончак типичный хлоридно-сульфатно-содовый (Calcic Sodic Solonchaks).

Разрез 4 (h — 505 м над ур.м., 51°46.375' с.ш., 107°22.845' в.д.) заложен в окрестностях улуса Хубисхал Иволгинского р-на в 300 м на В-ЮВ от фермы под чиевым сообществом. Почва — аллювиальная светлогумусовая засоленная (Fluvisols (Albic, Salic)).

Разрез 3 (h — 505 м над ур.м., 51°46.423' с.ш., 107°22.828' в.д.) заложен в окрестностях улуса Хубисхал Иволгинского р-на в 300 м от разреза 4 под чиевым сообществом. Почва — аллювиальная светлогумусовая засоленная (Fluvisols (Albic, Salic)).

Разрез 5 (Р. 2—2022 г.) (h — 562 м над ур.м., 51°32.722' с.ш., 107°2.592' в.д.) заложен у правого борта о. Белое (Иволгинский р-н) под чиево-твердоватоосоково-разнотравным сообществом. Почва — солончак квазиглеевый сульфатный (Solonchaks (Loamic, Sulfatic)).

Разрез 1 (Р. 1—2022 г.) (h — 493 м над ур.м., 51°32.16' с.ш., 107°01.350' в.д.) заложен в 100 м на восток от Итигиловского источника на равнине, прилегающей к о. Белому (Иволгинский р-н), под ирисово-чиево-твердоватоосоковым сообществом. Почва — солончак типичный сульфатно-хлоридно-содовый (Calcic Sodic Solonchaks (Loamic, Carbonatic)).

Разрез 12 (h — 549 м над ур.м., 51°4.162' с.ш., 106°19.746' в.д.) заложен в пойме р. Баян-Гол (Селенгинский р-н) под ирисово-китайсколеймусовым сообществом. Почва — солончак темный сульфатный (Solonchaks (Arenic, Sulfatic, Humic)).

Разрез 11 (h — 639 м над ур.м., 50°39.221' с.ш., 105°39.631' в.д.) заложен на северном берегу о. Каменный ключ (Джидинский р-н) в 150 м от уреза воды под солончаковоползунковым сообществом. Почва — солончак глеевый хлоридно-сульфатно-содовый (Sodic Gleyic Solonchaks (Loamic, Carbonatic)).

Изучение свойств и состава засоленных почв осуществляли общепринятыми в почвоведении химическими и физико-химическими методами [31]. Характеристика некоторых свойств почв представлена в табл. 1 и ранее опубликованных работах [32, 33].

Почвы характеризовались щелочной и сильнощелочной реакцией среды, вариабельностью гранулометрического состава, емкости катионного обмена, содержания карбонатов, подвижного фосфора и калия. Содержание гумуса и азота было низкое. Почвы также различались по степени и химизму засоления.

Сорбционная функция засоленных почв, согласно бальной оценке с учетом таких показателей, как ЕКО и мощность гумусового горизонта [34], оценивалась от очень низкой (<4 баллов — солончак сорный, глеевый и квазиглеевый) до средней (5 баллов — солончак типичный, темный), аллювиальной

светлогумусовой засоленной почвы — низкой (4 балла).

Сравнительное исследование сорбции ионов калия почвой проведено из раствора KCl в статических условиях. Использован водный раствор KCl в концентрациях 0.25, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 ммоль(мМ)/л в соотношении почва : раствор = 1 : 10. Для этого 3 г навески воздушно-сухой почвы, просеянной через сито d = 1 мм, заливали 30 мл водного раствора KCl при комнатной температуре, равной  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ . Время взаимодействия — 24 ч. Суспензии фильтровали с использованием фильтровальной бумаги “синяя лента”. Определение концентрации  $\text{K}^+$  проводили методом пламенной фотометрии. Количество сорбированного калия было вычислено по разности его содержания в исходных растворах (начальная концентрация) и в фильтратах почвенных суспензий (конечная концентрация).

По результатам экспериментальным данным построены изотермы адсорбции по 5-ти точкам и рассчитаны параметры сорбции по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха.

Уравнение адсорбции Ленгмюра является наиболее известной моделью, описывающей сорбционное равновесие:

$$A = A_{\max} \frac{K_L C_{\text{равн}}}{1 + K_L C_{\text{равн}}} \quad (1.1)$$

Модель Ленгмюра основана на том, что на поверхности сорбента образуется мономолекулярный слой адсорбата, а все активные центры обладают равной энергией и энтальпией [35].

Для расчета параметров сорбции ( $A_{\max}$ ,  $K_L$ ) уравнение линеаризовано:

$$\frac{C_{\text{равн}}}{A} = \frac{1}{A_{\max} K_L} + \frac{1}{A_{\max}} \cdot C_{\text{равн}}, \quad (1.2)$$

где  $A$  — количество адсорбированного вещества на единицу массы адсорбента, мМ/кг,  $C_{\text{равн}}$  — равновесная концентрация раствора, мМ/л,  $A_{\max}$  — максимальная сорбционная емкость адсорбента (предельная адсорбция твердой фазы), мМ/кг,  $K_L$  — константа адсорбционного равновесия, характеризующая энергию взаимодействия адсорбата и адсорбента, л/мМ.

Эмпирическое уравнение Фрейндлиха описывает поглощение ионов на гетерогенной поверхности и подразумевает, что сродство к адсорбции экспоненциально уменьшается с увеличением насыщения поверхности, что ближе к реальности, чем предположение о постоянной энергии связи, присущей уравнению Ленгмюра. Так как адсорбционные центры по этой модели обладают различными величинами энергии, то в первую очередь происходит заполнение

Таблица 1. Характеристика свойств засоленных почв Западного Забайкалья

Горизонт	Глубина, см	Фракций (мм), %		pH <sub>N<sub>2</sub>O</sub>	Обменные катионы, смоль -экв/100 г.		Сумма солей	CO <sub>2</sub> карбонатов	Гумус	N <sub>общий</sub>	Подвижные, мг/100 г. по Мачигину	Тип засоления		
		<0.01	<0.001		EKO	Na <sup>+</sup>							%	
Разрез 13. Солончак типичный (Заиграевский район, село Первомаевка, высокий берег реки Уды)														
S[AJ]	0–30	46.7	29.1	9.2	23.0	4.4	1.93	11.3	3.1	0.16	4.10	3.5	41.5	Хлоридно-сульфатно-содовый
S[AJ]BCca	30–42	19.7	5.1	9.8	17.0	3.9	0.81	7.8	0.8	0.04	1.14	1.1	20.7	
BCca,s	42–50	36.1	18.7	9.7	18.2	5.1	0.48	3.6	0.6	0.03	0.60	0.4	38.1	
BCs	50–80	40.7	15.2	9.6	17.1	3.2	0.31	0.6	0.4	0.03	0.07	0.4	15.7	
Cs	80–100	26.6	5.1	8.7	16.5	3.0	0.35	0.3	0.3	0.01	0.06	0.2	8.1	
Разрез 14. Солончак соровый (Заиграевский район, берег озера Гуджирное)														
I слой	0–22	15.5	3.7	9.0	10.0	5.2	2.45	7.7	0.3	0.02	–	3.7	31.1	Содово-хлоридно-сульфатный
II слой	22–53	12.4	3.1	8.7	3.0	0.4	0.17	0.2	0.1	0.007	–	1.2	5.3	
Разрез 5 (Р.2–2022). Солончак квазиглеевый (Иволгинский район, село Оронгой, правый борт озера Белое)														
AJ1	0–10	17.0	2.9	7.9	13.7	6.7	1.64	16.5	3.8	0.17	0.12	0.7	4.6	Сульфатный
AJ2	10–18 (21)	17.2	2.4	7.9	11.0	5.6	1.27	18.0	2.4	0.12	0.12	0.4	3.4	
Bq	18(21)–34(41)	26.3	11.0	8.1	8.8	2.2	0.38	27.5	1.6	0.10	0.20	0.5	5.6	
Q	34(41)–55	30.1	10.8	8.2	10.4	1.4	0.21	41.5	1.1	0.10	0.12	0.6	4.3	
Разрез 3. Аллювиальная светлогумусовая засоленная (Иволгинский район, улус Хубисхал)														
AJ	0–30(43)	18.4	4.9	8.0	11.2	1.6	0.34	1.2	1.5	–	0.16	6.0	26.3	Сульфатный
Bca	30(43)–50	30.1	10.8	8.2	13.0	6.5	0.64	7.8	0.6	–	0.12	1.0	16.0	
Разрез 4. Аллювиальная светлогумусовая засоленная (Иволгинский район, улус Хубисхал)														
AJ1	0–6	15.7	2.8	8.0	12.3	0.4	0.17	2.2	2.0	0.17	0.16	2.9	49.2	Сульфатный
AJ2	6–21(26)	21.0	2.8	8.3	10.6	5.2	0.35	1.5	1.2	0.09	0.16	0.4	8.4	
Bsn,ca	21(26)–50	28.6	10.0	8.0	9.9	8.6	0.85	6.8	0.9	0.05	0.16	0.7	4.4	

Таблица 1. Окончание.

Горизонт	Глубина, см	Фракций (мм), %		pH <sub>N<sub>2</sub>O</sub>	Обменные катионы, смоль -экв/100 г.		Сумма солей	CO <sub>2</sub> карбонатов	Гумус	N <sub>общий</sub>	Подвижные, мг/100 г. по Мачигину			Тип засоления
					EKO	Na <sup>+</sup>					N-NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
		<0.01	<0.001		%									
Разрез 1—2022. Солончак типичный (Иволгинский район, село Оронгой, Итыгиловский источник)														
AUsa	0—43(46)	27.8	14.2	8.4	15.9	6.1	0.60	13.0	4.4	0.10	1.7	0.8	28.6	Сульфатно-хлоридно-содовый
B	43(46)—50	14.8	10.5	8.5	16.2	3.3	0.33	6.8	1.5	0.03	0.12	0.7	10.0	
Разрез 12. Солончак темный (Селенгинский район, пойма реки Баян-Гол)														
S[Ao]	0—6	27.1	3.4	8.0	20.0	4.8	1.07	1.9	5.4	0.27	3.10	3.5	51.3	Сульфатный
S[AU]	6—20	18.2	4.2	8.2	19.0	3.5	0.88	3.0	3.9	0.20	2.60	2.4	20.7	
[AU]Bca,s,g	20—30	16.4	4.3	8.4	12.0	1.7	0.43	2.9	1.1	0.06	0.25	1.6	7.2	
BCsa,s,g	30—58	14.7	3.7	8.7	11.5	1.5	0.18	2.2	1.0	0.07	0.21	0.8	13.1	
Cg	58—100	19.9	4.0	8.5	10.1	1.1	0.13	0.5	0.8	0.04	0.07	0.4	10.6	
Разрез 11. Солончак глеевый (Джидинский район, село Белоозерск, берег озера Каменный ключ)														
S	0—2	27.7	4.8	8.9	38.0	10.4	1.58	2.8	3.2	0.18	2.15	1.5	65.3	Хлоридно-сульфатно-содовый
S[AJ]	2—9	24.3	3.2	8.7	18.0	8.3	1.23	2.0	2.4	0.13	1.72	1.2	27.7	
Bca,s	9—23	20.5	3.9	8.7	33.0	2.2	0.31	3.8	0.5	0.04	0.68	1.2	12.1	
Bca,s	23—43	26.9	4.2	8.9	19.0	4.8	0.54	1.7	1.4	0.06	0.852	1.1	20.7	
Gs,ca	43—60	27.7	3.9	8.6	—	—	0.24	5.5	0.8	0.08	0.09	0.7	17.4	
CGs,ca	60—80	35.3	4.2	8.7	—	—	0.23	4.6	1.0	0.06	0.10	0.5	17.4	

Примечание. – нет данных



активных сорбционных центров с максимальной энергией [35].

Уравнение Фрейндлиха математически выражается как

$$A = K_F C_{\text{равн}}^{1/n} \quad (2.1)$$

В линейной форме данное уравнение позволяет рассчитать параметры сорбции:

$$\log A = \log K_F + \frac{1}{n} \cdot \log C_{\text{равн}}, \quad (2.2)$$

где  $K_F$  — коэффициент емкости адсорбента (л/кг) и  $1/n$  — константа, указывающий на интенсивность взаимодействия адсорбент—адсорбат и характеризует степень отклонения изотермы адсорбции от прямой линии ( $1/n \approx 0.2 \div 0.7$ ).

По своему физическому смыслу  $K_F$  представляет собой величину адсорбции при равновесной концентрации адсорбата, равной единице (при  $C = 1$ ,  $A = K_F$ ).

Линейный график и уравнение регрессии для каждой почвы были получены путем сопоставления  $\lg C_{\text{равн}}$  с  $\lg A$ . Наклон и пересечение были приняты равными  $1/n$  и  $K_F$  соответственно.

Характеристику межфазного распределения ионов выражают через коэффициент распределения, который устанавливает соотношение между равновесными концентрациями частиц в сорбенте и в растворе [35]:

$$K_d = C_{\text{ТВ}} / C_{\text{равн}}, \quad (3)$$

где  $K_d$  — коэффициент распределения, л/кг,  $C_{\text{ТВ}}$  — равновесная концентрация ионов в сорбенте (твердой фазе), мМ/кг,  $C_{\text{равн}}$  — равновесная концентрация ионов в растворе, мМ/л.

Максимальная буферная емкость (МБЕ<sub>K</sub>) по отношению к калию является коэффициентом емкости, который измеряет способность почвы пополнять запасы ионов калия в почвенном растворе, и равна произведению  $A_{\text{max}}$  и  $K_L$  [37].

При расчете параметров сорбций калия засоленными почвами нами были исключены данные, полученные при использовании исходного раствора KCl с концентрацией 0.25 мМ/л в виду низких величин коэффициента аппроксимаций в некоторых случаях. По нашим расчетам 0.25 мМ  $K^+$ /л соответствует 9.75 мг K/100 г почвы. Как правило, в засоленных почвах Западного Забайкалья содержание подвижного калия больше указанной величины. Поэтому при данном показателе концентрации внесенных ионов калия возможно будет происходить процесс десорбции либо наблюдаться незначительная сорбция

ионов калия твердой фазой. При исключении этих данных при расчете параметров сорбции отмечена тенденция к увеличению коэффициентов  $R^2$ ,  $K_L$ . Поэтому в табл. 2 приведены параметры сорбции при диапазоне исходной концентрации 0.5–5.0 мМ KCl/л.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В засоленных почвах содержание подвижного калия изменялось в пределах 3.4–51.3 мг/100 г (табл. 1).

Изучение межфазного распределения его ионов показало, что полученные экспериментальные изотермы имели различный характер по классификации Брунауэра [38]: выпуклый и слабовыпуклый (I, IV- тип) и сигмовидный (II тип), и относились в основном к L-типу (рис. 2).

В основе данной классификации лежит взаимосвязь формы изотермы с механизмом адсорбции. Следовательно, сопоставление экспериментально полученных классификаций позволяет сделать предположение о механизме адсорбции и размере пор в исследуемом материале [39].

Изотермы I типа свидетельствовали о том, что при низких концентрациях ионы  $K^+$  имели относительно высокое химическое сродство с поверхностью адсорбента. По мере заполнения сорбционных центров уменьшалось количество незаполненных позиций и соответственно снижалось количество адсорбированного вещества. Такой тип изотермы характерен как при хемосорбции, так и при физической адсорбции и предполагает относительную однородность сорбционных центров по отношению к сорбату. Данный тип изотермы был характерен для большинства изученных нами почв.

Согласно [40], изотермы I типа соответствуют процессам адсорбции в поверхностных слоях с постоянной энергией связи и малым взаимодействием между молекулами и отмечается:

— при мономолекулярной адсорбции на макропористых адсорбентах, когда наблюдают сильное взаимодействие адсорбат—адсорбент;

— при адсорбции на микропористых адсорбентах. В отличие от первого случая, при наличии микропор на изотерме будет наблюдаться крутой подъем в области малых величин равновесной концентрации, что обусловлено высоким адсорбционным потенциалом. Кроме того, удельная поверхность микропористых образцов значительно превышает удельную поверхность макропористых или непористых тел.

Следует отметить, что в диапазоне исследованных концентраций рабочих растворов поглощение калия солончаком глеевым (Р. 11), почвообразующей породой солончака типичного (Р. 13, 80–100 см), гумусовым горизонтом аллювиальной светлогумусовой (Р. 4, 6–21(26) см) шло интенсивно.

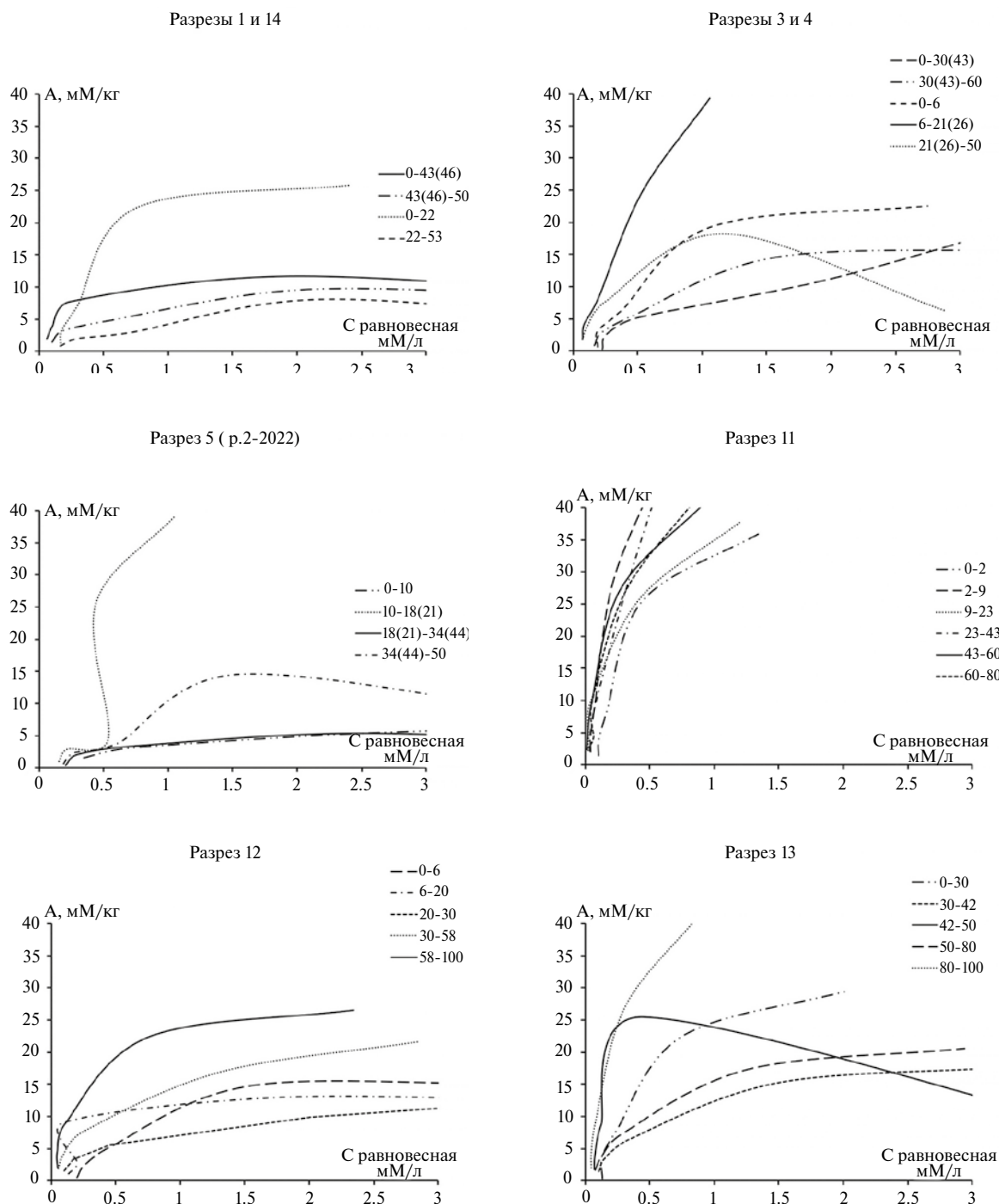


Рис. 2. Изотерма сорбции ионов  $K^+$  из водного раствора KCl засоленными почвами.

В этом случае кривые изотермы были близки к прямой и расположены под большим углом наклона к оси абсцисс (рис. 2).

Изотерма II типа ( $S$ -изотерма) изначально была близка к  $L$ -изотерме (I типа) и отличалась слабым наклоном кривой в области малых концентраций.

По мере возрастания равновесной концентрации наклон увеличивался.

Такая форма изотермы, по [40], свидетельствовала о полимолекулярной адсорбции. Как правило, такая форма изотермы характерна для дисперсных макropористых и непористых материалов. В этом случае адсорбированные частицы образуют монослой

на поверхности адсорбента и служат центром адсорбции молекул второго слоя. Энергия связи ионов калия с поверхностью почвенных частиц уменьшается с ростом степени заполнения, интенсивность взаимодействий адсорбат–адсорбат высока, а адсорбционные способности растворителя и адсорбата имеют сравнимые показатели. Другая причина образования изотермы типа II заключается в том, что частицы имеют большее сродство к поверхности, чем к самим себе. Иными словами, монослой (частица–поверхность) будет более стабильным и долговечным, чем многослойный (частица–частица), сформированный позже. Такую S-форму изотермы адсорбции ионов калия наблюдали в почвенных образцах: Р. 5 (10–18(21) см), Р. 11 (60–80 см), Р. 12 (6–20 см) (рис. 2). Изотермы IV типа, которые имеют начальный участок, схожий со II типом, свидетельствуют о полимолекулярной адсорбции и наличии капиллярной конденсации в мезопорах.

Незначительная часть ионов калия поглощается органическим веществом почвы [41, 42] и не образует нерастворимых соединений в почве, т.е. химически не поглощается [43].

В имеющихся литературных данных [44, 45] отмечено, что при внесении в почву ион калия быстро вступает во взаимодействие с коллоидными частицами по типу обменного и необменного поглощения, причем обменное составляет незначительную часть от всей емкости. Реакция физико-химического (обменного) поглощения катионов калия почвой обратима, т.к. они одновременно вытесняют из слоя компенсирующих ионов почвенно-поглощающего комплекса (ППК) эквивалентное количество других ионов, что отражается на реакции почвенного раствора. Например, внесение возрастающих доз водного раствора калия хлористого изменяло реакцию исследованных нами почв до 0.8 ед. рН в сторону подкисления (рис. 3).

Необменное поглощение калия и размер его фиксации почвами в основном определяется их минералогическим составом, особенно наличием минералов монтмориллонитовой группы и гидрослюд с трехслойной разбухающей решеткой [13, 43]. Минералы каолиновой группы с двуслойной решеткой, как правило, не обладают фиксирующей способностью. В легких почвах (песчаных и супесчаных)

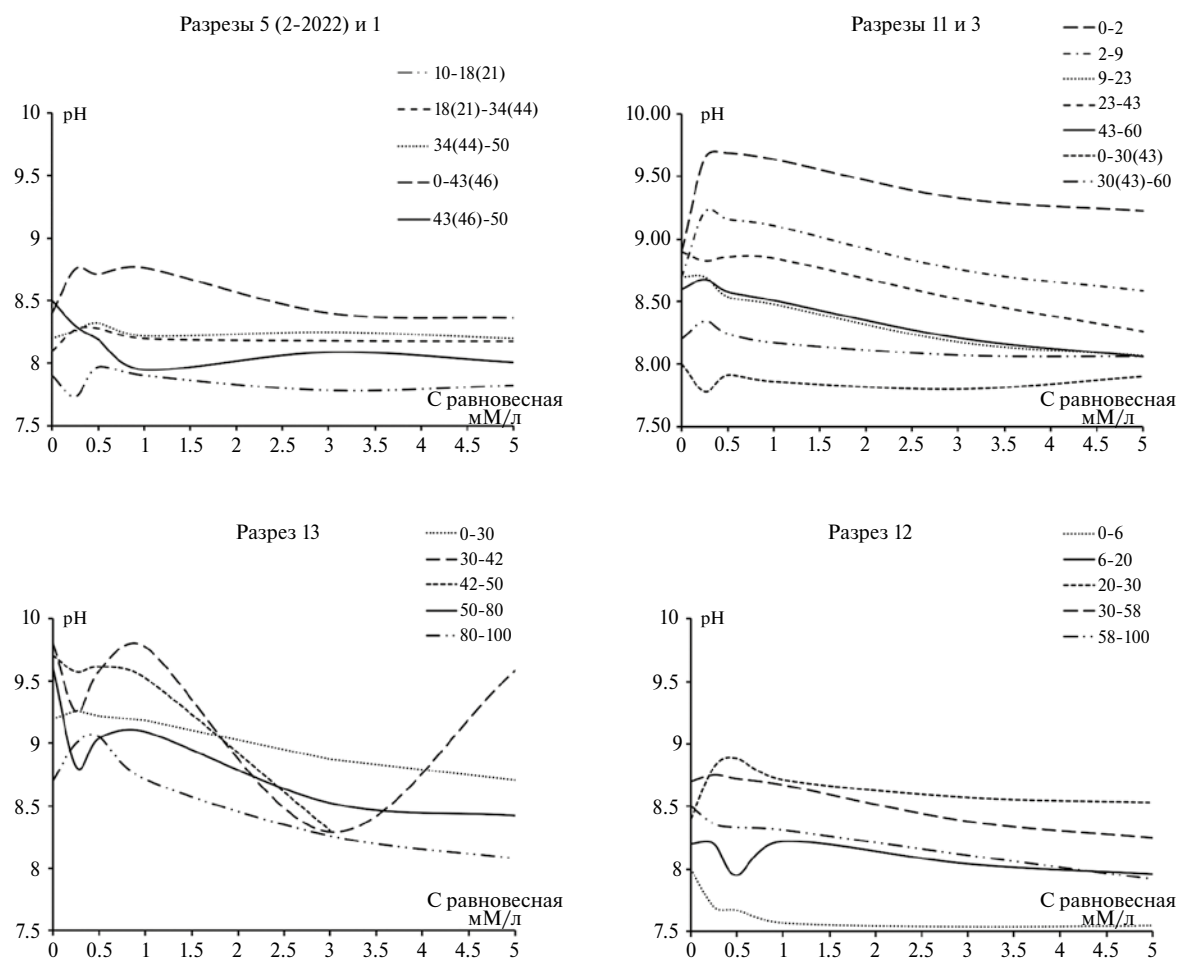


Рис. 3. Изменение  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  почвы при сорбции KCl по сравнению с исходным  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ .

калий фиксируется обычно меньше, чем в средне- и тяжелосуглинистых. Высушивание почвы, особенно попеременное высушивание и увлажнение, что часто бывает в полевых условиях, могут значительно усилить процесс фиксации калия.

В работе [13] отмечено, что исследованные целинные черноземы мучнистокарбонатные (Республика Бурятия) обладали высокой калий-фиксирующей способностью, что было связано со значительным количеством монтмориллонита, вермикулита и гидрослюда в илистой фракции почв. По мнению [8], особенностью минералогического состава степных почв Бурятии является присутствие всего спектра глинистых минералов (каолинита, монтмориллонита, иллита, гидрослюда и смешаннослойных минералов).

В зависимости от минералогического состава почвы размер необменной фиксации калия может варьировать от 5 до 80 мг/кг и составлять до 80% от внесенного его количества [46]. Например, на долю необменного калия в почвах Прикаспийской низменности приходится в среднем от 8 (солончаки) до 19% (каштановые) от его валового содержания [47]. Каштановые почвы Забайкалья необменно закрепляют калий до 44%, а серые лесные оподзоленные — до 34% из внесенных удобрений [48].

Поскольку среди механизмов фиксации преобладают физико-химические процессы, основная часть вносимого калия удобрений в зависимости от их дозы и влажности почвы закрепляется в течение 1–5 ч [6]. Например, каштановые почвы за 1 ч фиксировали до 40%, а за 5 ч — до 55% калия удобрений [49]. При низких дозах фиксация элемента достигала 50–70%, при высоких — 15–30% от внесенного количества. По-видимому, при более высокой концентрации калия в почвенном растворе его катионы могут вытеснять большее количество других катионов с экстенсивно обменных и необменных почвенных позиций. При невысоких концентрациях ионы калия заполняют лишь незначительную часть потенциально доступных необменных (фиксирующих) позиций. Однако при всех вносимых дозах калийного удобрения поглощение калия не происходит в какой-либо одной из его почвенных форм, а идет пропорциональное распределение между формами [6].

В табл. 2 приведены рассчитанные параметры сорбции калия исследованными почвами.

Показано, что за некоторым исключением уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха удовлетворительно описывали сорбцию калия изученными почвами (коэффициенты аппроксимации ( $R^2$ ) = 0.10–0.99 и 0.25–0.99 соответственно). Выбрать лучшую модель сорбции ионов калия исследованными почвами было затруднительно.

Наибольшее соответствие модели Фрейндлиха для калия наблюдали в гумусовых горизонтах почв.

Возможно, это связано с наличием в этом случае большего числа обменных позиций по сравнению с нижележащими горизонтами.

По мнению [50], неспособность уравнения Ленгмюра в некоторых случаях описать полученные данные может указывать на наличие в этих почвах нескольких типов мест сорбции калия, а также на сложный характер сорбционных взаимодействий, связанный с возможным полимолекулярным механизмом адсорбции.

Установлено, что диапазоны варьирования параметров сорбции  $K^+$  засоленными почвами шире (табл. 2) по сравнению с другими типами почв Западного Забайкалья [15].

На основании полученных данных установлено, что относительно высокими сорбционными свойствами по отношению к ионам калия обладали солончаки типичный (Р. 13) и глеевый. Например, величина  $A_{\max}$  в гумусовых горизонтах этих почв изменялась в пределах 51.6–137 мМ  $K^+$ /кг, в нижележащих — 5.1–78.1 мМ  $K^+$ /кг, что связано с сильнокислотной реакцией среды, которая, как известно, значительно увеличивает емкость катионного обмена глинистых минералов и пропорционально этому происходит увеличение количества обменного калия [51]. Самый низкий показатель  $A_{\max}$  выявлен в солончаке квазиглеевом.

В целом этот показатель в засоленных почвах изменялся в пределах 5.1–137 мМ  $K^+$ /кг, что указывало на различие механизмов сорбции ионов калия и количество сорбционных мест, связанных со свойствами почв, это подтверждено данными других авторов для других типов почв [6, 52].

В зависимости от неоднородности сорбционных мест и типа поглощения поглощенные ионы калия имеют различную энергию связи с почвенной мицеллой. При этом наименьшую энергию связи имеют ионы, расположенные на поверхности частиц твердой фазы почвы, тогда как ионы, находящиеся внутри, удерживаются более прочно. По нашим данным (табл. 2),  $K_L$  засоленных почв находилась в пределах 0.32–26.8 л/мМ. При этом, величины коэффициента  $K_L$  уравнения Ленгмюра в гумусовых горизонтах были несколько меньше, чем в минеральных, что обусловлено возможно его обменным поглощением.

Солончак типичный (Р. 1–2022) наиболее прочно связывал ионы калия (табл. 2), что видимо было связано с преобладанием процесса необменного поглощения. Повышение энергии связи  $K^+$  в нижнем горизонте солончака глеевого (Р. 11) было обусловлено увеличением содержания физической глины (илистой фракции) вниз по профилю.

Показатели  $K_F$  в засоленных почвах изменялись в гумусовом горизонте от 3.1 до 91, в минеральных — от 3.2 до 69.5 л/кг = мМ  $K^+$ /кг. В соответствии

Таблица 2. Параметры сорбции калия засоленными почвами Западного Забайкалья

Почва	Горизонт, глубина, см	$K_d$ , л/кг при $C_{\text{равн.}} = 1 \text{ мМ/л}$	Параметры уравнения Ленгмюра				Параметры уравнения Фрейндлиха				
			$A_{\text{max}}$ , ммоль $\text{K}^+$ /кг	$K_L$ , л/ммоль	$R^2$	МБЕК, л/кг	$K_F$ , л/кг	$1/n$	$n$	$R^2$	
Солончак типичный хлоридно-сульфатно-содовый	Разрез 13, Заиграевский р-н, правый берег р. Уда										
	S[AJ], 0–30	32.2	51.6	0.72	0.89	37.1	21.0	0.76	1.31	0.94	
	S[AJ]Bca, 30–42	18.7	22.1	1.27	0.99	28.1	10.6	0.54	1.86	0.97	
	BCsa, s, 42–50	70.6	5.10	7.90	0.99	40.3	8.44	0.01	130	0.00	
	BCs, 50–80	25.8	25.8	1.41	0.99	177	13.1	0.55	1.82	0.96	
	Cs, 80–100	116	69.0	1.77	0.95	122	53.1	0.75	1.34	0.96	
Солончак соровый содово-Хлоридно-сульфатный	Разрез 14, Заиграевский р-н, берег о. Гуджирное										
	I слой, 0–22	24.0	45.5	0.62	0.74	28.2	17.2	0.79	1.26	0.86	
	Песлой, 22–53	4.14	5.31	4.07	0.89	21.6	3.57	0.40	2.47	0.65	
Солончак квазиглеевый сульфатный	Разрез 5 (Р. 2–2022), Иволгинский р-н, правый берег о. Белое										
	AJ1, 0–10	4.29	8.43	0.69	0.99	5.82	3.07	0.55	1.82	0.95	
	AJ2, 10–18(21)	8.62	–	–	–	–	31.7	1.48	0.68	0.58	
	Bq, 18(21)–34(41)	4.88	6.15	1.85	0.99	11.4	3.22	0.24	4.09	0.60	
	Q, 34(41)–55	6.26	8.86	2.38	0.87	21.1	5.53	0.52	1.92	0.59	
Аллювиальная светло-гумусовая засоленная	Разрез 3, Иволгинский р-н, улус Хубисхал										
	AJ, 0–30(43)	10.4	33.0	0.32	0.85	10.6	7.38	0.73	1.02	0.98	
	Bca, 30(43)–60	11.9	23.3	0.71	0.95	16.5	8.55	0.66	1.52	0.95	
Аллювиальная светло-гумусовая засоленная	Разрез 4, Иволгинский р-н, улус Хубисхал										
	AJ1, 0–6	16.7	38.2	0.59	0.86	22.5	13.0	0.77	1.30	0.93	
	AJ2, 6–21(26)	40.9	238	0.19	0.51	45.2	39.6	0.94	1.06	0.99	
	Bsn, ca, 21(26)–50	31.5	6.38	5.87	0.91	37.5	8.68	0.22	4.63	0.25	

Таблица 2. Окончание

Почва	Горизонт, глубина, см	$K_d$ , л/кг при $C_{равн.} = 1$ мМ/л	Параметры уравнения Ленгмюра				Параметры уравнения Фрейндлиха				
			$A_{max}$ , ммоль $K^+$ /кг	$K_L$ , л/ммоль	$R^2$	МБЕК, л/кг	$K_F$ , л/кг	$1/n$	$n$	$R^2$	
Солончак типичный сульфатно-хлоридно-содовый	Разрез 1–2022, Иволгинский р-н, с. Оронгой, Итигиловский источник										
	AUs, 0–43(46)	32.9	10.1	26.8	0.99	270	8.46	0.23	4.27	0.73	
	B, 43(46)–50	9.01	9.76	2.73	0.98	26.6	6.08	0.36	2.80	0.92	
	Разрез 12, Селенгинский р-н, пойма р. Баян-Гол										
	S[Ao], 0–6	11.4	24.4	0.56	0.85	13.7	7.91	0.72	1.38	0.97	
	S[AU], 6–20	91.9	14.1	2.87	0.97	40.4	9.23	0.25	4.06	0.38	
Солончак темный сульфатный	[AU], 20–30	12.2	29.1	0.48	0.76	14.0	7.25	0.42	2.39	0.99	
	BCsa, 30–58	31.5	25.4	1.80	0.99	45.8	13.9	0.49	2.06	0.99	
	Cg, 58–100	81.5	76.9	0.27	0.10	20.8	21.2	0.45	2.21	0.95	
	Разрез 11, Джидинский р-н, берег о. Каменный ключ										
Солончак глеевый хлоридно-сульфатно-содовый	S, 0–2	49.4	83.3	0.62	0.60	51.7	34.8	0.86	1.16	0.91	
	S[AJ], 2–9	125	137.0	0.96	0.66	132	91.0	0.90	1.11	0.97	
	Bca,s, 9–23	236	43.9	4.47	0.98	196	37.0	0.51	1.97	0.94	
	Bca,s, 23–43	116	15.9	1.37	0.18	21.7	69.5	0.85	1.17	0.99	
	Gs,ca, 43–60	183	50.8	4.28	0.99	217	48.9	0.59	1.70	0.97	
	CGs,ca, 60–80	176	78.1	1.38	0.57	108	50.1	0.71	1.40	0.84	

с уравнением Фрейндлиха (2.1), чем больше  $K_F$ , тем интенсивнее процесс адсорбции. Относительно высокие показатели  $K_F$  выявлены для солончака глеевого, минерального горизонта солончака типичного (Р. 13, 80–100 см) и гумусового горизонта аллювиальной светлогумусовой почвы (Р. 4, 6–21(26) см).

Поскольку изотерма Фрейндлиха предполагает низкую энергию адсорбции, ее константы  $K_F$  и  $1/n$  могут быть приняты в качестве меры степени адсорбции и скорости адсорбции или энергии адсорбции [53]. Согласно [54], постоянная  $1/n$  отражает буферную способность почв. В изученных почвах она варьировала от 0.23 до 0.86. Меньшие величины  $1/n$  указывали на большую гетерогенность [55].

Константа  $n$  характеризует интенсивность сорбции и распределение активных центров. Если  $n < 1$ , энергия связи между сорбентом и ионами металлов возрастает, при  $n > 1$  — уменьшается, при  $n = 1$  все сорбционные центры эквивалентны [56]. В нашем случае величина  $n$  была  $> 1$ , что указывало на уменьшение энергии связи между почвенными частицами и ионами калия по мере заполнения поверхности почв.

Величина коэффициента распределения ( $K_d$  при  $C_{исх} = 1$  мМ/л) калия варьировала в пределах 4.14–236 л/кг (табл. 2). Высокие показатели  $K_d$  выявлены в солончаке глеевом, самые низкие — солончаке квазиглеевом. Чем больше  $K_d$ , тем интенсивнее процесс переноса сорбата из раствора в твердую фазу, поэтому его называют мерой специфичности.

Относительно высокие показатели максимальной буферной емкости по отношению к калию (МБЕ<sub>к</sub>) выявлены в солончаках глеевом (Р. 11) и типичном (Р. 1–2022, иллювиальные горизонты Р. 13), а относительно минимальные — в квазиглеевом (табл. 2). Возможно, различие в буферной емкости почв по отношению к ионам калия связано со свойствами почв и механизмами закрепления его почвой. В табл. 2 показано, что почвы с относительно высокой адсорбционной емкостью ( $A_{max}$ ), с большим содержанием фракции физической глины и ЕКО имели повышенные величины МБЕ<sub>к</sub>, чем почвы более легкого гранулометрического состава и с меньшей емкостью катионного обмена. Почвы с большими показателями МБЕ<sub>к</sub> имели невысокое содержание подвижного калия (табл. 1), что, видимо, было связано с прочным закреплением ионов калия в почве.

Расчет корреляции параметров адсорбции калия с некоторыми показателями свойств почв (содержанием гумуса, физической глины, суммы солей, величиной рН) не выявил четкой зависимости. Наблюдалась лишь слабую зависимость поглощения ионов калия от реакции почвенной среды и содержания физической глины. Можно предположить, что совокупность свойств засоленных почв определяла особенности поглощения ими ионов калия в исследованных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые дана количественная оценка предельной сорбционной емкости засоленных почв Западного Забайкалья по отношению к иону калия.

Показано, что модели адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха могут быть использованы для описания процесса сорбции. Величина  $A_{max}$  почв по отношению к калию менялась в широких пределах (5.1–137 мМ К<sup>+</sup>/кг), что связано с различием сорбционных мест в почве. Относительно высокая сорбция К<sup>+</sup> выявлена в солончаках глеевом и типичном. Величина  $A_{max}$  в гумусовых горизонтах этих почв изменялась в пределах 51.6–137, в нижележащих — 5.1–78.1 мМ К<sup>+</sup>/кг. Минимальная  $A_{max}$  установлена в солончаке квазиглеевом.

$K_L$  засоленных почв находилась в пределах 0.32–26.8 л/мМ. В целом величины коэффициента  $K_L$  уравнения Ленгмюра в гумусовых горизонтах были несколько меньше, чем в минеральных, что свидетельствовало о менее прочном связывании в них калия.

Величина  $K_F$  в почвах изменялась в гумусовом горизонте от 3.1 до 91, в минеральных — от 3.2 до 69.5 л/кг = мМ К<sup>+</sup>/кг.  $K_d$  варьировал в пределах 4.28–184 л/кг с высокими показателями для солончака глеевого и низкими — квазиглеевого.

По способности сорбировать калий засоленные почвы Западного Забайкалья образовали следующий убывающий ряд (средневзвешенное в слое 0–30 см): солончак глеевый > солончак типичный > аллювиальная светлогумусовая засоленная > солончак сорový > солончак темный > солончак квазиглеевый.

Между параметрами адсорбции калия с некоторыми показателями свойств почв (содержанием гумуса, физической глины, суммы солей, величиной рН) не выявлено четкой корреляции. Наблюдалась лишь слабую зависимость поглощения ионов калия от реакции почвенной среды и содержания физической глины. Это необходимо учитывать при установлении доз минеральных удобрений, особенно калийных, для повышения продуктивности галоксероморфных пастбищ и галофитных сенокосов и оптимизации соотношения калия к натрию в кормовых травах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин Б.В. Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
2. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2003. 1028 с.
3. Давлятшин И.Д., Лукманов А.А., Бадиков А. Калий в пахотных почвах лесостепи // Плодородие. 2013. № 2. С. 27–28.

4. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
5. Сычев В.Г. Возможности совершенствования градиации содержания “доступного” калия // Агрохим. вестн. 2000. № 5. С. 30–34.
6. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
7. Убугунов Л.Л., Лаврентьева И.Н., Убугунова В.И., Меркушева М.Г. Разнообразие почв Иволгинской котловины: эколого-агрохимические аспекты. Улан-Удэ: БГСХА, 2000. 208 с.
8. Абидуева Т.И., Соколова Т.А. Глинистые минералы и калийное состояние степных почв Западного Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 101 с.
9. Пьянкова Н.А., Рузавин Ю.Н., Билтуев А.С. Агрохимическая характеристика серых лесных неоподзоленных почв Селенгинского среднегорья // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова. 2008. № 2(11). С. 39–44.
10. Пигарева Н.Н. Агрохимические свойства дерновых лесных почв Бурятии // Агрохимия. 2012. № 6. С. 13–22.
11. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н. Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // Агрохимия. 2020. № 3. С. 3–10.
12. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н. Калийное состояние неорошаемых и орошаемых аллювиальных дерновых почв Забайкалья // Агрохим. вестн. 2008. № 4. С. 10–11.
13. Рузавин Ю.Н., Чимитдоржиева И.Б., Норбованжилов Р.Д., Тарасова Л.А. Изменение содержания форм калия при длительном сельскохозяйственном использовании черноземных почв Республики Бурятия // АгроЭкоИнфо. 2020. № 4.
14. Сосорова С.Б. Сорбция калия некоторыми типами почв Западного Забайкалья // Биота, генезис и продуктивность почв. Мат-лы XIX Всерос. совещ. по почвенной зоологии / Под ред. А.В. Тиунова, К.Б. Гонгальского, А.В. Уварова. Улан-Удэ, 2022. С. 155–156.
15. Сосорова С.Б. Особенности сорбции калия почвами Западного Забайкалья // Географ. и природ. ресурсы. 2023. Т. 44. № 3. С. 51–60.
16. Чиркова Т.В. Физиологические основы устойчивости растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 244 с.
17. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высш. шк., 2006. 742 с.
18. Веселов Д.С., Маркова И.В., Кудоярова Г.Р. Реакция растений на засоление и формирование солеустойчивости // Усп. соврем. биол. 2007. Т. 127. № 5. С. 482–493.
19. Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Кудоярова Г.Р. Сравнительное изучение реакции растений ячменя (*Hordeum vulgare*) и пшеницы (*Triticum durum*) на кратковременное и длительное действие натрий-хлоридного засоления // Агрохимия. 2007. № 7. С. 41–48.
20. Rus A., Lee B., Munoz-Mayor A., Sharhuu A., Miura K., Zhu J.-K., Bressan R., Hasegawa P.M. AtHKT1 facilitates Na<sup>+</sup> homeostasis and K<sup>+</sup> nutrition in planta // Plant Physiol. 2004. V. 136. Iss. 12. P. 2500–2511.
21. Pardo J.M., Quintero F.J. Plants and sodium ions: Keeping company with the enemy // Genome Biol. 2002. Rev. 3. P. 1017.1–1017.4.
22. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5–33.
23. Ефремов Е.Н. Плодородие почв и удобрения. URL: <https://www.agroxxi.ru/journal/199804/199804001.pdf>. (дата обращения: 02.02.2023).
24. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Засоленные почвы России (диагностика, география, площади) // Почвоведение. 1995. № 1. С. 73–83.
25. Убугунов Л.Л., Ральдин Б.Б., Убугунова В.И. Почвенный покров Бурятии как базовый компонент природных ресурсов Байкальского региона. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2002. 53 с.
26. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Андреева И.М. Натрий в экосистемах Забайкалья и его агрохимическая эффективность. Новосибирск: СО РАН, 2022. 239 с.
27. Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России. М., 2012. 129 с.
28. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
29. Герасимова М.И., Лебедева И.И., Хитров Н.Б. Индексация почвенных горизонтов: состояние вопроса, проблемы и предложения // Почвоведение. 2013. № 5. С. 627–638.
30. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
31. Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Болонева Л.Н., Балданова А.Л., Убугунов Л.Л. Содержание микроэлементов в солончаках Западного Забайкалья // Почвоведение. 2016. № 4. С. 459–474.
32. Убугунов Л.Л., Лаврентьева И.Н., Меркушева М.Г. Биологическая продуктивность и гумусное состояние почв Иволгинской котловины (Западное Забайкалье) // Почвоведение. 2001. № 5. С. 557–568.
33. <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-6-funkcii-pochv/sorbcionnye-funkcii-pochv>
34. Зеленцов В.И., Дацко Т.Я. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия–фтор // Электр. обработка мат-лов. 2012. № 48(6). С. 65–73.



35. Scherrer R.A., Howard S.M. The Use of distribution coefficients in quantitative structure-activity relationships // J. Med. Chem. 1977. V. 20. P. 53–58.
36. Ayenew B., Tadesse A.M., Kibret K. Phosphorous status and adsorption characteristics of acid soils from Cheha and Dinsho districts, southern highlands of Ethiopia // Environ. Syst. Res. 2018. V. 7. P. 17. DOI: 10.1186/s40068-018-0121-1
37. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.
38. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учеб. пособ. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 132 с.
39. Парфит Г., Рочестер К. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел. М.: Мир, 1986. 488 с.
40. Кучер Л.И. Калий органической части почв в почвозащитном земледелии // SCI-ARTICLE. RU. № 38 (октябрь) 2016. URL: <https://www.sci-article.ru/stat.php?i=1477062216>
41. Кулакова Н.Ю., Соколова Т.А. Влияние агролесомелиорации на калийное состояние лугово-каштановых почв в глинистой полупустыне // Аридн. экосист. 2010. Т. 16. № 5(45). С. 79–89.
42. Калиновская А.А. Распределение тяжелых металлов и радионуклидов в почвах природных и агроэкосистем северо-востока Лужской возвышенности: Дис. ... канд. биол. наук. СПб.: СПбГАУ, 2021. 159 с.
43. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
44. Якименко В.Н. Фиксация калия и магния почвой агроценоза // Агрохимия. 2023. № 3. С. 3–11.
45. <https://agric4profits.com/potassium-content-of-soils-forms-sources>
46. Магомедалиев З.Г. Калий в почвах Дагестана и эффективность калийных удобрений под зерновые культуры в Прикаспийской низменности: Автореф. дис. ... д-ра с-х. наук. Нальчик, 2006. 42 с.
47. Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н. Минералогический состав почв Бурятской АССР и содержание в них различных форм соединений калия // Почвенные ресурсы Забайкалья / Под ред. В.М. Корсунова. Новосибирск: Наука, СО, 1989. С. 59–66.
48. Авакян Н.О. Агрохимия калия почв Армении: Автореф. дис. ... д-ра с-х. наук. Баку, 1971. 52 с.
49. Pal Y., Wong M.T.F., Gilkes R. The forms of potassium and potassium adsorption in some virgin soils from South-Western Australia // Austral. J. Soil Res. 1999. V. 37. P. 695–709.
50. Середина В.П. Геохимические особенности поведения калия в почвах // Вестн. ТомскГУ. Биология. 2007. № 1. С. 106–118.
51. Петрофанов В.Л. Подвижность калия гранулометрических фракций дерново-подзолистых почв и чернозема: Автореф. дис. ... канд. с-х. наук. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2012. 23 с.
52. Voudrias E., Fytianos F., Bozani E. Sorption description isotherms of dyes from aqueous solutions and waste waters with different sorbent materials // Glob. Nest. Inter. J. 2002. V. 4(1). P. 75–83.
53. Kenyanya O., Muthengia J., Mbuvi H. Determination of potassium levels in intensive subsistence agricultural soils in Nyamira County, Kenya // Inter. J. Agric. 2013. V. 3(7). P. 294–302.
54. Dada A.O., Olalekan A.P., Olatunya A.M., Dada O. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn unto phosphoric acid modified rice husk // IOSR J. Appl. Chem. (IOSR-JAC). 2012. V. 3(1). P. 38–45.
55. Пардаев О.Т., Даминова Ш.Ш. Сорбция ионов серебра на твердых экстрагентах на основе полимерных матриц // Universum: хим. и биол.: электр. научн. журн. 2021. № 10(88).

## Potassium Sorption by Saline Soils of Western Transbaikalia

S. B. Sosorova<sup>a, #</sup>, M. G. Merkusheva<sup>a</sup>, I. N. Lavrentieva<sup>a</sup>, L. N. Bologneva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670004, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: soelma\_sosorova@mail.ru*

For the first time, potassium sorption in saline soils of Western Transbaikalia was studied under static conditions and a quantitative assessment of its parameters was given. It was found that the Langmuir and Freundlich equations satisfactorily describe the adsorption of potassium by the studied soils. It was shown that the maximum sorption capacity of soils ( $A_{\max}$ ) with respect to potassium varied within 5.1–137 mM K<sup>+</sup>/kg, which indicated a difference in sorption sites. A relatively high sorption of K<sup>+</sup> by gley and typical salt marshes was revealed. The  $A_{\max}$  value in the humus horizons varied by 2.6 times, in the underlying horizons – by 15.6 times and was minimal in the quasi-clay salt marsh. The adsorption equilibrium constant ( $C_L$ ) varied in a wide range from 0.32 to 26.8 l/mM with lower values in humus horizons, which indicated less strong binding of potassium in them. The values of the capacity coefficient of the Freundlich equation ( $K_F$ ) ranged from 3.1 to 91 l/kg=mM K<sup>+</sup>/kg in the humus horizon, from 3.2 to 69.5 in the mineral horizon. High values of the distribution coefficient ( $K_d$ ) were typical for gley salt marsh and low values for quasi-gley (4.28–184 l/kg). A relatively high value of the maximum buffer capacity in relation to potassium (MBEc) was found in the gley and typical salt marshes, and a relatively minimum value was found in quasi-gley. According to the ability to sorb potassium, the saline soils of Western Transbaikalia formed the following decreasing series (weighted average in a layer of 0–30 cm): gley salt marsh > typical salt marsh > alluvial light humus saline > salt marsh > dark salt marsh > quasi-clay salt marsh. There was no clear correlation between the parameters of potassium adsorption and some indicators of soil properties. Only a weak dependence of the absorption of potassium ions on the reaction of the soil environment and the content of physical clay was observed.

**Keywords:** potassium, sorption, soil, Transbaikalia, salt marshes.

# ВЛИЯНИЕ АГРОХИМИКАТОВ НА ОСНОВЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА, ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД НА АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ, ПРОДУКТИВНОСТЬ И МАКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2025 г. В. А. Касатиков<sup>1,\*</sup>, Н. П. Шабардина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений – филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра  
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия  
\*E-mail: kasv47@yandex.ru

Изучили действие и последствие агрохимикатов, полученных методом мезофильно-термофильного компостирования органогенных побочных продуктов (подстилочного навоза крупного рогатого скота (КРС), подстилочного птичьего помета и смеси осадка городских сточных вод (ОСВ) с опилками) на азотный режим дерново-подзолистой супесчаной почвы, продуктивность зерновых культур в звене севооборота, их макроэлементный состав. Сделаны выводы, что данные агрохимикаты на основе побочных продуктов животноводства и ОСВ существенно влияли на азотный режим почвы, продуктивность зернового звена севооборота и макроэлементный состав культур.

**Ключевые слова:** агрохимикаты, навоз КРС, осадки сточных вод, азотный режим почвы, зерновые культуры, продуктивность, макроэлементы.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010038, **EDN:** VCPPEI

## ВВЕДЕНИЕ

Отходы животноводства и осадки городских сточных вод являются одними из основных побочных продуктов производственной и антропогенной деятельности человека. Их использование в качестве основных компонентов агрохимикатов – один из главных приемов утилизации данных продуктов [1–5].

Разработка научно обоснованных экологически безопасных приемов использования подстилочного навоза КРС, подстилочного птичьего помета и смеси осадка сточных вод (ОСВ) с опилками при производстве агрохимикатов, внедрение и совершенствование технологии их получения способствуют сокращению объемов накопленных и вновь образованных отходов в агропромышленном комплексе и в городском хозяйстве. Следует отметить, что в настоящее время утилизируется не более 10% ОСВ в качестве компонента удобрений [4], что связано с недостаточным внедрением современных технологий производства агрохимикатов на их основе, что не соответствует современным стандартам их использования [5].

Применение агрохимикатов на основе побочных продуктов животноводства и ОСВ проявляется

в положительном их влиянии на агробиологические свойства почв, увеличении запасов органического вещества. Особенно отчетливо почвоулучшающие свойства данных агрохимикатов проявляются на песчаных, супесчаных и малоплодородных деградированных почвах [6, 7].

Цель работы – изучение действия и последствие агрохимикатов на основе подстилочного навоза КРС, подстилочного птичьего помета и осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы, продуктивность зерновых культур в звене севооборота и их макроэлементный состав.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в мелкоделяночном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве в 2022–2023 гг. в зерновом звене севооборота яровая пшеница – яровое тритикале в опыте в пятикратной повторности.

Для проведения исследования была выбрана дерново-подзолистая почва, сформировавшаяся на двучленных ледниковых отложениях. Горизонты Апах и В1 представлены супесчаными отложениями,

перекрывающими тяжелосуглинистые моренные образования.

Агрохимикаты на основе отходов животноводства получены путем мезофильно-термофильного компостирования подстилочного навоза КРС, подстилочного птичьего помета. Внесение полученных продуктов проводили весной 2022 г. под основную обработку почвы. Содержание макроэлементов в составе агрохимиката на основе подстилочного навоза КРС на сухое вещество:  $N_{\text{общ}} - 0.76$ ,  $P_2O_{5\text{общ}} - 0.55$ ,  $K_2O_{\text{общ}} - 0.84\%$  при  $pH_{\text{KCl}} 7.7$  ед., в составе агрохимиката на основе подстилочного птичьего помета на сухое вещество:  $N_{\text{общ}} - 2.68$ ,  $P_2O_{5\text{общ}} - 1.63$ ,  $K_2O_{\text{общ}} - 1.93\%$  при  $pH_{\text{KCl}} 7.8$  ед.

Агрохимикат на основе *ОСВ* получен путем компостирования субстрата из компостной смеси механически обезвоженного *ОСВ* и опилок. Данный агрохимикат представляет собой структурированную массу темно-серого цвета с землистым запахом. Содержание азота в составе данного агрохимиката составляло на сухое вещество  $0.7$ ,  $P_2O_{5\text{общ}} - 1.50$ ,  $K_2O_{\text{общ}} - 0.36\%$  при  $pH_{\text{KCl}} 7.5$  ед.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период вегетации зерновых культур в звене севооборота содержание минерального азота в пахотном слое почвы (0–20 см) характеризовалось наличием обеих форм минерального азота, находившихся

в пропорциональной зависимости от доз агрохимикатов (табл. 1).

При применении агрохимикатов в климатических условиях вегетационного периода 2022 г. отмечена отрицательная динамика содержания  $N-NH_4$  в фазах вегетации яровой пшеницы с максимумом в фазе всходов. В вариантах с внесением агрохимикатов в фазе всходов содержание  $N-NH_4$  достигало  $4.93-50.2$  мг/кг с максимумом в варианте с дозой агрохимиката на основе подстилочного птичьего помета  $15$  т/га, что было обусловлено более высоким исходным содержанием в нем  $N_{\text{общ}}$ . В фазах кушения и колошения данная зависимость сохранялась. При этом содержание  $N-NH_4$  в вариантах с агрохимикатами уменьшалось в фазе кушения до  $4.56-19.4$  мг/кг почвы, в фазе колошения — до  $3.05-5.05$  мг/кг почвы за счет разложения органического удобрения и обменных процессов в системе удобрение–почва в условиях низкой влажности и повышенной температуры, способствующих ускорению нитрификационных почвенных процессов. Для динамики содержания  $N-NO_3$  в слое 0–20 см почвы в ходе вегетации выявлена аналогичная зависимость за счет прохождения нитрификационных процессов. При этом степень влияния агрохимикатов на содержание аммиачной и нитратной формы азота почвы зависела от их вида и была пропорциональна дозам удобрений.

В отличие от действия при последствии агрохимикатов наблюдали положительную динамику содержания  $N-NH_4$  в фазах вегетации ярового тритикале

**Таблица 1.** Влияние агрохимикатов на динамику содержания форм подвижного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве, мг/кг абсолютно сухого вещества (слой 0–20 см)

Вариант	Среднее содержание за вегетацию, мг/кг а.с.в.				Суммарное содержание N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> , мг/кг а.с.в.	
	N-NH <sub>4</sub>		N-NO <sub>3</sub>			
	1	2	1	2	1	2
Контроль без удобрений	3.05	1.56	0.92	1.80	3.97	3.36
Агрохимикат на основе навоза КРС 7.5 т/га	4.18	1.82	1.34	2.14	5.52	3.96
Агрохимикат на основе навоза КРС 15 т/га	5.82	2.15	2.91	2.42	8.73	4.57
Агрохимикат на основе птичьего помета 7.5 т/га	15.5	2.27	11.7	2.05	27.2	4.32
Агрохимикат на основе птичьего помета 15 т/га	25.5	2.67	15.5	2.36	41.1	5.03
Агрохимикат на основе осадка сточных вод 15 т/га	8.85	1.94	0.98	2.08	9.83	4.02

Примечания. 1. а.с.в. — абсолютно сухое вещество. То же в табл. 3. 2. Дозы удобрения даны на сухое вещество. То же в табл. 2, 3. 3. В графе 1 — действие, 2 — последствие агрохимикатов.

при снижении его количества в фазе всходов по сравнению с действием агрохимикатов в зависимости от вида агрохимиката. В фазах кушения и колошения данная зависимость сохранялась. При этом содержание  $N-NH_4$  в вариантах с агрохимикатами, в отличие от их действия, в 2022 г. достигало в фазе кушения 1.78–2.45 мг/кг почвы, в фазе колошения – 2.23–3.81 мг/кг. Выявленная зависимость определялась процессом биологической почвенной деструкции органической части агрохимикатов и интенсификацией обменных процессов в системе удобрение–почва в условиях повышенных влажности и температуры вегетационных периодов, способствующих ускорению нитрификационных почвенных процессов. При этом при последствии агрохимикатов на динамику содержания  $N-NO_3$  в слое 0–20 см почвы, как и при их действии, выявлена в ходе вегетации обратная зависимость от содержания нитратного азота за счет прохождения нитрификационных процессов и использования  $N-NO_3$  в ходе вегетации ярового тритикале. При этом степень влияния агрохимикатов на аммиачный и нитратный режимы почвы зависела от их вида и была пропорциональна дозам удобрений. Наиболее наглядно данная зависимость проявлялась на величине суммарного содержания форм азота почвы, максимум которой был выявлен при применении дозы агрохимикатов 15 т/га при максимуме в варианте с действием удобрения на основе птичьего помета (табл. 1). Если при действии агрохимикатов среднее за вегетационный период содержание  $N-NH_4$  было равно 4.18–25.5 мг/кг, то при последствии – только 1.82–2.67 мг/кг. Аналогичная

зависимость выявлена и для динамики содержания  $N-NO_3$  в вариантах опыта. Все это нашло подтверждение во влиянии изученной группы агрохимикатов на суммарное содержание форм подвижного азота в слое 0–20 см почвы. При этом выявлено равноценное влияние агрохимикатов на основе подстилочного навоза КРС и *ОСВ* при дозе 15 т/га.

Оптимизация азотного режима почвы при действии и последствии изученных агрохимикатов способствовала повышению продуктивности как основной, так и побочной продукции культур звена севооборота. В частности, в условиях действия агрохимикатов прибавки продуктивности яровой пшеницы превышали уровень контроля в пропорциональной зависимости от доз удобрений на 37–97% при действии агрохимиката на основе подстилочного навоза КРС и на 85–106% – при действии агрохимиката на основе подстилочного птичьего помета (табл. 2).

По действию агрохимиката на основе осадка сточных вод выявлено повышение продуктивности яровой пшеницы на 84%, что сравнимо с действием агрохимиката на основе подстилочного птичьего помета в дозе 7.5 т/га по сухому веществу.

Данная зависимость обусловлена исходным агрохимическим составом агрохимикатов, а также их влиянием на азотный режим дерново-подзолистой супесчаной почвы (табл. 1).

Сохранявшееся при последствии повышенное влияние агрохимикатов на азотный режим

**Таблица 2.** Влияние агрохимикатов на продуктивность культур звена севооборота яровая пшеница – яровое тритикале, ц з.е./га

Вариант	Яровая пшеница			Яровое тритикале			Звено севооборота		
	1	2	3	1	2	3	всего	прибавка	
								ц/га	%
Контроль	10.9	3.4	14.3	12.7	4.1	16.8	31.1	—	—
Агрохимикат на основе навоза КРС, 7.5 т/га	15.0	3.8	18.8	16.6	6.4	23.0	41.8	10.7	34
Агрохимикат на основе навоза КРС, 15 т/га	21.5	5.7	27.2	21.4	8.2	29.6	56.8	25.7	83
Агрохимикат на основе птичьего помета, 7.5 т/га	20.2	5.8	26.0	21.8	8.1	29.9	55.9	24.8	80
Агрохимикат на основе птичьего помета, 15 т/га	22.5	6.4	28.9	32.1	11.4	43.5	72.4	41.3	133
Агрохимикат на основе осадка сточных вод, 15 т/га	20.1	6.0	26.1	20.8	7.7	28.5	54.6	23.5	76
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	1.4	—	—	1.9	—	—	—	—	—

Примечание. В графе 1 – зерно, 2 – солома, 3 – сумма.

и биологические свойства пахотного слоя почвы способствовало повышению продуктивности ярового тритикале. При этом прибавки его продуктивности превышали уровень контроля в пропорциональной зависимости при последствии агрохимиката на основе подстильного навоза КРС на 31–68 и на 85–153% при последствии агрохимиката на основе подстильного птичьего помета. При последствии агрохимиката на основе *ОСВ* в дозе 15 т/га выявлено увеличение продуктивности ярового тритикале на 64%, что было сравнимо как с действием, так и последствием агрохимиката на основе подстильного навоза КРС и подстильного птичьего помета в дозе 7.5 т/га. Данная зависимость была обусловлена исходным агрохимическим составом агрохимикатов, а также их последствием на азотный режим дерново-подзолистой супесчаной почвы (табл. 1).

Следует отметить более высокую эффективность последствия агрохимикатов на продуктивность ярового тритикале в сравнении с действием. Данная зависимость была обусловлена более благоприятными погодными условиями вегетационного периода в 2023 г. с количеством осадков в мае и июле >100% от нормы при температуре, близкой к средней температурной норме. Этим определялось также отсутствие отрицательного эффекта от снижения содержания подвижного азота в слое 0–20 см почвы при последствии агрохимикатов в сравнении с их действием.

Влияние агрохимикатов на продуктивность побочной продукции было сравнимо с их действием и последствием на продуктивность основной продукции. В целом за звено севооборота максимальная прибавка, равная 133%, была получена в варианте с внесением агрохимиката на основе подстильного птичьего помета в дозе 15 т/га. При этом выявлена равнозначная эффективность действия на продуктивность агрохимикатов на основе подстильного навоза КРС и осадка сточных вод, сравнимая с эффективностью агрохимиката на основе подстильного птичьего помета в дозе 7.5 т/га.

Влияние агрохимикатов на основе отходов животноводства и *ОСВ* на величину побочной продукции определялось их макроэлементным составом,

периодичностью применения агрохимиката и климатическими условиями вегетационного периода, влияющими в комплексе на макроэлементный состав основной и побочной продукции. При этом содержание макроэлементов в биомассе яровой пшеницы не находилось в пропорциональной зависимости от доз и видов агрохимикатов в условиях их действия (табл. 3).

Данная зависимость может быть объяснена эффектом ростового разбавления, наиболее выраженно в содержании азота в вариантах с агрохимикатами на основе навоза КРС и птичьего помета, и обусловленного существенным повышением урожайности яровой пшеницы с учетом вида и доз применения удобрений.

Близкая зависимость выявлена при последствии изученных видов агрохимикатов на содержание макроэлементов в биомассе ярового тритикале. В наибольшей степени наличие ростового разбавления было выражено в макроэлементном составе основной продукции, особенно в содержании N и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при действии и последствии технологически различных видов агрохимикатов выявлено их положительное влияние на азотный режим дерново-подзолистой супесчаной почвы, продуктивность и макроэлементный состав зерновых культур звена севооборота.

Степень влияния агрохимикатов на аммиачный и нитратный режимы почвы зависела от их вида и была пропорциональна дозам удобрений. Наиболее наглядно данная зависимость проявлялась в величине суммарного содержания подвижных форм азота почвы. Максимальное их содержание отмечено при дозе агрохимикатов 15 т/га в варианте с действием удобрения на основе птичьего помета.

Влияние агрохимикатов на продуктивность основной продукции в зерновом звене севооборота определялось их влиянием на азотный режим почвы в разных фазах вегетации культур и погодными

**Таблица 3.** Действие агрохимикатов на химический состав зерна яровой пшеницы

Вариант	Содержание, % а.с.в.					
	в зерне			в соломе		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Контроль	1.98	0.46	0.54	0.24	0.38	1.03
Агрохимикат на основе навоза КРС 7.5 т/га	1.53	0.62	0.51	0.24	0.32	1.03
Агрохимикат на основе навоза КРС 15 т/га	1.43	0.67	0.48	0.22	0.20	1.09
Агрохимикат на основе птичьего помета 7.5 т/га	1.62	0.46	0.34	0.32	0.20	1.14
Агрохимикат на основе птичьего помета 15 т/га	1.35	0.59	0.34	0.24	0.19	1.17
Агрохимикат на основе осадка сточных вод 15 т/га	1.53	0.66	0.49	0.24	0.32	1.13

условиями вегетационного периода. Вследствие этого максимальная продуктивность зерновых культур получена при действии и последствии агрохимиката на основе подстилочного птичьего помета при сравнимой эффективности равноценных доз агрохимикатов на основе подстилочного навоза КРС и ОСВ.

В ходе проведенного исследования показано наличие эффекта ростового разбавления в содержании макроэлементов в основной и побочной продукции зерновых культур звена севооборота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферова Е.Ю. Эколого-агрохимическая оценка осадков сточных вод, используемых в качестве удобрения: Автореф. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2003. 23 с.
2. Сюняев Н.К., Тютюнькова М.В., Слипец А.А. Анализ опыта почвенного пути утилизации осадков сточных вод. М.: РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева, 2008. 108 с.
3. Беляков А.Н. Влияние компоста на основе куриного помета на урожай и качество сельскохозяйственных культур: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2000. 23 с.
4. Курганова Е.В., Копейкина Л.И., Гюнтер Л.И., Беляева С.Д. Комплексная оценка осадков сточных вод // Агрохим. вестн. 1999. № 3. С. 38–40.
5. Laturnus F., von Arnold K., Grøn C. Organic contaminants from sewage sludge applied to agricultural soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2007. № 14. P. 53–60.
6. Касатиков В.А., Раскатов В.А., Шабардина Н.П. Влияние микробиологических деструкторов лигнинсодержащих отходов на агроэкологические свойства компоста на основе осадка сточных вод и опилок // Докл. МСХА. 2010. Вып. 283. С. 806–811.
7. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние агрохимиката на основе осадка городских сточных вод на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы, урожайность райграса однолетнего // Владимир. земледелец. 2020. № 2. С. 10–13.

### Effect of Agrochemicals Based on Animal by-Products, Sewage Sludge on the Nitrogen Regime of Sod-Podzolic Soil, Productivity and Macronutrient Composition of Cereals

V. A. Kasatikov<sup>a, #</sup>, N. P. Shabardina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers – branch of the Verkhnevolzhsky FASC, ul. Pryanishnikova 2, d. Vyatkins, Sudogodsky district, Vladimir region 601390, Russia

<sup>#</sup>E-mail: kasv47@yandex.ru

The effect and aftereffect of agrochemicals obtained by mesophilic-thermophilic composting of organogenic by-products (manure of cattle, bird droppings and a mixture of urban wastewater sediment with sawdust) on the nitrogen regime of sod-podzolic sandy loam soil, the productivity of cereals in the crop rotation, their macronutrient composition were studied. It is concluded that these agrochemicals based on by-products of animal husbandry and sewage sludge significantly influenced the nitrogen regime of the soil, the productivity of the grain component of crop rotation and the macronutrient composition of crops.

**Keywords:** agrochemicals, cattle manure, sewage sludge, nitrogen regime of soil, crops, productivity, macronutrients.

УДК 631.811.7:633.358:631.445.41(470.343)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ГОРОХА В УСЛОВИЯХ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>§</sup>

© 2025 г. Ж. Н. Минченко<sup>1</sup>, В. И. Лазарев<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Курский федеральный аграрный научный центр  
305021 Курск, ул. Карла Маркса, 70б, Россия

\*E-mail: vla190353@yandex.ru

В опыте на черноземе типичном мощном тяжелосуглинистом, проведенном в 2018–2020 гг. в Курском ФАНЦ, изучили влияние различных доз серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) на урожайность и качество зерна гороха сорта Фараон в следующих вариантах: 1 – контроль без внесения удобрений, 2 – NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 с осени под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под предпосевную культивацию, 3 – NPKS(10–20–20–6) в дозе N30P60K60S18 с осени под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под предпосевную культивацию, 4 – NPK(16–16–16) в дозе N40P40K40 (250 кг/га) с осени под основную обработку почвы, 5 – NPK(16–16–16) в дозе N60P60K60 (375 кг/га) с осени под основную обработку почвы. Показали, что в условиях черноземных почв с низким уровнем обеспеченности серой (4.5 мг S/кг) внесение ее в почву в составе комплексного минерального удобрения NPKS(10–20–20–6) повышало урожайность гороха на 1.6–1.9 ц/га, содержание белка в зерне – на 0.4–0.5% в сравнении с внесением комплексного минерального удобрения без серы (NPK16–16–16). Использование серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) в посевах гороха было экономически выгодным: чистый доход от его внесения составил 3 901–6 612 руб./га, уровень рентабельности – 68.0–85.4% при величинах этих показателей в контрольном варианте, равных 15 312 руб./га и 65.9% соответственно. Повышение дозы внесения серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) до N60P60K60S18 было экономически не целесообразным.

**Ключевые слова:** горох (*Pisum sativum*), сера, чернозем типичный, серосодержащие удобрения, урожайность, содержание белка, экономическая эффективность.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010049, **EDN:** VCPNFY

### ВВЕДЕНИЕ

Горох является одной из основных зернобобовых культур, возделываемых в Курской обл. В химическом составе гороха присутствует множество полезных компонентов, таких как белки, жиры, витамины, минералы. Содержание белка в горохе может достигать 25–26%, жира – в среднем ≈1–2%. Также в составе гороха присутствуют антиоксиданты, аминокислоты, флавоноиды, сапонины и другие полезные вещества [1]. Способность гороха усваивать атмосферный азот с помощью клубеньковых бактерий делает его хорошим предшественником для большинства сельскохозяйственных культур [2].

Однако за последние годы динамика площадей посевов гороха в Курской обл. имела тенденцию к

снижению с 28.52 тыс. га в 2011 г. до 7.63 тыс. га в 2020 г. Начиная с 2021 г. посевные площади гороха увеличились и в 2023 г. составили 16.2 тыс. га. Урожайность гороха за эти годы имела тенденцию к росту – с 15.9 ц/га в 2011 г. до 33.8 ц/га в 2023 г. (рис. 1) [3].

Увеличение производства гороха, а главное стабилизация его продуктивности по годам возможны только при широком внедрении в производство агротехнологий нового поколения, включающих в себя научно обоснованную систему удобрения, основанную на оптимизации минерального питания, использовании стимуляторов роста растений, биопрепаратов и микроудобрений [4]. Достижение этой цели невозможно без серьезных знаний о свойствах почвы, биологических особенностях культуры, способах и формах применяемых удобрений и их взаимодействии между собой и другими объектами окружающей среды [5, 6].

<sup>§</sup>Работа выполнена по теме государственного задания № FGZU-2024-0001.



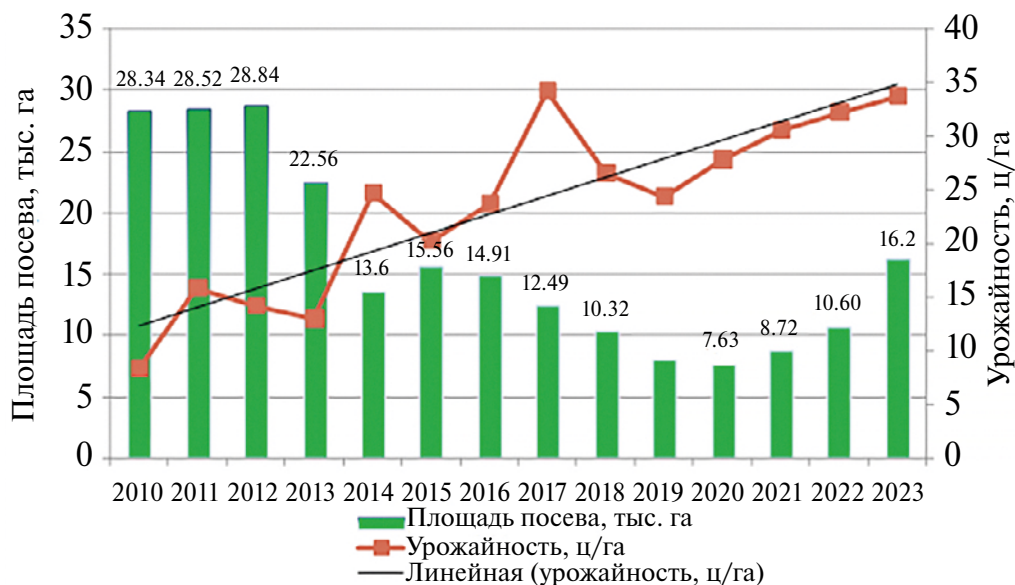


Рис. 1. Динамика площадей посева и урожайности гороха в Курской обл. (2010–2023 гг.).

Важным элементом минерального питания гороха является сера. Она необходима для формирования белков и аминокислот, которые являются основой для роста и развития растений. Сера также участвует в образовании хлорофилла и масел [7].

Сера помогает растениям усваивать азот, что в свою очередь способствует увеличению урожайности. Снижение содержания серы в растениях относительно азота (1 : 16) приводит к торможению процессов синтеза белка и аккумуляции азота в нитратной форме [8–10]. При недостатке серы на корнях гороха образуется меньше клубеньков, что снижает интенсивность фиксации азота воздуха [11]. Кроме того, сера играет роль в формировании защитных механизмов растений против болезней и вредителей. Это связано с тем, что сера участвует в образовании фитоалексинов – природных антибиотиков, которые защищают растения от инфекций. Сера также способствует улучшению качества и сохранности продуктов [12].

Результаты агрохимического обследования почв Курской обл. свидетельствуют о том, что они имеют низкую обеспеченность подвижными формами микро- и мезоэлементов, в частности серы. Наименее обеспечены серой серые лесные почвы всех подтипов, имеющие легкий гранулометрический состав и низкое содержание гумуса. Пахотные почвы хозяйств Курской обл. с низким содержанием подвижных форм серы составляют 96.5, средним – 3.5, высоким – 0.2% от площади обследованной пашни (рис. 2) [13].

Снижение содержания подвижной серы в почвах Курской обл. связано с рядом причин, включая изменение климата, повышение продуктивности

сельскохозяйственных культур и использование определенных видов удобрений. В последнее время поступление серы в почву с органическими и минеральными удобрениями в сельскохозяйственном производстве значительно сократилось [14]. Длительный период в качестве основного источника поступления серы в почву служило внесение сложных минеральных удобрений, таких как сульфат кальция (гипс), содержащий 19% серы и 23% кальция, простой суперфосфат, содержащий помимо фосфора 11% серы и 22% кальция, сульфат аммония (24% серы и 21% азота), сульфат калия (16.5% серы и 53% калия), сульфат магния (10% магния и 13% серы) [15].

В настоящее время химическая промышленность увеличивает объем производства минеральных удобрений и расширяет их ассортимент. В повышении эффективности использования удобрений большое значение имеет правильный выбор марок минеральных удобрений с учетом их состава и свойств, биологических особенностей культур, почвенно-климатических и агротехнических условий, а также сроков и технологии их внесения.

Изучение эффективности использования таких удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур в условиях Курской обл. является актуальной задачей. Особое значение таких исследований состоит в том, что за последние десятилетия, в связи с изменением структуры ассортимента удобрений, с одной стороны, и многократного снижения их применения в земледелии области, с другой, в почву существенно уменьшилось поступление микроэлементов и серы [16]. Хотя черноземы относятся к почвам, довольно хорошо обеспеченным



Цель работы – определение эффективности использования минеральных удобрений, содержащих серу, в посевах гороха в условиях черноземных почв Курской обл.

Исследование проводили в лаборатории технологий возделывания полевых культур Курского ФАНЦ в 2018–2020 гг. в севообороте со следующим чередованием культур: горох – озимая пшеница – сахарная свекла – яровой ячмень. В посевах гороха изучали эффективность комплексного удобрения NPKS(10–20–20–6). Схема полевого опыта была следующей (варианты): 1 – контроль без внесения удобрений, 2 – NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 с осени под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под предпосевную культивацию, 3 – NPKS(10–20–20–6) в дозе N30P60K60S18 с осени под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под предпосевную культивацию, 4 – NPK(16–16–16) в дозе N40P40K40 (250 кг/га) с осени под основную обработку почвы, 5 – NPK(16–16–16)

Почва опытного участка чернозем типичный мощный тяжелосуг—линистого гранулометрического состава на карбонатном лессовидном суглинке. При закладке полевого опыта содержание гумуса (по Тюрину) в пахотном слое составляло 5.5%, щелочногидролизуемого азота — 15.4 мг/100 г, подвижных форм фосфора и калия (по Чирикову) — 17.5 и 11.3 мг/100 г, реакция почвенной среды слабокислая ( $pH_{KCl}$  5.4). По содержанию подвижной серы (4.5 мг/кг) почва относится к низкообеспеченной.

Проведение полевых работ в опыте осуществляли в оптимальные агротехнические сроки.

Использовали районированный в регионе сорт Фараон. Семена высевали элитные, отвечающие требованиям 1-го класса посевных стандартов с нормой высева 1.2 млн всхожих семян/га, способ посева — рядовой, глубина заделки семян — 4–5 см. Учет урожая проводили методом прямого комбайнирования комбайном Сампо-1200. Пересчет урожая проводили на 100%-ную чистоту и 14%-ную влажность семян.

В образцах зерна гороха определяли содержание белка на анализаторе зерна Infratec<sup>TM</sup>1241, натуру зерна (по ГОСТ-10840-76), массу 1000 зерен (по ГОСТ-10842-76). Экономическую эффективность применения удобрений рассчитывали согласно технологическим картам. Экспериментальные данные обрабатывали с применением дисперсионного метода математического анализа, программ Microsoft Excel, Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Посев гороха в годы исследования проводили во 2-й декаде апреля. Всходы появились на 10–11-е сут после посева практически одновременно во всех вариантах. В дальнейшей фазы “бутонизация”, “цветение” и “полная спелость зерна” гороха в вариантах с внесением комплексных минеральных удобрений как содержащих, так и не содержащих серу (NPK(16–16–16), NPKS (10–20–20–6)) наступали на 2 сут позже, чем в контроле.

Инфекционный фон посевов гороха в годы проведения исследования был умеренным. Отмечено поражение растений аскохитозом (*Ascochyta pisi*) и ложной мучнистой росой (пероноспорозом (*Peronospora pisi*)). Определение распространенности этих заболеваний в посевах гороха проводили в период максимального развития болезней — фазе созревания. Результаты и оценка влияния комплексных удобрений на распространенность заболеваний гороха представлены в табл. 1.

Внесение комплексных минеральных удобрений NPK(16–16–16) несколько повышало распространенность аскохитоза (*Ascochyta pisi*) и ложной мучнистой росы (*Peronospora pisi*) в посевах гороха, причем с увеличением дозы внесения удобрений имела место тенденция к увеличению распространенности этих заболеваний. В вариантах с внесением комплексных минеральных удобрений с серой NPKS(10–20–20–6) наблюдали обратную тенденцию: при увеличении дозы внесения удобрений распространенность заболеваний снижалась.

Использование серосодержащих удобрений при возделывании гороха положительно повлияло на формирование структуры урожая. Внесение азотосеросодержащих NPK(16–16–16) увеличивало количество бобов на одном растении на 0.7–1.0 шт., озерненность боба — на 0.8–1.0 шт., массу 1000 зерен — на 2.0–4.0 г. в сравнении с контролем. В вариантах с внесением комплексного удобрения с серой NPKS(10–20–20–6) количество бобов на одном растении увеличивалось на 0.8–1.0 шт.,

**Таблица 1.** Влияние комплексных минеральных удобрений на распространенность аскохитоза и пероноспороза в посевах гороха (среднее за 2018–2020 гг.)

Вариант	Аскохитоз ( <i>Ascochyta pisi</i> )		Пероноспороз ( <i>Peronospora pisi</i> )	
	поражае- мость	биологи- ческая эффектив- ность	поражае- мость	биологи- ческая эффектив- ность
	%			
1. Контроль без удобрений	26.8	—	12.2	—
2. NPK в дозе N40P40K40 под основную обработку почвы	27.1	—	12.4	—
3. NPKS в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под культивацию	25.9	3.3	11.8	3.2
4. NPK в дозе N60P60K60 под основную обработку почвы	27.5	—	12.7	—
5. NPKS в дозе N30P60K60S18 под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под культивацию	25.4	5.2	11.6	4.9
HCP <sub>05</sub>	2.1	—	1.1	—

озерненность бобов — на 1.0–1.1 шт., масса 1000 зерен — на 3.0–5.0 г. по сравнению с контролем (табл. 2).

Анализ урожайных данных, полученных в опыте, показал высокую эффективность комплексных минеральных удобрений в посевах гороха. Внесение комплексного удобрения без серы NPK(16–16–16) в дозе N40P40K40 под основную обработку почвы повышало урожайность гороха на 8.8 ц/га, или на 41.1%. С увеличением дозы внесения удобрения до N60P60K60 урожайность гороха повышалась на 11.4 ц/га, или 53.2%, в сравнении с вариантом, где удобрения не вносили (21.4 ц/га).

Эффективность комплексных минеральных удобрений, содержащих серу, марки NPKS(10–20–20–6) была больше эффективности комплексных минеральных удобрений без серы NPK(16–16–16).

Прибавка урожая гороха от внесения NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почвы + N20 под предпосевную культивацию составила 10.7 ц/га, или 50.0%, а от внесения NPKS(10–20–20–6) в дозе N30P60K60S18 под основную обработку почвы + N30 под предпосевную культивацию — 13.0 ц/га, или 60.7% в сравнении с контролем (табл. 3).

Сера, входящая в состав серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6), оказывала существенное влияние на урожайность гороха. Внесение серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) в дозе N40P40K40S12 повышала урожайность гороха на 1.9, в дозе N60P60K60S18 — на 1.6 ц/га ( $HCP_{05} = 1.4$  ц/га) в сравнении с внесением удобрения NPK(16–16–16).

**Таблица 2.** Влияние комплексных минеральных удобрений на элементы структуры урожая гороха (среднее за 2018–2020 гг.)

Вариант	Количество бобов на одном растении	Число зерен в одном бобе	Масса 1000 зерен, г
	шт.		
1. Контроль без удобрений	3.0	3.2	260
2. NPK в дозе N40P40K40 под основную обработку почвы	3.7	4.0	262
3. NPKS в дозе N20P40K40S12 (200 кг/га), под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под культивацию	3.8	4.2	263
4. NPK в дозе N60P60K60 под основную обработку почвы	4.0	4.2	264
5. NPKS в дозе N30P60K60S18 под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под культивацию	4.0	4.3	265
HCP <sub>05</sub>	0.2	0.3	1.2

**Таблица 3.** Влияние комплексных минеральных удобрений на урожайность и качество зерна гороха (2018–2020 гг.)

Вариант	Урожайность	Прибавка	Содержание белка	Прибавка
	ц/га		%	
1. Контроль без удобрений	21.4	—	21.3	—
2. NPK в дозе N40P40K40 под основную обработку почвы	30.2	+8.8	21.9	0.6
3. NPKS в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под культивацию	32.1	10.7 от S — 1.9	22.4	1.1 от S — 0.5
4. NPK в дозе N60P60K60 под основную обработку почвы	32.8	11.4	22.1	0.8
5. NPKS в дозе N30P60K60S18 под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под культивацию	34.4	13.0 от S — 1.6	22.5	1.2 от S — 0.4
$HCP_{05}$		1.4		0.3



Внесение комплексных минеральных удобрений, содержащих серу, марки NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почв + аммиачная селитра в дозе N20 под предпосевную культивацию повышало содержание белка в зерне гороха на 1.1, в дозе N30P60K60S18 + аммиачная селитра в дозе N30 – на 1.2% в сравнении с контрольным вариантом (21.3%). Сера, входящая в состав серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6), как при внесении его в дозе N40P40K40S12, так и при внесении в дозе N60P60K60S18 оказывала существенное влияние на содержание белка в зерне гороха, повышая его соответственно на 0.4 и 0.5% по сравнению с контролем, при  $HCP_{05}$ , равной 0.3%.

Расчеты экономической эффективности показали, что при сложившихся ценах на удобрения, зерно гороха, ГСМ и т.п. наиболее экономически эффективным было возделывание гороха в варианте с внесением серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почвы + аммиачная селитра в дозе N20 под

предпосевную культивацию. Величина условно чистого дохода в этом варианте составила 26612 руб./га, уровень рентабельности – 85.4% (табл. 4).

Повышение дозы внесения серосодержащего удобрения до N60P60K60S18 было экономически не целесообразным: величина условно чистого дохода составила 26782 руб./га, уровень рентабельности – 76.2%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана высокая эффективность минеральных удобрений, содержащих серу, при возделывании гороха на черноземных почвах Курской обл. с низким уровнем обеспеченности подвижной серой (4.5 мг/кг). Установлено, что при различных дозах внесения эффективность серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) была выше эффективности комплексного минерального удобрения без серы NPK(16–16–16). Прибавка урожая гороха

**Таблица 4.** Экономическая эффективность использования минеральных удобрений, содержащих серу на посевах гороха (2018–2020 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Стоимость валовой продукции, руб.	Производственные затраты, руб.	Себестоимость, руб./т	Чистый доход, руб./га	Уровень рентабельности, %
1. Контроль без удобрений	21.4	38 520	23 208	1084.48	15 312	65.9
2. NPK(16–16–16) в дозе N40P40K40 под основную обработку почвы	30.2	54 360	31 295	1036.25	23 065	73.7
3. NPKS(10–20–20–6) в дозе N20P40K40S12 под основную обработку почвы + N20 (аммиачная селитра) весной под культивацию	32.1	57 780	31 168	970.96	26 612	85.4
4. NPK(16–16–16) в дозе N60P60K60 под основную обработку почвы	32.8	59 040	35 139	1071.31	23 901	68.0
5. NPKS(10–20–20–6) в дозе N30P60K60S18 под основную обработку почвы + N30 (аммиачная селитра) весной под культивацию	34.4	61 920	35 138	1021.45	26 782	76.2

от серы, входящей в состав удобрения NPKS(10–20–20–6), в дозе N40P40K40S12 составила 1.9 ц/га, содержание белка в зерне возросло на 0.4%. В варианте с увеличением дозы внесения серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) до N60P60K60S18 эффективность его снижалась, прибавка урожайности гороха в этом варианте составила 1.6 ц/га, а содержание белка повышалось на 0.5%.

Применение серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) в посевах гороха было экономически выгодным. Повышение дозы внесения серосодержащего удобрения NPKS(10–20–20–6) до N60P60K60S18 приводило к снижению экономической эффективности его использования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серикиязы М.С., Кызыр К.* Изучение пищевых и химических составов бобовых продуктов: горох, фасоль, соя // *Инновации в науке*. 2016. № 7(56). С. 110–114.
2. *Постников П.А.* Оценка гороха как предшественника для яровой пшеницы // *Зернобоб. и круп. культуры*. 2019. № 1(29). С. 15–21.
3. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 02.03.2024).
4. *Кирюшин В.И.* Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2016. Т. 30. № 3. С. 19–25.
5. *Сычев В.Г.* Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь. М.: ЦИНАО, 2003. 228 с.
6. *Титова В.И.* Особенности системы применения удобрений в современных условиях // *Агрохим. вестн.* 2016. № 1. С. 2–7.
7. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.
8. *Патрина М.С.* Роль серосодержащих удобрений в оптимизации минерального питания серой лесной и дерново-подзолистой почвах Красноярской подтайги // *Вестн. КрасГАУ*. 2011. № 10. С. 40–45.
9. *Маслова И.Я.* Оптимизация питания яровой пшеницы серой // *Земледелие*. 2010. № 1. С. 16–17.
10. *Булыгин С.Ю.* Микроэлементы в сельском хозяйстве. Днепропетровск, 2007. 100 с.
11. *Богдевич И.М., Станилевич И.С., Путятин Ю.В.* Урожайность и качество зерна гороха в зависимости от условий минерального питания магнием и серой на дерново-подзолистых суглинистых почвах // *Почвовед. и агрохим.* № 1(66). 2021. С. 93–105.
12. *Гудковский В.А., Кожина Л.В., Назаров Ю.Н., Ткачев Е.С.* Роль серы в повышении устойчивости растений и плодов яблони к стресс-факторам // *МСХ*. 2016. № 5. С. 29–34.
13. *Лазарев В.И., Чевычелов А.Б.* Эффективность комплексных удобрений, содержащих серу, на черноземных и серых лесных почвах Курской обл. при возделывании яровой пшеницы // *Земледелие*. 2016. № 5. С. 29–32.
14. *Пироговская Г.В.* Поступление, потери элементов питания в системе “атмосферные осадки–почва–удобрение–растение” Минск: Беларус. навук. 2018. 227 с.
15. *Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П.* Агрохимия / Под ред. В.Г. Минеева. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
16. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Кизинек С.В.* Агрохимические основы применения удобрений. Майкоп: Полиграф ЮГ, 2013. 572 с.
17. *Муха В.Д., Картамышев Н.И., Муха Д.В.* Агропочвоведение. М.: Колос, 2004. 528 с.

## Effectiveness of Sulfur-Containing Fertilizers in the Cultivation of Peas in the Conditions of Chernozem Soils of the Kursk Region

J. N. Minchenko<sup>a, #</sup>, V. I. Lazarev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Kursky Federal Agrarian Scientific Center,  
ul. Karla Marxa 70b, Kursk 305021, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: vla190353@yandex.ru*

In an experiment on typical deep, heavy loamy chernozem conducted in 2018–2020 in the Kursk FASC, the effect of various doses of sulfur-containing fertilizer NPKS(10–20–20–6) on the yield and quality of pea grain of the Pharaoh variety was studied in the following variants: 1 – control without fertilization, 2 – NPKS(10–20–20–6) at a dose of N20P40K40S12 from autumn for basic tillage + N20 (ammonium nitrate) in spring for pre-sowing cultivation, 3 – NPKS(10–20–20–6) at a dose of N30P60K60S18 from autumn for basic tillage + N30 (ammonium nitrate) in spring for pre-sowing cultivation, 4 – NPK(16–16–16) at a dose of N40P40K40 (250 kg/ha) from autumn for basic tillage, 5 – NPK(16–16–16) at a dose of N60P60K60 (375 kg/ha) from autumn for basic tillage. It was shown that in conditions of chernozem soils with a low level of sulfur availability (4.5 mg S/kg), its introduction into the soil as part of the complex mineral fertilizer NPKS(10–20–20–6) increased the yield of peas by 1.9–1.6 c/ha, the protein content in the grain – by 0.4–0.5% compared to the application of a complex mineral fertilizer without sulfur (NPK16–16–16). The use of sulfur-containing fertilizer NPKS(10–20–20–6) in pea crops was economically profitable: the net income from its application was 3 901–6 612 rubles/ha, the profitability level was 68.0–85.4%, with the values of these indicators in the control variant equal to 15 312 rubles/ha and 65.9%, respectively. Increasing the dose of sulfur-containing fertilizer NPKS(10–20–20–6) to N60P60K60S18 was not economically feasible.

**Keywords:** peas (*Pisum sativum*), sulfur, typical chernozem, sulfur-containing fertilizers, yield, protein content, economic efficiency.

УДК 631.811.1:631.816.36:631.559:635.64(470.46)

## ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТНЫХ ЛИСТОВЫХ ПОДКОРМОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ТОМАТОВ В УСЛОВИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>§</sup>

© 2025 г. Н. В. Тютюма<sup>1</sup>, А. Н. Бондаренко<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН

416251 Астраханская обл., Черноярский р-н,

с. Соленое Займище, кв. Северный-8

\*E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru

Исследовали возможность усовершенствования зональной технологии возделывания томатов открытого грунта с использованием листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub>, направленной на повышение урожайности при орошении в условиях севера Астраханской обл. Полевые эксперименты проведены на опытном орошаемом участке землепользования Прикаспийского аграрного федерального научного центра РАН в период с 2021 по 2023 г. Научная новизна исследования заключалась в теоретическом и практическом обосновании использования листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> при возделывании овощной культуры, направленного на формирование высокопродуктивной товарной продукции. Был проведен сравнительный анализ различных доз применения препаратов с выделением наиболее перспективного варианта. Трехлетними исследованиями было установлено, что применение калийного удобрения KCl с концентрацией 0.5% на 30–40-е сут после высадки рассады (фаза цветения), 50 сут и 60 сут после высадки дало существенную прибавку урожайности относительно контроля. По итогам проведенного анализа, в среднем за 5 сборов был выделен вариант фон + 3 обработки KCl (концентрация 0.5%), который имел наиболее высокие показатели урожайности — 131 т/га. Данный вариант существенно отличался как от контроля, так и от других изученных вариантов. Прибавка урожайности относительно контроля составила 4.08 т/га, или 3.2%.

**Ключевые слова:** томат, азотные удобрения, листовые подкормки, урожайность, Астраханская обл.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010051, **EDN:** VCOXDM

### ВВЕДЕНИЕ

Томаты довольно хорошо отзываются как на внесение минеральных удобрений [1–3], так и на листовые обработки стимуляторами роста [4–6].

Почвенно-климатические условия Нижнего Поволжья позволяют при внесении минеральных удобрений в дозах N200–220P90–120K120–140 в сочетании с орошением получать в открытом грунте урожай томатов на уровне 80–100 т/га [7, 8].

По данным [9], на каштановых почвах Астраханской обл. однократное основное внесение минеральных удобрений в дозе N180P135K80 и дробное (N100P135K80 в основное и N80 в подкормку) обеспечивает получение урожая томатов 85–90 т/га.

Томат из почвы выносит урожаем большое количество питательных элементов. Средний вынос питательных элементов растением, по данным [10], составляет: азота — 110, фосфора — 30, калия — 115 кг/га при урожайности 10 т/га. По данным [11–13], в среднем на 10 т томатов выносятся урожаем: азота — 35, фосфора — 11, калия — 59 кг. Потребление элементов питания растениями томата в разные периоды значительно меняется.

По данным [13], в условиях Нижнего Поволжья в период массового цветения растения томата потребляли N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O в соотношении 1 : 0.3 : 0.75, в фазе плодообразования — 1 : 0.3 : 1.25, перед уборкой — 1 : 1.7 : 0.3.

Цель работы — испытание листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> томатов открытого грунта.

В задачи исследования входило: определение действия листовых подкормок растений препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> на основные показатели роста и развития томата, выявление высокопродуктивного варианта

<sup>§</sup>Исследование проведено в рамках НИР 2022–2024 гг. FNMW-2022-0012 “Разработать усовершенствованные зональные ресурсосберегающие агротехнологии, обеспечивающие повышение плодородия почвы, продуктивности сельскохозяйственных культур и качества продукции в природно-климатических условиях Северного Прикаспия”.



в зависимости от количества листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> томатов открытого грунта в зависимости от основных хозяйственно ценных признаков и уровня урожайности.

Впервые для севера Астраханской обл., в орошаемых условиях разработаны и научно обоснованы дозы применения листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> на томатах открытого грунта.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В опыте использовали гибрид томата Ажур F1 агрофирмы “Седек”. Предшественником являлся овощебахчевой севооборот. Агротехника в опыте – в соответствии с зональными рекомендациями. Минеральные удобрения в виде подкормок вносили через систему капельного орошения 6 раз за вегетацию в следующих фазах развития растений: после высадки рассады в грунт (через 10 сут), бутонизации, начала цветения, полного цветения, начала образования плодов. За 3 листовые обработки в фазах развития томата суммарное внесение калийных удобрений составило: KCl – 0.45, KNO<sub>3</sub> – 0.45 кг.

Фоном вносили минеральные удобрения, кг д.в./га: аммиачная селитра – 111, моноаммоний фосфат – 18, сульфат калия – 168 кг.

Схема опыта представлена в табл. 1.

Опыт был заложен в трехкратной повторности, схема размещения вариантов рендомизированная [14]. Размеры опытных делянок – 10 м<sup>2</sup>.

Урожай учитывали за 5 сборов с каждой повторности с 10-ти учетных растений по мере созревания плодов, согласно методическим указаниям [15, 16].

Экономическая оценка изученных листовых подкормок (KCl и KNO<sub>3</sub>) на культуре томата открытого грунта была проведена по методикам [17, 18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Агрохимическая характеристика почвы опытного участка весной до закладки опыта.* Отборы почвенных проб на опытном поле были произведены 4 марта. В результате агрохимического анализа, проведенного в ЦАС “Волгоградский”, были получены следующие агрохимические показатели почвы в слоях 0–20 см и 20–40 см, представленные в табл. 2.

*Агрохимическая характеристика почвы после проведения опыта.* Проведенный агрохимический анализ почвы опытного участка в вариантах в слое 0–20 см почвы показал существенное изменение содержания основных элементов питания. Как в контрольном варианте, так и в вариантах внесения KCl (концентрация 1%) и KNO<sub>3</sub> (концентрация 0.5%) после окончания опыта содержание нитратного N уменьшилось до 6.15–22.7 мг/кг почвы от первоначального показателя 30.0 мг/га (табл. 3).

В вариантах фон + 3 обработки KCl (0.5%) и фон + 3 обработки KNO<sub>3</sub> (1%) наблюдали существенный рост данного показателя до 166–257 мг/кг. Содержание подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> также оказалось велико и в вариантах опыта разнилось от 39 до 93 мг/кг почвы. Несущественное увеличение содержания обменного K было отмечено только в варианте фон + 3 обработки KCl (0.5%) до 293 мг/кг почвы. В остальных вариантах отмечено снижение данного показателя до 215–181 мг/кг, что существенно отличалось от первоначального показателя 260 мг/кг при закладке полевого опыта.

Содержание хлоридов в слоях 0–20 и 20–40 см существенно не изменялось во всех вариантах опыта,

**Таблица 1.** Схема полевого опыта

Вариант	Концентрация раствора, %		
	Время после высадки рассады, сут		
	30–40 (цветение, 1-я декада июня)	50 (2-я декада июня)	60 (3-я декада июня)
1. NPK (фон – контроль), внесение азофоски NPK = 16 : 16 : 16, аммиачной селитры, моноаммонийфосфата, сульфата калия (внесение 3-х последних видов удобрений осуществляли фертигацией)	–	–	–
2. Фон + 3 обработки KCl	0.5	0.5	0.5
3. Фон + 3 обработки KCl	1.0	1.0	1.0
4. Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub>	0.5	0.5	0.5
5. Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub>	1.0	1.0	1.0

**Таблица 2.** Агрохимические показатели почвы до закладки опыта

Показатель, ед. изм.	Фактический показатель	НД на испытания
Слой 0–20 см		
Гумус, %	0.88–0.92	ГОСТ 26213-91
pH <sub>KCl</sub> , ед.	7.64–7.64	ГОСТ 26483-85
N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	5.2–5.3	ГОСТ 26489-85
N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	30–3.0	ГОСТ 26951-86
Подвижный P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы	27.0–30.0	ГОСТ 26205-91
Обменный K <sub>2</sub> O, мг/кг почвы	260–270	ГОСТ 26205-91
Содержание хлора в слоях почвы, ммоль/100 г почвы	0.14–0.14	ГОСТ 26425-85
Слой 20–40 см		
Гумус, %	0.84–0.88	ГОСТ 26213-91
pH <sub>KCl</sub> , ед.	7.64–7.64	ГОСТ 26483-85
N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	5.2–5.2	ГОСТ 26489-85
N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	4.9–4.9	ГОСТ 26951-86
Подвижный P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы	20.0–21.0	ГОСТ 26205-91
Обменный K <sub>2</sub> O, мг/кг почвы	225–232	ГОСТ 26205-91
Содержание хлора в слоях почвы, ммоль/100 г почвы	0.14–0.14	ГОСТ 26425-85

начиная от времени закладки опыта и после завершения опыта. В среднем данный показатель составлял при закладке опыта 0.14, после завершения опыта – 0.10–0.13 ммоль/100 г.

**Структура и качество урожая.** Учет товарных и нетоварных плодов, масса плодов с одного растения, средняя масса плода, среднее количество плодов на одном растении проводили на 10-ти учетных растениях делянки в каждой повторности. По итогам проведенного анализа, в среднем за 5 сборов был выделен вариант фон + 3 обработки KCl (0.5%), который имел наиболее высокие показатели элементов структуры урожая (табл. 4).

Общее количество плодов составило 209 шт., что превышало контрольный вариант на 50 шт. Общая масса плодов также была максимальной – 31.6 кг/10 учетных растений. Масса плодов с одного растения была равна 3.2 кг, средняя масса плода – 160 г, среднее количество плодов с одного растения было равным 21.8 шт.

Варианты листовых обработок (фон + 3 обработки KCl (1%), фон + 3 обработки KNO<sub>3</sub> (0.5%), фон + 3 обработки KNO<sub>3</sub> (1%)), были менее результативными, некоторые показатели урожая даже оказались меньше контроля (табл. 3). Например, масса плодов с одного растения, которая варьировала от 2.5 до 3.1 кг, среднее количество плодов – от 15.8 до 18.8 шт., общая масса плодов с делянки – от 24.8 до 30.5 кг. При этом в контроле общая масса плодов была равна 24.0 кг, масса плодов с одного растения – 2.4 кг, средняя масса плода – 160 г.

Биохимические анализы качества плодов томата Ажур F1 были проведены в Государственном центре агрохимической службы “Астраханский”, определили следующие показатели: содержание сухого вещества, % (ГОСТ 31640-2012), массовая доля нитратов, мг/кг (МУ 5048-89), массовая доля витамина С, % (ГОСТ 24556-89), массовая доля сахара, % (ГОСТ 8756.13-87).

Показано (табл. 5), что разница в содержании сухого вещества (%) во всех вариантах опыта была в пределах ошибки, особых отличий практически не наблюдали. Диапазон данного показателя находился в пределах 5.8–6.1%. Массовая доля нитратов во всех вариантах была меньше ПДК и варьировала от 33.1 до 40.5 мг/кг. Высокие показатели витамина С (%) были отмечены в 2-х вариантах с листовой обработкой KCl (0.5%) и KNO<sub>3</sub> (1%) – от 52.0 до 52.9%. Варианты NPK (фон – контроль) и фон + 3 обработки KNO<sub>3</sub> (1%) отличались высокими показателями массовой доли сахаров – 2.9%. Необходимо отметить, что изученный гибрид томата Ажур F1 оказался в итоге с низким показателем массовой доли сахара – <4.0%.

**Анализ экономической эффективности возделывания томата Ажур F1 с использованием листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub>.** Анализ экономической эффективности возделывания томата Ажур F1 с использованием листовых обработок различными калийными удобрениями выявил высоко-рентабельный вариант фон + 3 обработки KCl (0.5%)

Таблица 3. Изменение агрохимических показателей в слоях почвы после применения листовых подкормок

Показатель	Варианты														
	НРК (фон – контроль)			Фон + 3 обработки KCl (0.5%)			Фон + 3 обработки KCl (1%)			Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (0.5%)			Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (1%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
pH <sub>H2O</sub> , ед. Хлориды, % Хлориды, ммоль/100 г N-NH <sub>4</sub> , мг/кг N-NO <sub>3</sub> , мг/кг Подвижный P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы Обменный K <sub>2</sub> O, мг/кг почвы	7.0	7.1	7.05	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2
	0.004	0.005	0.004	0.011	0.011	0.011	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005
	0.10	0.15	0.125	0.30	0.30	0.3	0.10	0.10	0.1	0.10	0.15	0.125	0.15	0.15	0.15
	5.2	4.7	4.95	64.6	62.0	63.3	2.8	2.2	2.5	2.6	2.5	2.55	66.9	68.5	67.7
	18.6	19.5	19.05	251	263	257	24.0	21.4	22.7	6.3	6.0	6.15	166	166	166
	57	62	59.5	94	92	93	43	35	39	56	53	54.5	86	84	85
Хлориды, % Хлориды, ммоль/100 г	194	192	193	298	287	292.5	210	216	213	181	181	181	210	219	214.5
	Слой 20–40 см														
Примечание. В графе 1–1-я, 2–2-я повторность, 3 – среднее.	0.004	0.004	0.004	0.009	0.007	0.008	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004
	0.10	0.10	0.10	0.25	0.20	0.22	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	0.13	0.15	0.10	0.13

Таблица 4. Показатели элементов структуры урожая (за 5 сборов) 10-ти учетных растений (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант	Общее количество плодов, шт./делянку	Общая масса плодов, кг/делянку	Количество товарных плодов, шт./делянку	Масса товарных плодов, кг/делянку	Количество нетоварных плодов, шт./делянку	Масса нетоварных плодов, кг/делянку	Масса плодов с одного растения, кг	Средняя масса плода, г	Среднее количество плодов, шт./растение
НРК (фон – контроль)	150	24.0	146	23.2	4.0	0.8	2.4	160	15.5
Фон + 3 обработки KCl (0.5%)	209	31.6	200	30.2	9.0	1.4	3.2	160	21.8
Фон + 3 обработки KCl (1%)	186	27.8	181	27.1	5.0	0.7	2.8	152	18.8
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (0.5%)	159	30.5	151	29.1	8.0	1.4	3.1	189	15.8
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (1%)	156	24.8	149	23.9	7.0	0.9	2.5	158	16.8
НСР <sub>05</sub>	69	8.3	65	8.0	7.7	1.2	0.8	41	6.4

Таблица 5. Биохимический анализ плодов томата в конце опыта (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант	Показатели														
	Содержание сухого вещества, %					Массовая доля нитратов, мг/кг					Массовая доля витамина С, %				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
НРК (фон – контроль)	5.4	5.9	6.7	5.2	5.8	<30	44.0	<30	46.0	37.5	34.3	46.6	30.3	49.8	40.3
Фон + 3 обработки KCl (0.5%)	5.6	5.1	5.9	6.4	5.8	35.0	42.0	32.0	53.0	40.5	61.7	37.5	50.7	58.0	52.0
Фон + 3 обработки KCl (1%)	5.7	5.3	6.1	6.7	6.0	37.5	32.0	<30	47.0	36.6	35.4	44.1	48.9	63.0	47.9
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (0.5%)	5.3	5.2	6.5	6.6	5.9	39.5	< 30	33.0	<30	33.1	28.9	30.7	50.3	57.7	41.9
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (1%)	5.6	6.1	6.3	6.2	6.1	31.0	57	<30	36.0	38.5	40.7	40.2	64.3	66.4	52.9
ПДК	5–9%					150 мг/кг					34.0%				
НСР <sub>05</sub>	0.7					12					14				
											4.0%				
											0.7				

Примечание. В графах 1–4 – повторности, 5 – среднее.

Таблица 6. Анализ эффективности возделывания томата Ажур F1 с использованием листовых подкормок препаратами KCl и KNO<sub>3</sub> (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Общие затраты, тыс. руб./га	Себестоимость, тыс. руб./т	Стоимость реализова- ной продукции, руб./га	Чистый доход, тыс. руб./га	Чистый доход, руб./т	Рентабельность, %	Экономическая эффективность, руб./руб. вложенных затрат
NPK (фон – контроль)	97.2	444 020.79	4534.53	1 468 800.00	1 024 779.21	10 465.47	230.80	3.31
Фон + 3 обработки KCl (0.5%)	131	443 278.29	3395.21	1 958 400.00	1 515 121.71	11 604.79	341.80	4.42
Фон + 3 обработки KCl (1%)	126	442 921.59	3501.91	1 897 200.00	1 454 278.41	11 498.09	328.34	4.28
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (0.5%)	114	443 570.19	3882.79	1 713 600.00	1 270 029.81	11 117.21	286.32	3.86
Фон + 3 обработки KNO <sub>3</sub> (1%)	102	445 055.79	4363.29	1 530 000.00	1 084 944.21	10 636.71	243.78	3.44

Примечание. Цена реализации продукции – 15 руб./кг.

с рентабельностью производства 342%. Себестоимость 1 т выращенной продукции составляла 3395.21 руб., чистый доход с 1 га — 1 515 121.71 руб., чистый доход на 1 т продукции был равен 11 604.79 руб., экономическая эффективность вложенных затрат — 4.42 руб./руб. при урожайности 131 т/га. Данный вариант существенно отличался как от контроля, так и от других вариантов опыта. Прибавка относительно контроля составила 4.08 т/га, или 3.2% (табл. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в трехлетнем исследовании провели сравнительный анализ применения на культуре томатов листовой подкормки удобрениями с выделением наиболее перспективного варианта листовой подкормки удобрениями KCl и KNO<sub>3</sub> разной концентрации. Обоснованы элементы ресурсосберегающей технологии возделывания томата в условиях орошения, обеспечивающие получение высокопродуктивной товарной продукции.

Использование калийного удобрения KCl (0.5%), согласно установленной рекомендации, дало существенную прибавку урожая относительно контроля, что составило 4.08 т/га, или 3.2%. Рентабельность производства в данном варианте была на уровне 342%, при общих затратах на производство 443 278.29 руб./га.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева К.А. Влияние различных доз азотных удобрений на продукцию томата и агрохимические свойства серо-бурой почвы на Абшеронском полуострове (Азербайджан) // Почвы и окружающая среда. 2018. Т. 1. № 3. С. 118–123.
2. Agarwal A., Sharma U., Ranjan R., Nasim M. Combining ability analysis for yield, quality, earliness, and yield attributing traits in tomato // Inter. J. Veget. Sci. 2017. № 23(6). P. 605–615.
3. Zhu Q., Ozores-Hampton M., Li Y.C., Morgan K.T. Phosphorus application rates affected phosphorus partitioning and use efficiency in tomato production // Agron. J. 2018. № 110(5). P. 2050–2058.
4. Байрамбеков Ш.Б., Анишко М.Ю., Гуляева Г.В., Габриева Е.Д. Действие некорневых подкормок на продуктивность томата в условиях дельты Волги // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образ-е. 2019. № 2(54). С. 63–69.
5. Зволинский В.П., Плещачев Ю.Н., Калмыкова Е.В., Калмыкова О.В. Влияние макро- и микроудобрений на качество плодов томата // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образ-е. 2019. № 1(53). С. 32–41.
6. Калмыкова Е.В., Петров Н.Ю., Нарушев В.Б. Приемы повышения продуктивности томата и картофеля при орошении в Поволжье // Аграрн. научн. журн. 2017. № 4. С. 36–40.
7. Калмыкова Е.В., Петров Н.Ю., Убушаева С.В. Влияние агротехнических приемов на рост, развитие и продуктивность томата в условиях Нижнего Поволжья // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образ-е. 2017. № 2. С. 111–118.
8. Бородычев В.В., Кузнецов Ю.В., Дементьев А.В. Водопотребление томатов при капельном орошении // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образ-е. 2007. № 2. С. 23–25.
9. Бочаров В.В., Киселева Н., Соколова Г. Применение минеральных удобрений под овощные культуры в дельте Волги // Овощевод-во и тепл. хоз-во. 2012. № 5. С. 28–29.
10. Гончаренко В.Е. Разработка и обоснование системы удобрения овощных культур в Лесостепи Украины: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Харьков, 2014. 35 с.
11. Григоров М.С., Кружилин Ю.И., Ходяков Е.А. Водосберегающие технологии выращивания томатов // Проблемы научного обеспечения экономической эффективности орошаемого земледелия в рыночных условиях. Волгоград: ВГСХА, 2001. С. 74–75.
12. Григоров М.С., Кузнецов Ю.В. Перспективы применения капельного орошения в Волгоградской области // Мелиорат. и водн. хоз-во. 2003. № 4. С. 2–5.
13. Кузнецов Ю.В. Вынос питательных веществ томатом зависит от водного режима почвы // Картофель и овощи. 2006. № 5. С. 11–12.
14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 315 с.
15. Брежнев Д.Д. Методические указания по изучению и поддержанию мировой коллекции овощных пасленовых культур (томаты, перец, баклажаны). Л., 1977. 24 с.
16. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 4. Картофель, овощные и бахчевые культуры. М.: Минсельхоз РФ, 2015. 61 с.
17. Шпилько А.В. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Ч. 1. Метод. указ-я. М.: РИЦ ГОСНИТИ, 1998. 331 с.
18. Эффективность сельскохозяйственного производства (метод. рекоменд.) / Под ред. И.С. Санду, В.А. Свободина, В.И. Нечаева, М.В. Косолаповой, В.Ф. Федоренко. М.: Росинформагротех, 2013. С. 46–50.

## Use of Nitrogen Leaf Fertilizing to Increase the Yield of Tomatoes in the Astrakhan Region

N. V. Tyutyuma<sup>a</sup>, A. N. Bondarenko<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*The Caspian Agrarian Federal Scientific Center of the RAS,  
sq. North-8, Astrakhan region, Chernoyarsky district, d. Solonoe Zaymishche 416251, Russia,*

<sup>#</sup>*E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru*

The possibility of improving the zonal technology of cultivating tomatoes in the open ground using leaf fertilizing with KCl and KNO<sub>3</sub> aimed at increasing yields during irrigation in the conditions of the north of the Astrakhan region was investigated. Field experiments were conducted on an experimental irrigated land use site of the Caspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences in the period from 2021 to 2023. The scientific novelty of the study consisted in the theoretical and practical justification of the use of leaf fertilizers with KCl and KNO<sub>3</sub> in the cultivation of vegetable crops aimed at the formation of highly productive marketable products. A comparative analysis of different doses of fertilizers was carried out with the selection of the most promising option. Three-year studies have found that the use of KCl of 0.5% fertilizer on the 30–40th day after planting seedlings (flowering phase), on 50th and 60th day after planting gave a significant increase in yield relative to the control. According to the results of the analysis, on average for 5 croppings, the background + 3 KCl treatment option (concentration 0.5%) was identified as the one resulting in the highest yield – 131 t/ha. This option differed significantly from both the control and other studied options. The increase in yield relative to the control was 4.08 t/ha or 3.2%.

**Keywords:** tomato, nitrogen fertilizers, leaf fertilizing, yield, Astrakhan region.

## УЧАСТИЕ ЖАСМОНОВОЙ КИСЛОТЫ В ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛОВ ИЗ КОРНЕЙ В ПОБЕГИ РАСТЕНИЙ ГОРОХА В УСЛОВИЯХ ЗАСОЛЕНИЯ<sup>§</sup>

© 2025 г. Г. Р. Ахиярова<sup>1,\*</sup>, Г. Х. Вафина<sup>1</sup>, А. В. Коробова<sup>1</sup>, И. И. Иванов<sup>1</sup>,  
А. Р. Гиниятуллин<sup>1,2</sup>, Э. Р. Гаффарова<sup>1,2</sup>, М. И. Гарипова<sup>2</sup>, Г. Р. Кудоярова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

450054 Уфа, просп. Октября, 69, Башкортостан, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий

450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Башкортостан, Россия

\*E-mail: akhiyarova@rambler.ru

Жасмоновая кислота (ЖК) и ее производные участвуют в адаптации растений к биотическим и абиотическим стрессам, в том числе к засолению. Однако недостаточно сведений о роли ЖК в передаче из органа в орган сигналов при локальном действии абиотических факторов. Изучена сигнальная роль ЖК в связи с реакцией побегов на засоление прикорневой среды растений гороха. Представлены результаты о влиянии засоления на изменения содержания ЖК в растущей и проводящей зонах корней и ксилемном соке, а также локализация ЖК и абсцизовой кислоты (АБК) в листьях стрессированных растений в связи с изменением уровня их транспирации. Содержание и локализацию ЖК в листьях и корнях растений оценивали иммуногистохимическим методом с использованием специфических антител. Цель данного исследования — проверка, могут ли индуцированные засолением изменения концентрации ЖК в корнях и ксилемном соке объяснить накопление этих гормонов в листьях и связанные с этим изменения транспирации.

**Ключевые слова:** *Pisum sativum*, засоление, транспирация, жасмоновая кислота, сигналинг, ксилема, устьица, иммулокализация.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010062, **EDN:** VCLTSS

### ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв отрицательно сказывается на росте и урожайности сельскохозяйственных растений как за счет снижения доступности почвенной влаги (дефицита воды), так и токсического действия ионов (ионного стресса) [1]. К сожалению, современные глобальные изменения климата и орошение сельскохозяйственных посевов приводят к тому, что площади засоленных почв постоянно расширяются [2]. В сложившейся ситуации потери урожая от засоления можно уменьшить за счет повышения солеустойчивости растений.

Адаптация растений к изменениям окружающей среды требует передачи сигналов от корней к побегам и наоборот, что формирует системный ответ на уровне целого растения [3]. Например, корни могут использовать гормоны или их предшественников, чтобы предупреждать побеги об ухудшении состояния почвы и повышать устойчивость к стрессу [4, 5]. Известно, что

жасмонаты участвуют в регуляции развития растений и реакции на стрессы окружающей среды [3]. Жасмоновая кислота (ЖК) и ее производные — жасмонаты — образуются путем оксигенации полиненасыщенных жирных кислот, находящихся в мембранах [6]. Транспорт ЖК и ее производных между органами в растениях в основном изучали и обсуждали в отношении системного ответа, индуцированного поранением [7]. Было показано, что ранение вызывает локальное накопление жасмонатов как в поврежденных листьях, так и в дистальных, неповрежденных листьях, тем самым запуская защитные реакции растений [8]. Следовательно, жасмонаты могли участвовать в передаче подвижного раневого сигнала [9].

Установлено, что жасмонаты играют важную роль в реакции растений на солевой стресс [10, 11]. Имеются данные о том, что засоленность увеличивает содержание жасмонатов в листьях [12] и корнях [13] и индуцирует экспрессию генов, участвующих в биосинтезе ЖК [14]. Показано, что уровень накопления жасмонатов был выше у солеустойчивых сортов культур по сравнению с чувствительными сортами [15],

<sup>§</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-24-00187.



а предобработка жасмонатами значительно снижала негативное воздействие засоления [16, 17].

Адаптация к засолению зависит от реакции органов растений, удаленных от места восприятия солевых раздражителей. Быстрое закрытие устьиц проростков ячменя, подвергшихся солевому стрессу, поддерживало гидратацию листьев и рост клеток листа в условиях пониженного поступления воды из корней в условиях засоления [18]. Было показано, что при засухе снижение устьичной проводимости зависит от доставки абсцизовой кислоты (АБК) из корней [5]. Известно также, что ЖК закрывает устьица [19]. Однако, насколько нам известно, не изучали участие жасмонатного сигнала, передаваемого от корней к побегам в связи с контролем закрытия устьиц у растений, подвергшихся солевому стрессу. Известно, что концентрация жасмонатов в ксилемном соке увеличивается в условиях засухи. В свою очередь, на фоне засухи жасмонаты, транспортируемые по ксилеме, снижали устьичную проводимость в побегах томата [20]. Представляло интерес выяснить, могут ли вызванные солью изменения концентрации ЖК в ксилеме способствовать закрытию устьиц при засолении и сопоставить роль ЖК с известным участием АБК в этом процессе. Таким образом, цель работы — изучение влияния засоления на локализацию и содержание АБК и ЖК в листьях растений гороха, связанное с изменением транспирации, а также вызванных солью изменений содержания ЖК в корнях и соке ксилемы.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на растениях гороха *Pisum sativum* сорта Сахарный 2 агрофирмы “Аэлита”. Семена гороха обеззараживали смесью 96%-го этанола и 3%-ного пероксида водорода (в соотношении 3 : 1) в течение 10 мин. Растения выращивали в гидропонной культуре на 10%-ном питательном растворе Хогланда—Арнона в кюветах объемом 5 л. Проростки выставляли на светоплощадку с 14-часовым фотопериодом, освещенностью 400–500 мкмоль м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>ФАР (лампы ZN-500 и DNAT400) и температурой 24/18 °С (день/ночь), поддерживая аэрацию раствора. Далее проростки растений переносили на раствор 50 мМ хлорида натрия для изучения кратковременного (1.5–4.5 ч) или длительного (4 сут) воздействия соли. Контрольные растения, не подверженные воздействию солевого стресса, пересаживали на свежий 10%-ный питательный раствор Хогланда—Арнона. Замену растворов осуществляли каждые сутки. Транспирацию проростков определяли гравиметрическим методом.

Метилжасмонат (Sigma, St Louis, США) растворяли в 80%-ном этаноле и добавляли в 0.05%-ный раствор Твин 20 на дистиллированной воде в конечной концентрации гормона 10 мМ. Концентрация

метилжасмоната для экзогенной обработки растений гороха была подобрана в предварительных экспериментах. За 1 сут до начала эксперимента растения рассаживали по стаканчикам, в день эксперимента побеги растений гороха в фазе 2-х настоящих листьев опрыскивали раствором метилжасмоната, избегая его попадания в питательный раствор. Побеги контрольных растений опрыскивали раствором Твина 20 и этанола в той же концентрации.

Ксилемный экссудат собирали для определения количественного содержания в нем ЖК. Для этого проростки погружали в воду и отделяли главный корень, на который надевали силиконовую трубу и оставляли на 1 ч для экссудации. Корни контрольных растений помещали в питательный раствор Хогланда—Арнона, а растения, подвергшиеся солевому стрессу, — в питательный раствор с 50 мМ NaCl.

В ксилемный экссудат добавляли этанол до конечной концентрации 80%, и раствор инкубировали в течение ночи при 4 °С. После упаривания этанола проводили экстракцию ЖК, как описано ранее в [21]. После выпаривания диэтилового эфира гормоны растворяли в 80%-ном этаноле и отбирали аликвоты для количественного определения методом иммуноанализа с использованием специфических антител к ЖК (1 : 6000) (Agrisera, Vannas, Швеция) по методике [22]. Поток жасмонатов из корней рассчитывали путем умножения их концентрации на объем ксилемного экссудата, собранного с одного растения за 1 ч.

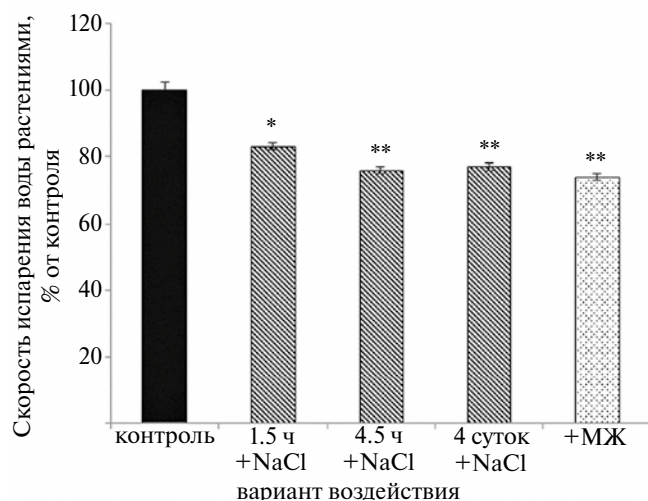
Для иммунохимической локализации фитогормонов в листьях и корнях (базальная и растущая зона) растений кусочки тканей размером 5 мм фиксировали в фосфатно-солевом буфере (PBS) pH 7.2, содержащем 4% гидрохлорида N-(3-диметиламинопропил)-N'-этилкарбодиимида (Merck, Дармштадт, Германия) в течение 12 ч при 4 °С, а затем в 4%-ном параформальдегиде (Riedel de Haen, Зельце, Германия) и 0.1%-ном глutarальдегиде (Sigma, Штайнхайм, Германия) [23]. Ткани растений заливали в смолу JB4 (Electron Micrography Sciences, Hatfield, PA, США). Срезы (1.5 мкм) получали на микротоме HM 325 MICROM (Laborgerate, Walldorf, Германия). Для локализации ЖК и АБК в тканях использовали специфические первичные антитела против ЖК (Agrisera, Vannas, Швеция) или АБК [23]. После промывки на срезы наносили вторичные антитела против иммуноглобулинов кролика, конъюгированные с Alexa Fluor 555 (для корней) или 488 (для листьев) (Invitrogen, Рокфорд, Иллинойс, США). Срезы покрывали стеклами и просматривали в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе с использованием FV3000 FluoView (FV31-HSD) (Олимп, Токио, Япония) и лазерным возбуждением 561 или 488 нм.

## РЕЗУЛЬТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Быстрым, уже в течение 1 ч, видимым проявлением воздействия солевого стресса на растения гороха являлось изменение скорости потери воды с поверхности их листовых пластинок. Засоление питательного раствора внесением хлорида натрия в концентрации 50 мМ вызывало снижение транспирации 8-суточных растений гороха. Постепенное уменьшение транспирации на 17% наблюдали уже в течение 1 ч после начала засоления, последующие 4 ч транспирация поддерживалась на уровне 76% от данного показателя контрольных нестрессированных растений. Более того, даже через 4 сут воздействия засоления транспирация опытных растений была меньше и поддерживалась на уровне 77% от транспирации контрольных, не подвергшихся засолению растений (рис. 1).

Наблюдаемое снижение транспирации растений на фоне солевого стресса было логичным и ожидаемым. Добавление соли в питательный раствор повышало его осмотическое давление, тем самым снижая градиент водного потенциала между раствором и клетками корня растения. Таким образом, нарушалось поступление воды в корни, и растения начинали испытывать дефицит воды. Подобная реакция растений на внесение в питательную среду осмотиков описана в литературе [24] и нами на одностолбчатых растениях [18] и растениях гороха [23].

В данной реакции растений могли принимать участие фитогормоны (АБК и жасмонаты), локализацию которых выявляли на срезах тканей специфическими



**Рис. 1.** Влияние засоления и обработки побегов метилжасмонатом (+МЖ, 10 мМ) на скорость потери воды 8-суточными растениями гороха (*Pisum sativum*) ( $n = 100$ ). Время после внесения в питательный раствор хлорида натрия (50 мМ) составило 1.5, 4.5 ч и 4 сут. Одна и две звездочки обозначают средние, достоверно отличающиеся от контрольных показателей при  $p \leq 0.05$  и  $p \leq 0.01$  соответственно ( $t$ -test).

антителами. Уменьшение испарения воды с поверхности листьев сопровождалось накоплением в них стрессовых гормонов: АБК (уже в первый час после начала воздействия стресса) (рис. 2) и жасмоновой кислоты (через 4.5 ч после начала засоления) (рис. 3). На рис. 2 представлены результаты иммуногистохимической локализации АБК в листьях через 1 ч после внесения соли в питательный раствор опытных и контрольных нестрессированных растений гороха.

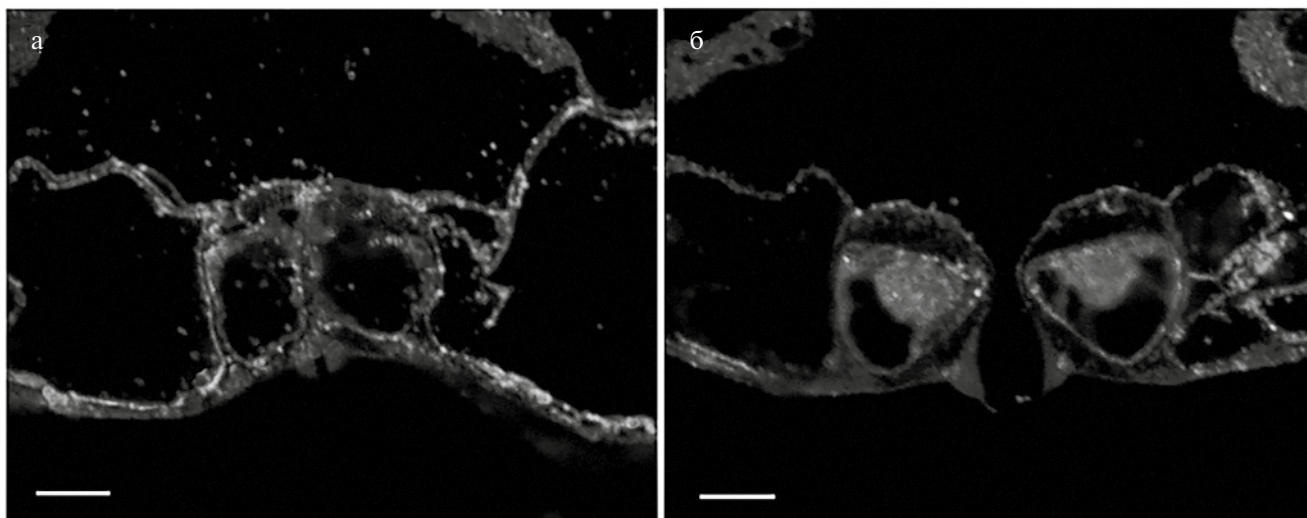
Усиление иммунного окрашивания при использовании специфических антител к АБК в устьичных клетках листьев на фоне засоления указывало на накопление данного гормона и его участия в быстрой реакции устьиц при воздействии стресса. Способность АБК снижать устьичную проводимость растений в условиях стрессовых воздействий (при засухе, засолении, изменении температуры воздуха и т.п.) подробно изучали [25, 26]. Оценка концентрации АБК в ксилемном соке показала отсутствие ее увеличения при засолении [27]. Снижение гидратации листьев при обезвоживании могло запустить быстрый синтез АБК в самих листьях [28].

Через 1 ч после начала воздействия засоления не обнаружили накопления в листьях жасмоновой кислоты (данные не приведены), однако через 4 ч на фоне пониженной транспирации растений в условиях засоления было выявлено усиление иммунного окрашивания на срезах листьев, обработанных специфическими антителами к жасмоновой кислоте (рис. 3).

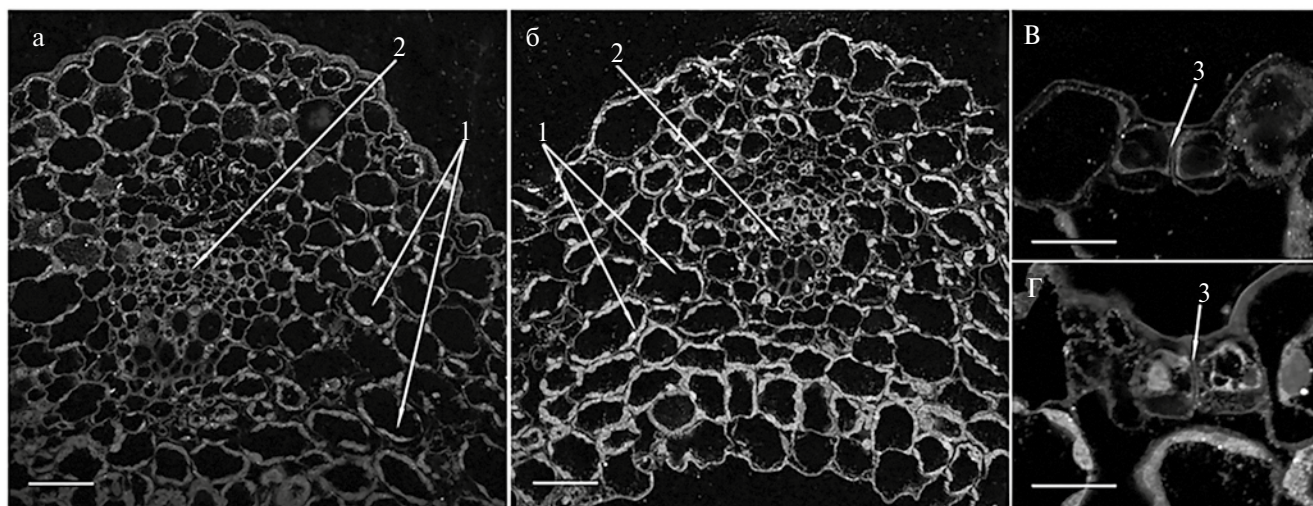
При этом усиление свечения при засолении наблюдали в клетках мезофилла, проводящих пучков и устьичных клетках листьев растений. О специфичности окрашивания можно было судить по отсутствию окрашивания в образцах, обработанных сывороткой, не содержащей антител к исследованным гормонам (данные не приведены). Способность жасмонатов влиять на транспирацию подтвердилась в экспериментах с экзогенной обработкой растений гороха жасмонатами. Опрыскивание побегов растений гороха раствором метилжасмоната в концентрации 10 мМ приводило к снижению их транспирации (рис. 1).

В течение 1.5 ч после опрыскивания побегов транспирация обработанных растений постепенно снижалась и к концу данного периода была на 30% меньше, чем транспирация контрольных необработанных растений гороха. Таким образом, поддержание пониженной транспирации растений гороха при действии засоления, наблюдаемое в нашем опыте через 4.5 ч после внесения в питательный раствор хлорида натрия, могло происходить за счет накопления в них жасмонатов.

Описываемое в литературе системное действие жасмонатов [7] позволило предположить, что источником накопления жасмонатов в листьях могли стать корни, оказавшиеся в солевой среде. На рис. 4 представлены результаты иммуногистохимической



**Рис. 2.** Локализация АБК в устьичных клетках листьев 8-суточных контрольных нестрессированных растений гороха (*Pisum sativum*) (а) и через 1 ч после засоления (б) питательного раствора внесением хлорида натрия (50 мМ). Линейка соответствует 5 µм.



**Рис. 3.** Локализация жасмоновой кислоты в тканях листьев и устьичных клетках 8-суточных контрольных нестрессированных растений гороха (*Pisum sativum*) (а, в) и через 4 ч после засоления (б, г) питательного раствора внесением хлорида натрия (50 мМ). Линейка соответствует 40 µм (а, б) и 5 µм (в, г); 1 — мезофилл, 2 — проводящий пучок, 3 — устьица.

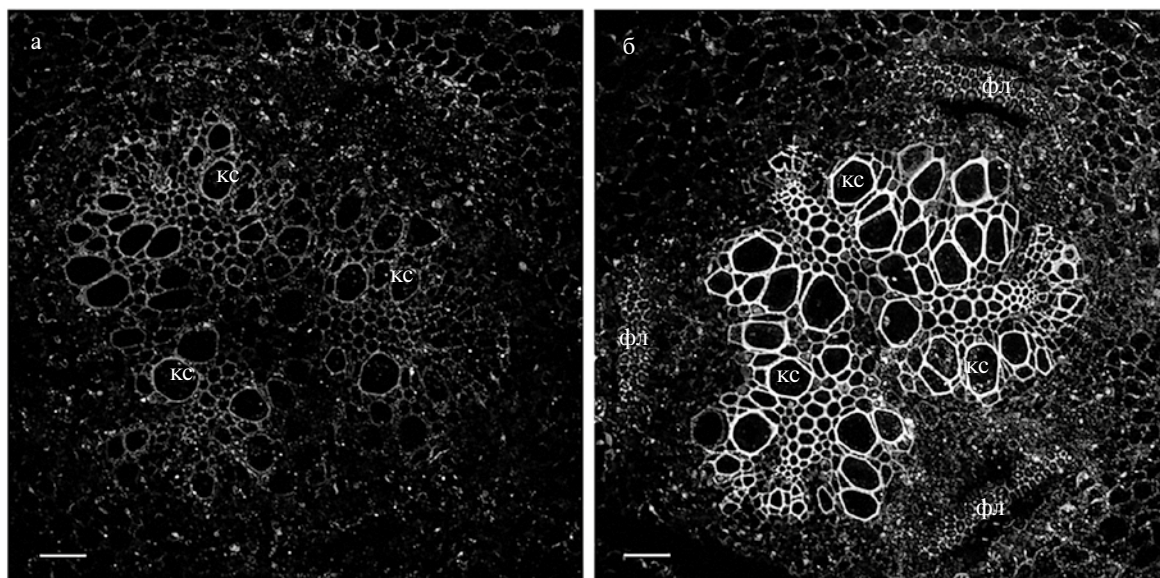
локализации жасмоновой кислоты в тканях дифференцированной проводящей зоны корня через 1.5 ч после засоления питательного раствора.

Локализация жасмоновой кислоты на срезах базальной зоны корней контрольных растений гороха выявила незначительное присутствие жасмонатов в проводящих тканях центрального цилиндра. При этом слабое свечение обнаружили в клетках ксилемы, но не флоэмы (рис. 4а). Засоление питательного раствора растений 50 мМ хлоридом натрия уже через 1.5 ч воздействия вызвало усиление свечения при использовании сывортки к жасмонатам, что свидетельствовало о возрастании их уровня в проводящих тканях базальной зоны корня (рис. 4б) и повышении содержания жасмонатов в ксилеме и флоэме

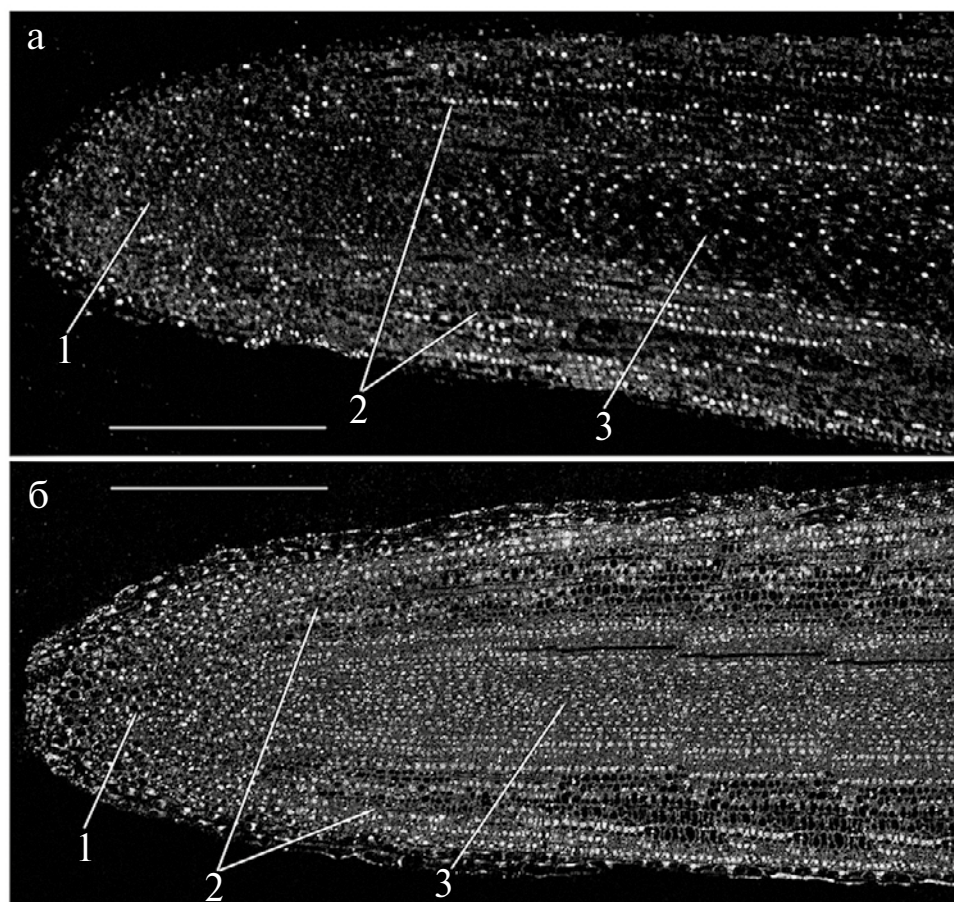
корней стрессированных растений гороха. Следует отметить, что наблюдаемое свечение было больше в области клеток ксилемы. Действительно, расчет доставки жасмоновой кислоты из корней в побеги, учитывая ее концентрацию в ксилемном соке и уровень транспирации, выявил ее увеличение в 7 раз (0.97 и 6.9 нг/растение/ч в контроле и опыте соответственно) уже через 1.5 ч воздействия засоления.

Исследование локализации жасмоновой кислоты на продольных срезах растущей зоны корней контрольных растений показало свечение в области меристемы, которое снижалось по мере удаления от кончиков корней (рис. 5а). Окрашивание тканей в области центрального цилиндра было более слабым, чем в формирующейся коре корня.





**Рис. 4.** Локализация жасмоновой кислоты на поперечных срезах проводящих тканей базальной зоны корня на удалении 5–7 мм от основания побега 8-суточных контрольных нестрессированных растений (а) и через 1.5 ч на фоне засоления, вызванного добавлением 50 мМ хлорида натрия (б) в питательный раствор растений гороха. Линейка соответствует 50  $\mu\text{м}$ ; кс – ксилема, фл – флоэма.



**Рис. 5.** Локализация жасмоновой кислоты на продольных срезах меристематической зоны корней 11-суточных контрольных нестрессированных растений (а) и через 4 сут на фоне засоления, вызванного добавлением 50 мМ хлорида натрия (б) в питательный раствор растений гороха. Линейка соответствует 500  $\mu\text{м}$ ; 1 – корневой чехлик, 2 – кора, 3 – центральный цилиндр.

Присутствие хлорида натрия в питательном растворе в течение 4-х сут увеличивало интенсивность свечения тканей растущей зоны корней, обработанных антителами к жасмоновой кислоте (рис. 56). Окрашивание было особенно заметно в области формирующегося в меристеме корня центрального цилиндра, свидетельствуя о повышении уровня жасмонатов в кончиках корней растений под влиянием засоления. Таким образом, повышенный уровень жасмонатов в кончиках корней стрессированных растений, зафиксированный даже через 4 сут на фоне засоления вполне мог быть источником накопления жасмонатов в побегах.

В литературе также имеются сведения об увеличении содержания жасмонатов в корнях растений при действии стрессовых факторов. Например, в работе [29], как и в случае с АБК [30], накопление жасмонатов при засолении связывали с дефицитом воды и снижением оводненности тканей. Показано увеличение под влиянием засоления экспрессии генов, контролирующих синтез жасмонатов [29].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили, что синтезируемая в корнях жасмоновая кислота действует как сигнал, транспортируемый через ксилему и участвующий в контроле транспирации в условиях засоления. Жасмоновая кислота и жасмонаты, скорее всего, будут действовать совместно с АБК, что соответствует литературным данным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. El. Sabagh A., Islam M.S., Skalicky M., Ali Raza M., Singh K., Anwar Hossain M., Hossain A., Mahboob W., Iqbal M.A., Ratnasekera D., Singhal R.K., Ahmed S., Kumari A., Wasaya A., Sytar O., Brestic M., ÇIG F., Erman M., Habib Ur Rahman M., Ullah N., Arshad A. Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies // *Front. Agron.* 2021. V. 3. P. 661932. DOI:10.3389/fagro.2021.661932
2. Navarro-Torre S., Garcia-Caparrós P., Nogales A., Abreu M.M., Santos E., Cortinha A.L., Caperta A.D. Sustainable agricultural management of saline soils in arid and semi-arid Mediterranean regions through halophytes, microbial and soil-based technologies // *Environ. Exp. Bot.* 2023. V. 212. P. 105397. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2023.105397
3. Lucas W.J., Groover A., Lichtenberger R., Furuta K., Yadav S.R., Helariutta Y., He X.Q., Fukuda H., Kang J., Brady S.M., Patrick J.W., Sperry J., Yoshida A., López-Millán A.-F., Grusak M.A., Kachroo P. The plant vascular system: Evolution, development and functions // *J. Integr. Plant Biol.* 2013. V. 55. P. 294–388. DOI: 10.1111/jipb.12041
4. Jackson M. Hormones from roots as signals for the shoots of stressed plants // *Trends Plant Sci.* 1997. V. 2. P. 22–28. DOI:10.1016/S1360-1385(96)10050-9
5. Davies W.J., Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil // *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1991. V. 42. P. 55–76. DOI:10.1146/annurev.pp.42.060191.000415
6. Wasternack C., Hause B. Jasmonates: Biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth and development. An update to the 2007 review in *Annals of Botany* // *Ann. Bot.* 2013. V. 111. P. 1021–1058. DOI:10.1093/aob/mct067
7. Lacombe B., Achard P. Long-distance transport of phytohormones through the plant vascular system // *Curr. Opin. Plant Biol.* 2016. V. 34. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.06.007>
8. Ali M.S., Baek K.-H. Jasmonic acid signaling pathway in response to abiotic stresses in plants // *Inter. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21(2). P. 621, DOI:10.3390/ijms21020621
9. Li M., Wang F., Li S., Yu G., Wang L., Li Q., Zhu X., Li Z., Yuan L., Liu P. Importers drive leaf-to-leaf jasmonic acid transmission in wound-induced systemic immunity // *Mol. Plant.* 2020. V. 13. P. 1485–1498. DOI:10.1016/j.molp.2020.08.017
10. Abouelsaad I., Renault S. Enhanced oxidative stress in the jasmonic acid-deficient tomato mutant def-1 exposed to NaCl stress // *J. Plant Physiol.* 2018. V. 226. P. 136–144. DOI:10.1016/j.jplph.2018.04.009
11. Ahmad B., Raina A., Naikoo M.I., Khan S. Role of methyl jasmonates in salt stress tolerance in crop plants // *Plant Signal. Mol. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier*, 2019. P. 371–384. DOI:10.1016/B978-0-12-816451-8.00023-X
12. Liu H.R., Sun G.W., Dong L.J., Yang L.Q., Yu S.N., Zhang S.L., Liu J.F. Physiological and molecular responses to drought and salinity in soybean // *Biol. Plant.* 2017. V. 61. P. 557–564. DOI:10.1007/s10535-017-0703-1
13. Akhiyarova G., Vafina G., Veselov D., Kudoyarova G. Immunolocalization of jasmonates and auxins in pea roots in connection with inhibition of root growth under salinity conditions // *Inter. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. P. 15148. <https://doi.org/10.3390/ijms242015148>
14. Delgado C., Mora-Poblete F., Ahmar S., Chen J.T., Figueroa C.R. Jasmonates and plant salt stress: Molecular players, physiological effects, and improving tolerance by using genome-associated tools // *Inter. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22. P. 3082. DOI:10.3390/ijms22063082

15. Kang D.-J., Seo Y.-J., Lee J.D., Ishii R., Kim K., Shin D., Park S., Jang S., Lee I.-J. Jasmonic acid differentially affects growth, ion uptake and abscisic acid concentration in salt-tolerant and salt-sensitive rice cultivars // *J. Agron. Crop Sci.* 2005. V. 191. P. 273–282. DOI:10.1111/j.1439-037X.2005.00153.x
16. Yoon J.Y., Hamayun M., Lee S.-K., Lee I.-J. Methyl jasmonate alleviated salinity stress in soybean // *J. Crop. Sci. Biotechnol.* 2009. V. 12. P. 63–68. DOI:10.1007/s12892-009-0060-5
17. Javid M.G., Sorooshzadeh A., Moradi F., Modarres Sanavy S.A.M., Allahdadi I. The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants // *Aust. J. Crop. Sci.* 2011. V. 5. P. 726–734.
18. Fricke W., Akhiyarova G., Veselov D., Kudoyarova G. Rapid and tissue-specific changes in ABA and in growth rate in re-sponse to salinity in barley leaves // *J. Exp. Bot.* 2004. V. 55. P. 1115–1123. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh117>
19. Förster S., Schmidt L.K., Kopic E., Anschütz U., Huang S., Schlücking K., Köster P., Waadt R., Larrieu A., Batistič O., Rodriguez P.L., Grill E., Kudla J., Becker D. Wounding-induced stomatal closure requires jasmonate-mediated activation of gork K<sup>+</sup> channels by a Ca<sup>2+</sup> sensor-kinase CBL1-CIPK5 complex // *Dev. Cell.* 2019. V. 48. P. 87–99. DOI:10.1016/j.devcel.2018.11.014
20. De Ollas C., Arbona V., Gómez-Cadenas A., Dodd I.C. Attenuated accumulation of jasmonates modifies stomatal responses to water deficit // *J. Exp. Bot.* 2018. V. 69. P. 2103–2116. DOI:10.1093/jxb/ery045
21. Veselov S.U., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyulizade V.G., Mustafina A.R., Kof E.K. Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // *Physiol. Plant.* 1992. V. 86. P. 93–96.
22. Korobova A., Ivanov R., Timergalina L., Vysotskaya L., Nuzhnaya T., Akhiyarova G., Kusnetsov V., Veselov D., Kudoyarova G. Effect of low light stress on distribution of auxin (indole-3-acetic acid) between shoot and roots and development of lateral roots in barley plants // *Biology.* 2023. V. 12. P. 787. DOI:10.3390/biology12060787
23. Akhiyarova G.R., Ivanov R.S., Ivanov I.I., Finkina E.I., Melnikova D.N., Bogdanov I.V., Nuzhnaya T., Ovchinnikova T.V., Veselov D.S., Kudoyarova G.R. Effects of salinity and abscisic acid on lipid transfer protein accumulation, suberin deposition and hydraulic conductance in pea roots // *Membranes.* 2021. V. 11. P. 762. DOI:10.3390/membranes11100762
24. Passioura J.B., Munns R. Rapid environmental changes that affect leaf water status induce transient surges or pauses in leaf expansion rate // *Austral. J. Plant Physiol.* 2000. V. 27. P. 941–948.
25. Agurla S., Gahir Sh., Munemasa Sh., Murata Y., Raghavendra A.S. Mechanism of stomatal closure in plants exposed to drought and cold stress // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2018. V. 1081. P. 215–232. DOI:10.1007/978-981-13-1244-1\_1
26. Ахиярова Г.Р., Фрике В., Веселов Д.С., Кудоярова Г.Р., Веселов С.Ю. Накопление и распределение АБК в тканях листа при кратковременном действии засоления указывает на ее роль в регуляции устьичной проводимости // *Цитология.* 2006. Т. 48(11). С. 918–923.
27. Шарипова Г.В., Иванов Р.С., Высоцкая Л.Б., Ахиярова Г.Р. Влияние засоления на устьичную и гидравлическую проводимость, а также на уровень аквапоринов в клетках листьев растений ячменя, различающихся по солеустойчивости // *Biomics.* 2021. V. 13(3). P. 280–287. DOI:10.31301/2221-6197.bmcs.2021-19
28. Zabadal T.J. A water potential threshold for the increase of abscisic acid in leaves // *Plant. Physiol.* 1974. V. 53. P. 125–127. DOI:10.1104/pp.53.1.125
29. Valenzuela C.E., Acevedo-Acevedo O., Miranda G.S., Vergara-Barros P., Holuigue L., Figueroa C.R., Figueroa R.M. Salt stress response triggers activation of the jasmonate signaling pathway leading to inhibition of cell elongation in *Arabidopsis* primary root // *J. Exp. Bot.* 2016. V. 67. P. 4209–4220. DOI:10.1093/jxb/erw202
30. Sack L., John G.P., Buckley T.N. ABA Accumulation in dehydrating leaves is associated with decline in cell volume, not turgor pressure // *Plant Physiol.* 2018. V. 176. P. 489–495. DOI:10.1104/pp.17.01097

## Participation of Jasmonic Acid in the Long-Distance Signalling from Roots to Shoots of Peas Plants under Salinity

G. R. Akhiyarova<sup>a, #</sup>, G. Kh. Vafina<sup>a</sup>, A. V. Korobova<sup>a</sup>, I. I. Ivanov<sup>a</sup>, A. R. Giniyatullin<sup>a, b</sup>, E. R. Gaffarova<sup>a, b</sup>, M. I. Garipova<sup>b</sup>, G. R. Kudoyarova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Ufa Institute of Biology of Ufa Federal Research Center of the RAS,  
prosp. October 69, Ufa 450054, Bashkortostan, Russia*

<sup>b</sup>*Ufa University of Science and Technology,  
ul. Zaki Validi 32, Ufa 450076, Bashkortostan, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: akhiyarova@rambler.ru*

Jasmonic acid (JA) and its derivatives are involved in the adaptation of plants to biotic and abiotic stresses, including salinization. However, there is insufficient information about the role of JA in the transmission of signals from organ to organ under the local action of abiotic factors. The signaling role of JA in connection with the reaction of shoots to salinization of the root environment of pea plants has been studied. The results of the effect of salinization on changes in the content of JA in the growing and conducting zones of roots and xylem sap, as well as the localization of JA and abscisic acid (AA) in the leaves of stressed plants due to changes in their transpiration level are presented. The content and localization of JA in leaves and roots of plants were evaluated by immunohistochemical method using specific antibodies. The purpose of this study is to check whether salinity-induced changes in the concentration of JA in roots and xylem sap can explain the accumulation of these hormones in leaves and related transpiration changes.

**Keywords:** *Pisum sativum*, salinity, transpiration, jasmonic acid, signaling, xylem, stomata, immunolocalization.

УДК 58.009:58.01/.07(571.5)

## ЗАПАСЫ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЕТОШИ И ВОЙЛОКА ЛЕЙМУСОВЫХ СООБЩЕСТВ (*Leymus chinensis* (TRIN.) TZVEL.) ЮГА ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ И ОЦЕНКА ИХ УСТОЙЧИВОСТИ К РАЗЛОЖЕНИЮ<sup>§</sup>

© 2025 г. М. Г. Меркушева<sup>1,\*</sup>, Л. Н. Болонева<sup>1</sup>, И. Н. Лаврентьева<sup>1</sup>, Н. К. Бадмаева<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

\*E-mail: merkusheva48@mail.ru

Исследованы запасы и химический состав ветоши и войлока в монодоминантных китайско-леймусовых сообществах южной части Восточного Забайкалья, произрастающих в разных почвенно-экологических условиях резко континентального климата и выполняющих в зимний период протекторные функции для термического и водного режимов верхних горизонтов почв, сохранения почек возобновления растений. Выявлено, что запасы ветоши и войлока значительно варьировали: 2.9–102.9 и 54–107 г/м<sup>2</sup> соответственно. Количество ветоши в основном зависело от видового состава сообществ и степени пастбищной нагрузки. Установлена корреляция накопления ветоши и войлока от продукции доминанта и общей зеленой фитомассы леймусовых сообществ, но связь между содержанием ветоши и войлока в леймусовых сообществах была слабая ( $r = 0.44$ ). Для восстановления оптимального накопления ветоши, согласно величинам подстильно-опадного коэффициента (ПОК) и коэффициента деструкции ( $K_d$ ), потребуется относительно длительный срок. Выявлена высокая отрицательная корреляция между этими показателями ( $r = -0.89... -0.91$ ). Концентрации макроэлементов в ветоши и войлоке разных сообществ определялись видовым составом и обеспеченностью питательными веществами и влагой. По величинам соотношений C : N, C : P, C : N : S : P, Ca : K и Si : Ca в надземной фитомассе сообществ впервые показано, что ветошь и войлок леймусовых сообществ южной части Восточного Забайкалья устойчивы к разложению и минерализации. Однако степень устойчивости может быть скорректирована при изменении видового состава, климатических (засуха, обильные осадки) и антропогенных (весенний пал и степные пожары) условий.

**Ключевые слова:** ветошь, войлок, леймусовые сообщества, химический состав, южные степи, Восточное Забайкалье.

DOI: 10.31857/S0002188125010073, EDN: VCLSRT

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов устойчивого функционирования экосистем выступает сбалансированное соотношение между синтезом фитомассы и ее деструкцией [1, 2]. В этих работах показано, что в степных экосистемах биотические круговороты ускорены

и смещены в почву, где концентрируется основная фитомасса, а из-за аридности климата процессы разложения и минерализации уступают по скорости продуцированию, что нарушает равновесие между синтезом и деструкцией.

Сезонная динамика развития степных сообществ для каждого отрезка вегетационного периода характеризуется определенным сочетанием нарастания и отмирания зеленых частей растений, накоплением на поверхности почвы ветоши и войлока. В результате этих процессов осуществляется возврат в почву зольных элементов и происходит обогащение ее органическими веществами. Цикл разложения войлока в луговых степях, остепненных лугах и галоксерофитной степи проходит в среднем в течение нескольких лет [3, 4]. Сходство оптимума гидротермических условий для жизни фотосинтезируемой части растений

<sup>§</sup>Работа выполнена по темам НИР (Госзадание 121030100228-4 “Эволюционно-генетические, биогеохимические и продукционные функции почв Байкальского региона как компонента биосферы, оценка их ресурсного потенциала и разработка технологий рационального использования и охраны”; 121030900138-8 “Биота наземных экосистем Байкальского региона: состав, структура, эколого-географические особенности”), а также по проекту РФФИ-Бурятия № 18-416-030028 “Поиск перспективных популяций *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. для введения в культуру на основе молекулярно-генетических исследований, параметров биопродуктивности и питательной ценности”.



и организмов, разлагающих фитомассу, показывает на биогеоэкологическую организованность этих ландшафтов, направленную на удержание элементов в системе почва–растение.

Размер накопления войлока в разных типах степной растительности значительно различается и определяется видовым составом и количеством осадков. Например, в степи, лесостепи и лугах запасы войлока могут составлять 8–10, в умеренно засушливых степях – 6, в сухих – 3 т/га [5]. Такие высокие показатели в настоящее время возможны только при заповедном режиме и на территориях с достаточным количеством осадков. В связи с изменением климата запасы войлока существенно снизились в природных степных экосистемах Южно-Минусинской котловины на юге Средней Сибири и в Харанорской степи Юго-Восточного Забайкалья [6].

Важными факторами, влияющими на запасы войлока и длительность его минерализации, являются пастбища [7–9] и степные пожары [10]. Восстановление естественного уровня мортмассы после снятия сильных пастбищных нагрузок может продолжаться годами, например в сухой степи (Тува) накопление мортмассы заняло 10 лет, с 43–107 до 178–250 г/м<sup>2</sup> [11].

Темпы разложения ветоши фитоценозов определяются на начальных стадиях в большей степени их структурой и химическим составом (содержанием легкогидролизуемых углеводов и зольных элементов), на конечных – свойствами почв, численностью аэробных и анаэробных целлюлозолитиков, входящих в состав деструкционного звена, а интенсивность биогенного обмена может быть оценена по разности между количеством синтезированной и разложившейся за год надземной фитомассы [12, 13]. Известно также, что активность трансформации ветоши и войлока зависит от видовой принадлежности растений, например злаки разлагаются медленнее, чем разнотравье и бобовые [14, 15]. Скорость разложения ветоши и войлока может служить критерием, определяющим устойчивость биогеоценоза и позволяющим оценить качественные и количественные показатели малого биологического круговорота [16, 17]. Величина подстилично-опадного коэффициента (ПОК) определяется типом экосистемы, биологическими особенностями вида, фракцией растительного вещества и его химического состава, зависит от почвенно-экологических условий места обитания сообщества. Этот показатель определяется количеством лет, необходимых для накопления ветоши при имеющихся скоростях ежегодного поступления в войлок и последующего разложения. В процессах превращения степного войлока принимают участие не только микроорганизмы, но и представители почвенной фауны. Это многоступенчатый биологический процесс, при котором происходит не только разложение, но и синтез сложных органических соединений [18].

Основная трансформация химического состава растительного материала происходит в звене зеленая масса – ветошь. Войлок служит активным биогеохимическим барьером, задерживающим и вторично накапливающим элементы-биогены. Закономерности трансформации химического состава в звене зеленая фитомасса – ветошь – войлок являются в целом общими для травяных экосистем [19].

Характерной особенностью степных пастбищ Забайкалья является их пригодность для выпаса во все сезоны года, преобладание в травостое злаков, в т.ч. леймуса китайского [20]. Для степных сообществ Восточного Забайкалья изучена сезонная и многолетняя динамика мортмассы до аридизации [21] и в условиях современного климата [22], также имеются данные о микробиологической деструкции опада степных экосистем Юго-Восточного Забайкалья [13]. Показано, что короткий период вегетации трав и низкая влагообеспеченность сезона не способствуют интенсивной минерализации мортмассы. Наличие степного войлока в степях с резко континентальным климатом имеет большое значение для термического и водного режимов верхних горизонтов почв, сохранения почек возобновления в зимний период, т.к. почвы промерзают на глубину 3–4 м.

В настоящее время нами установлено [23], что сходство между видовым составом леймусовых сообществ – слабое или среднее из-за значительной доли в них одновидовых семейств и родов и разных условий их произрастания (галоксероморфная степь, остепненные луга). Это позволяет охарактеризовать леймусовые сообщества как экологически гетерогенные [24]. Первичная продукция сообществ с *L. chinensis* оценена как высокая. Выявлена зависимость накопления питательных веществ от почвенно-экологических условий, продолжительности вегетационного периода и фазы развития растения, адаптационного приспособления этого вида к длительной аридизации, что вызывает его вегетативное размножение за счет снижения генеративного [25]. Несмотря на широкое распространение леймусовых сообществ в Забайкалье, Северной Монголии и Северном Китае, данные о накоплении ветоши, войлока и их химического состава в зависимости от почвенно-экологических условий их произрастания отсутствуют.

Цель работы – определить запасы и химический состав ветоши и войлока в монодоминантных леймусовых сообществах южной части Восточного Забайкалья и дать оценку их устойчивости к разложению и минерализации.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2019 г. в степной зоне Забайкальского края в монодоминантных леймусовых

сообществах (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) в административных районах: Оловянинском — 1–3, Агинском — 4, 5, Дульдургинском — 6 (табл. 1).

Фитоценозы приурочены к разным типам почв, расположенным в галоксерофитной (1) и луговой (2, 3, 5) степи, пойменных остепненных лугах (4, 6).

Выбор районов обусловлен большими площадями травяных экосистем: в Оловянинском р-не сенокосы составляют 98 973, пастбища — 247 608 га, в Агинском р-не — соответственно 55 746 и 326 467 га. Среднегодовая температура воздуха равна  $-3^{\circ}\text{C}$ , сумма температур  $>10^{\circ}\text{C}$  — 1700–1950 $^{\circ}\text{C}$ , гидротермический коэффициент — 1.4. Продолжительность безморозного периода — 90–110 сут [26]. Многолетнее количество осадков в районах исследования составляет 325 мм, за вегетационный период — 306 мм (табл. 2).

В период проведения исследования сумма осадков за май–сентябрь была равна 309 мм. В связи с изменением климата следует отметить крайне неравномерное выпадение количества осадков и их распределение в южной части Забайкальского края, что оказывает большое влияние на формирование всех видов наземной фитомассы (зеленой, ветоши, войлока).

Леймусовые экосистемы в Забайкалье, как указывали выше, произрастают на разных типах почв, различающихся по своим свойствам, особенно гранулометрическому составу, реакции среды, количеству карбонатов, гумуса и др. (табл. 3).

Обеспеченность почв нитратным азотом — очень низкая, подвижным фосфором — от очень низкой до повышенной грации, обменным калием — от средней-повышенной до низкой.

**Таблица 1.** Некоторые характеристики леймусовых сообществ Восточного Забайкалья

№ сообщества, почва	Координаты	Общее проективное покрытие	Проективное покрытие леймуса	Число видов	Содоминанты
		%			
1, солончак	50.93630° с.ш. 115.41905° в.д. h – 635.5 м	80	55	19	<i>Artemisia anetifolia</i>
2, светлогумусовая	50.86464° с.ш. 115.46143° в.д. h – 692.9 м	90	70	16	<i>Carex duriuscula</i>
3, светлогумусовая	50.86435° с.ш. 115.46164° в.д. h – 707.5 м	95	80	24	<i>Thesium longifolium</i>
4, аллювиальная светлогумусовая	50.86311° с.ш. 115.46511° в.д. h – 691.2 м	85	70	20	<i>Equisetum arvense</i>
5, светлогумусовая	51.04865° с.ш. 114.37504° в.д. h – 702.1 м	65	40	17	<i>Carex duriuscula</i>
6, слоисто-аллювиальная гумусовая	50.47533° с.ш. 114.02410° в.д. h – 671.3 м	55	40	9	<i>Potentilla bifurca</i> , <i>Carex duriuscula</i>

**Таблица 2.** Количество осадков в районе исследования (по данным метеостанции Агинское), мм

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средне-годовая норма
2016	3.9	0.2	18.1	6.1	28.7	13.9	31.3	53.4	84.5	4.8	8.0	2.7	256
2017	1.1	3.5	0.7	32.5	24.3	20.5	58.7	91.1	36.2	2.3	1.9	11.2	284
2018	1.3	1.6	7.3	1.0	14.0	61.9	253.4	54.4	65.0	4.6	0.7	0	465
2019	1	0	5	6	1	72	84	98	54	6	8	0	335
средне-голетнее	0	0	0	8	29	59	98	76	44	8	3	0	325

**Таблица 3.** Физико-химические и химические свойства почв под леймусовыми сообществами Восточного Забайкалья

Глубина, см	Содержание фракций (мм), %		pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	ЕКО	Na <sup>2+</sup>	CO <sub>2</sub> карб	Гумус	N <sub>общ</sub>	Подвижные по Мачигину	
	<0.01	<0.001		ммоль(+)/100 г	%			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> K <sub>2</sub> O		
								мг/кг		
Сообщество 1, солончак										
0–3(14)	34	6	8.6	14.0	3.8	17.1	1.5	0.1	19.3	202
3(14)–55(61)	74	15	9.2	6.0	4.3	19.6	0.5	0.1	18.7	72.3
Сообщества 2, 3, светлогумусовая										
0–10(14)	16	2	7.2	16.0	0.2	0.6	2.8	0.1	16.7	121
10(14)–63(67)	33	3	7.7	14.0	0.2	0.8	1.2	0.1	9.3	74.7
Сообщество 4, аллювиальная светлогумусовая										
0–32(36)	22	2	8.0	24.0	0.4	9.0	4.3	0.3	15.3	101
32(36)–80	34	4	7.6	12.0	0.3	1.1	0.5	0.1	9.3	84.4
Сообщество 5, светлогумусовая										
0–23	14	2	7.3	12.0	0.1	0.4	2.8	0.2	34.7	176
23–103	29	4	7.5	10.0	0.1	0.8	0.8	0.1	16.7	86.8
Сообщество 6, слоисто-аллювиальная гумусовая										
0–8	38	5	6.4	14.0	0.1	0.8	3.6	0.2	25.3	239
8–46	23	3	6.6	7.0	0.1	0.8	1.3	0.1	13.3	60.3

Определение проективного покрытия и обилия видов в сообществах проводили по Браун–Бланке на площади 100 м<sup>2</sup> (10 × 10 м). Названия растений даны по [27]. Запасы надземной фитомассы определяли в 3-ю декаду июля. В этот период формируется наибольшая продуктивность трав. Надземную массу определяли укосным методом с площадок 50 × 50 см в пятикратной повторности. Укос разделяли на зеленую массу, ветошь. Войлок отбирали вручную на площадках, после удаления травостоя и ветоши. Пробы очищали от почвы до и после высушивания. Полученные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния. Химический анализ растений проведен по [28].

После мокрого озоления в растениях определяли общий азот и фосфор фотометрическим методом, калий и натрий – пламенно-фотометрическим методом, после сухого озоления – кальций и магний комплексонометрическим методом. Серу определяли турбидиметрическим методом [29], углерод – в модификации метода Тюрина [30], кремний – весовым методом [31].

Подстильно-опадный коэффициент (ПОК) рассчитывали по величине отношения количества войлока к массе ветоши [32]. Скорость разложения войлока определяли по величине коэффициента деструкции:  $K_d = [\Phi / (\Phi + A)] \times 100$  (%), где  $\Phi$  – количество ветоши,  $A$  – войлока.

Классификацию и диагностику почв проводили по [33]. При изучении свойств почв были

использованы общепринятые методы [28]: гранулометрический состав – пипеточный, pH<sub>H2O</sub> – потенциометрический, ЕКО – метод Бобко–Аскинази–Алешинной в модификации ЦИНАО, обменный натрий в солончаке – метод Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой и в незасоленных почвах – пламенно-фотометрический метод, C<sub>орг</sub> – метод Тюрина в модификации Никитина, азот общий – фотометрический метод, карбонаты – газово-люметрический метод, подвижные формы фосфора и калия – метод Мачигина.

Для статистической обработки полученных данных накопления ветоши и войлока использовали программное обеспечение RStudio 2023.12.1. Дескриптивные характеристики представлены в виде медианы, 25 и 75-го процентиля (график box plot). В качестве предварительного статистического метода применяли критерий Краскела–Уоллиса, с последующим попарным сравнением с помощью критерия Манна–Уитни (пакет multcomp). Поправку на множественность сравнений выполняли методом Бенджамини–Хохберга. Корреляционную зависимость определяли с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Данные химического состава обработаны в процессоре Excel из пакета MS Office 2017.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Запасы.** В каждом сообществе выявлено наличие ветоши и степного войлока, но размер их

накопления существенно различался в разных сообществах (рис. 1) и зависел в основном от запасов ветоши, формирующихся в конце вегетационного сезона.

Малое количество ветоши в сообществах 6 и 1 было обусловлено значительной долей в видовом составе малолетников, соответственно 33 и 21%, которые, как правило, представлены разнотравьем с коротким сроком вегетации [23]. Например, количество ветоши различалось между ценозом 1 и сообществами 3–6, между 2–4 и 5 и 6, между 5 и 6. Вариабельность накопления войлока обусловлена разной структурой сообществ, неоднородностью почвенно-экологических условий и воздействием внешних факторов (выпас, пал). По содержанию войлока выявлено различие между фитоценозами 1, 2, 3, 5 и 6. Установлена зависимость накопления ветоши и войлока от продукции доминанта и общей зеленой фитомассы леймусовых сообществ (табл. 4), но коэффициент корреляции между содержанием ветоши и войлока в леймусовых сообществах был слабым ( $r = 0.44$ ). Это обусловлено в основном природными факторами, в частности, сильными весенне-раннелетними ветрами, переносящими ветошь на расстоянии, что характерно для всего Забайкалья, как и осенне-зимний выпас.

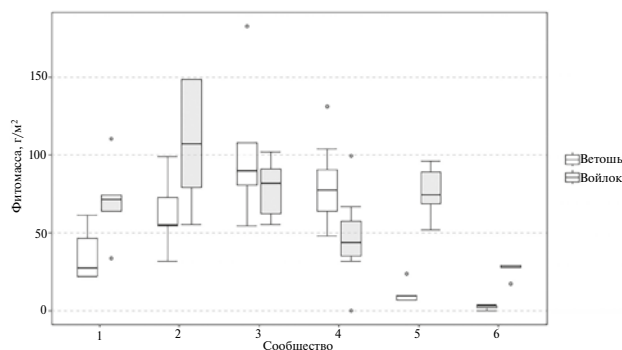


Рис. 1. Содержание ветоши и войлока в леймусовых сообществах юга Восточного Забайкалья, г/м<sup>2</sup>/год.

Таблица 4. Корреляционная матрица связей между показателями структуры надземной фитомассы леймусовых сообществ юга Восточного Забайкалья ( $n = 30$ )

Показатель		Ветошь	Войлок	Зеленая фитомасса		
				леймус	другие виды	общая
Ветошь		1.00	—	—	—	—
Войлок		0.25 (0.163)	1.00	—	—	—
Зеленая фитомасса	леймус	0.77* (0.000)	0.42* (0.017)	1.00	—	—
	другие виды	0.06 (0.755)	0.34 (0.055)	0.00 (0.996)	1.00	—
	общая	0.76* (0.000)	0.56* (0.001)	0.91* (0.000)	0.34 (0.054)	1.00

Примечание. \* статистически значимые, в скобках — величина  $p$ .

В отличие от степных территорий европейской части России и Западной Сибири [5], в леймусовых сообществах основная доля (61–83%) в формировании надземной фитомассы приходилась на зеленые побеги, ветоши (12–22%), кроме сообществ 5–6 (2 и 4% соответственно) (рис. 2). Это связано с ботаническим составом сообщества 5 и пастбищной нагрузкой в 6-м. Количество войлока составляло 15–28%.

Скорость разложения ветоши и войлока может служить критерием, определяющим устойчивость биогеоценоза и позволяющим оценить качественные и количественные показатели малого биологического круговорота [16, 17]. Величина подстильно-опадного коэффициента (ПОК) определяется типом экосистемы, биологическими особенностями вида, фракцией растительного вещества и его химического состава, зависит от почвенно-экологических условий места обитания сообщества. ПОК указывает на количество лет, необходимых для накопления ветоши при имеющихся скоростях ежегодного поступления в войлок и последующего разложения. Согласно нашим расчетам (табл. 5), наиболее нарушенный продукционный процесс был выявлен в сообществах 5 и 6 из-за максимального антропогенного воздействия (выпаса), который способствовал снижению общего проективного покрытия, в т. ч. доли доминанта и уменьшению запасов ветоши.

Для восстановления ее оптимального накопления потребуется относительно длительный срок. Судя по величинам ПОК и  $K_d$ , именно в этих сообществах нарушены продукционные процессы. Корреляция между этими показателями варьировала в очень узком диапазоне:  $-0.89...-0.91$ .

**Химический состав.** Почти полная трансформация химического состава растений происходила при их отмирании — в процессе образования ветоши. Обеднение ветоши физиологически важными элементами объясняется их оттоком из стареющих тканей растений и вторичной утилизацией

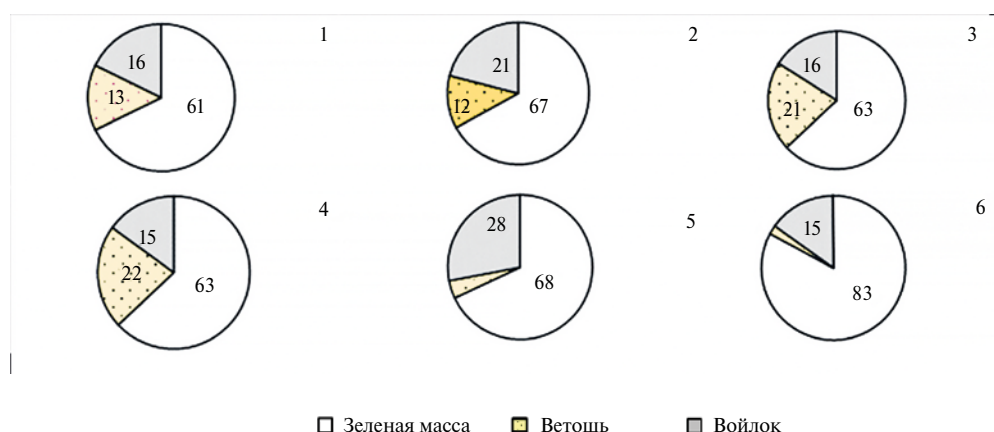


Рис. 2. Распределение фитомассы леймусовых сообществ, % от общей наземной массы, 1, 2, 3, 4, 5, 6 – номера сообществ.

Таблица 5. Величины подстильно-опадного коэффициента и коэффициента деструкции в леймусовых сообществах юга Восточного Забайкалья

Показатель	Сообщества					
	1	2	3	4	5	6
ПОК	<u>2.0</u> 1.8	<u>1.7</u> 2.0	<u>0.8</u> 1.1	<u>0.7</u> 0.5	<u>6.8</u> 7.8	<u>9.0</u> 10.6
Кд	<u>33.6</u> 35.8	<u>36.8</u> 32.9	<u>41.4</u> 46.9	<u>59.7</u> 66.9	<u>12.8</u> 11.3	<u>10.0</u> 8.6

Примечание. Над чертой – среднее арифметическое, под чертой – медиана.

элементов растущими и активно вегетирующими органами [19]. По нашим данным (табл. 6), содержание золы изменялось в небольшом диапазоне (5.76–7.92%). Снизились концентрации N, K и S, увеличилось количество углерода.

Особенностью химического состава войлока под леймусовыми сообществами является относительно высокое содержание сырой золы, Ca, S и Si. По количеству азота, серы, кальция в войлоке галоксерофитного сообщества 1 оно превосходило остальные, т.к. солончак обогащен минеральными солями. Следует выделить сообщество 6, имеющее в минеральном составе войлока повышенные концентрации азота, фосфора, калия и магния, что, возможно, связано с ботаническим составом и наличием отавы из-за нерегулируемого выпаса. Другие сообщества характеризовались практически одинаковым количеством этих элементов.

**Оценка устойчивости к минерализации.** Интенсивное разложение мортмассы возможно только при определенном уровне содержания в ней азота, недостаток которого сильно ограничивает скорость минерализации, и она идет не до конца. Если его количество в разлагающихся остатках не превышает 1.5%, то отсутствует накопление минеральной формы N в почве, т.к. он весь связывается микроорганизмами. Минерализация начинается при соотношении C : N = 20. Однако известно, что в зависимости от характера химических соединений, входящих в состав растительных

тканей, величина этого показателя может меняться. При разложении остатков растений, принадлежащих к разным видам, минерализация азота прекращается при различных соотношениях C : N, причем критическая величина этого показателя варьирует в диапазоне 16.1–23.8 [34]. Согласно полученным данным (табл. 7), величина C : N была характерной для каждого компонента фитомассы: *Leymus chinensis*, других видов, ветоши, войлока. Ветошь и войлок по величине C : N являются трудноразлагаемыми, независимо от почвенно-экологических условий сообществ.

Скорость микробиологического разложения растительного опада степных сообществ Юго-Восточного Забайкалья зависит от видового состава, более устойчивы к разложению степные злаки, обогащенные целлюлозой и лигнином [13]. Процесс деструкции в значительной мере определяется оптимальным соотношением температуры воздуха и достаточной влагообеспеченностью вегетационного сезона, при этих условиях степной растительный опад может разлагаться до 49–66%.

На скорость разложения мортмассы оказывают влияние содержание элементов зольного питания и их качественный состав. Особенно важную роль играет уровень концентрации фосфора, минерализация которого становится возможной лишь при определенных отношениях C : P. Это соотношение должно быть <112 [34]. Если оно находится в пределах

**Таблица 6.** Химический состав ветоши и войлока в леймусовых сообществах юга Восточного Забайкалья, % ( $n = 5$ )

№ сообщества	N	C	Сырая зола	P	K	Ca	Mg	S	Na	Si
Ветошь										
1	$1.17 \pm 0.06$	$37.2 \pm 1.8$	$5.88 \pm 0.26$	$0.28 \pm 0.01$	$0.29 \pm 0.02$	$0.33 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.007$	$0.43 \pm 0.02$	$0.08 \pm 0.004$	$1.81 \pm 0.09$
2	$0.61 \pm 0.04$	$42.3 \pm 1.6$	$6.16 \pm 0.30$	$0.29 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$	$0.29 \pm 0.01$	$0.11 \pm 0.005$	$0.40 \pm 0.02$	$0.04 \pm 0.002$	$2.32 \pm 0.12$
3	$0.44 \pm 0.02$	$22.3 \pm 1.1$	$5.91 \pm 0.27$	$0.22 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.005$	$0.10 \pm 0.005$	$0.03 \pm 0.001$	$2.29 \pm 0.10$
4	$0.58 \pm 0.03$	$47.7 \pm 1.8$	$7.92 \pm 0.30$	$0.19 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.01$	$0.40 \pm 0.02$	$0.11 \pm 0.005$	$0.11 \pm 0.005$	$0.04 \pm 0.002$	$3.32 \pm 0.16$
5	$0.75 \pm 0.04$	$35.0 \pm 1.5$	$5.76 \pm 0.25$	$0.13 \pm 0.01$	$0.32 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.005$	$0.10 \pm 0.005$	$0.03 \pm 0.001$	$3.10 \pm 0.13$
6	$1.01 \pm 0.04$	$37.8 \pm 1.8$	$6.59 \pm 0.30$	$0.14 \pm 0.01$	$0.74 \pm 0.04$	$0.46 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.008$	$0.14 \pm 0.008$	$0.04 \pm 0.002$	$2.22 \pm 0.10$
Медиана	0.62	37.5	6.16	0.23	0.21	0.33	0.11	0.28	0.04	2.30
Войлок										
1	$1.04 \pm 0.04$	$28.1 \pm 1.3$	$9.58 \pm 0.43$	$0.16 \pm 0.01$	$0.20 \pm 0.01$	$0.57 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.008$	$0.62 \pm 0.03$	$0.16 \pm 0.008$	$2.64 \pm 0.12$
2	$0.84 \pm 0.04$	$42.6 \pm 1.7$	$9.17 \pm 0.40$	$0.14 \pm 0.01$	$0.19 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.007$	$0.31 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.002$	$3.26 \pm 0.15$
3	$0.79 \pm 0.04$	$42.1 \pm 1.5$	$7.89 \pm 0.30$	$0.19 \pm 0.01$	$0.21 \pm 0.01$	$0.37 \pm 0.02$	$0.10 \pm 0.005$	$0.27 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.002$	$3.10 \pm 0.13$
4	$0.73 \pm 0.03$	$41.8 \pm 1.8$	$9.90 \pm 0.44$	$0.29 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$	$0.50 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.007$	$0.33 \pm 0.01$	$0.02 \pm 0.001$	$4.03 \pm 0.17$
5	$0.89 \pm 0.04$	$34.5 \pm 1.7$	$8.68 \pm 0.37$	$0.27 \pm 0.01$	$0.41 \pm 0.02$	$0.51 \pm 0.03$	$0.13 \pm 0.008$	$0.36 \pm 0.02$	$0.02 \pm 0.001$	$3.10 \pm 0.12$
6	$1.40 \pm 0.07$	$38.2 \pm 1.8$	$9.19 \pm 0.40$	$0.36 \pm 0.02$	$0.63 \pm 0.03$	$0.45 \pm 0.02$	$0.30 \pm 0.015$	$0.39 \pm 0.02$	$0.04 \pm 0.002$	$2.99 \pm 0.12$
Медиана	0.94	39.2	9.19	0.25	0.25	0.51	0.14	0.35	0.04	3.10

**Таблица 7.** Соотношения макроэлементов в надземной фитомассе леймусовых сообществ юга Восточного Забайкалья

Фитомасса	Номер сообщества					
	1	2	3	4	5	6
C : N						
<i>L. chinensis</i>	22.5	22.8	33.2	31.9	20.8	20.0
Другие виды	15.9	28.2	26.7	19.3	18.0	18.3
Ветошь	31.8	69.4	50.7	75.8	46.7	37.5
Войлок	27.0	50.7	53.3	57.2	38.8	27.3
C : P						
<i>L. chinensis</i>	109	123	135	185	177	182
Другие виды	105	148	133	133	160	198
Ветошь	133	146	192	251	269	270
Войлок	176	304	222	144	128	106
C : N : S : P						
<i>L. chinensis</i>	54:2:1:0.5	114:5:1:0.9	119:4:1:0.9	131:4:1:0.6	99:5:1:0.6	72:4:1:0.4
Другие виды	28:2:1:0.3	74:3:1:0.5	57:2:1:0.4	74:2.6:1:0.5	69:4:1:0.4	69:4:1:0.3
Ветошь	87:3:1:0.6	106:2:1:0.7	211:2:1:1.1	199:3:1:0.8	159:3:1:0.6	115:3:1:0.4
Войлок	45:2:1:0.3	137:3:1:0.5	156:3:1:0.7	127:2:1:0.7	96:2:1:0.7	98:4:1:0.9
Ca : K						
<i>L. chinensis</i>	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
Другие виды	0.3	0.4	0.4	1.1	0.4	0.6
Ветошь	1.1	1.0	1.4	2.9	0.8	0.6
Войлок	2.8	2.7	1.8	1.8	1.2	0.7
Si : Ca						
<i>L. chinensis</i>	2.4	3.3	1.0	3.1	2.0	3.6
Другие виды	3.3	1.1	3.0	0.9	1.6	1.2
Ветошь	3.8	5.9	7.5	3.4	5.7	2.4
Войлок	6.0	6.4	11.2	7.8	7.2	6.1

112–501, то происходит иммобилизация фосфора почвы. Наиболее благоприятные условия для процессов разложения создаются при соотношении C : N : S : P, равном 100 : 8 : 1 : 1.2 [35]. Судя по величинам соотношения C : P, ветошь и войлок во всех леймусовых сообществах, кроме 6-го, трудноминерализуемые.

Соотношения C : N : S : P в ветоши и войлоке степных сообществ не соответствуют условиям для процессов разложения фитомассы, что является, наряду с высоким содержанием кремния, а также целлюлозолигнинового комплекса [36], причиной длительного срока минерализации войлока в южной части Восточного Забайкалья.

Согласно данным табл. 7, в зеленой фитомассе соотношение Ca : K относительно небольшое, что обусловлено доминированием злаков в сообществах. Однако оно существенно возрастает в ветоши и войлоке (кроме сообщества 6), т.к. калий может интенсивно вымываться осадками. Более низкие величины этого показателя в ценозе 6 связаны с ботаническим составом сообщества.

Растения-кремнефилы, к которым относятся злаковые, отличаются высокой скоростью роста и мало содержат кальция, соотношение Si : Ca > 1, у других растений это отношение < 1 и даже < 0.5. Одной из важных функций кремния в растениях является повышение устойчивости к неблагоприятным абиотическим условиям внешней среды, в т.ч. предохранение растений от излишнего испарения из-за снижения интенсивности транспирации [37–41]. Это объясняется пропитыванием стенок эпидермиса и сосудов тканей аморфным кремнием. При переходе растений в леймусовых сообществах в стадию ветоши, а затем и войлока соотношения Si : Ca значительно возрастали.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в южной части Восточного Забайкалья широко распространены монодоминантные китайско-леймусовые сообщества, однако сходство между их видовым составом слабое или среднее из-за значительной доли в них одновидовых семейств

и родов, отличающихся продолжительностью вегетационного периода и фаз развития растений. Большое влияние оказывают условия произрастания (галоксероморфная степь, остепненные луга), в том числе разная обеспеченность почв влагой и доступными формами элементов минерального питания.

В настоящее время в монодоминантных леймусовых сообществах южной части Восточного Забайкалья запасы ветоши и войлока значительно варьировали: 2.9–102.9 и 54–107 г/м<sup>2</sup> соответственно, что определялось видовым составом сообщества, в т.ч. долей доминанта, почвенно-экологическими условиями их произрастания и степенью пастбищной нагрузки. Установлена зависимость накопления ветоши и войлока от продукции доминанта и общей зеленой фитомассы леймусовых сообществ, но коэффициент корреляции между содержанием ветоши и войлока в леймусовых сообществах слабый ( $r = 0.44$ ). Это обусловлено в основном природными факторами, в частности, сильными весенне-раннелетними ветрами, переносящими ветошь на значительные расстояния, что характерно для всего Забайкалья, как и осенне-зимний выпас. Для восстановления ее оптимального накопления, согласно величинам ПОК и Кд, потребуется относительно длительный срок. Корреляция между этими показателями варьировала в очень узком диапазоне ( $r = -0.89...-0.91$ ).

Химический состав ветоши и войлока леймусовых сообществ выявил их зависимость от почвенно-экологических условий произрастания (обеспеченность питательными веществами и влагой). По величинам соотношений С : N, С : P, С : N : S : P, Ca : K и Si : Са первые установлено, что ветошь и войлок китайско-леймусовых сообществ обладают достаточной устойчивостью к разложению и минерализации. Однако степень устойчивости может быть скорректирована при изменении климатических факторов (засуха, обильные осадки), видового состава и антропогенных условий (пастыба, весенний пал и степные пожары).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Титлянова А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Наука СО РАН, 2008. 381 с.
2. *Абатуров Б.Д., Кулакова Н.Ю.* Роль выпаса животных и степных палов в круговороте азота и зольных элементов в степных пастбищных экосистемах // Аридн. экосист. 2010. № 2(42). С. 54–64.
3. *Семенова-Тян-Шанская А.М.* Динамика степной растительности. М.-Л.: Наука, 1966. 174 с.
4. *Семенова-Тян-Шанская А.М.* Накопление и роль подстилки в травяных сообществах. Л.: Наука, 1977. 191 с.
5. *Базилевич Н.А.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
6. *Нечаева Е.Г., Давыдова Н.Д., Щетников А.И., Кузьмин В.А., Напрасникова Е.В., Семенова Л.Н., Воробьева И.Б., Белозерцева И.А., Дубынина С.С., Антоненко А.М.* Тренды ландшафтно-геохимических процессов в геосистемах юга Сибири. Новосибирск: Наука, 2004. 184 с.
7. *Crawley M.J.* Herbivory: the Dynamics of animal–plant interactions. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1983. 437 p.
8. *Holland E.A., Parton W.J., Detling J.K., Coppock D.L.* Physiological responses of plant populations to herbivory and their consequences for ecosystem nutrient flow // Amer. Naturalist. 1992. V. 140. P. 685.
9. *Хакимзянова Ф.И., Зайченко О.А.* Изменение биотических компонентов степных геосистем Минусинской котловины после снятия пастбищной нагрузки // Географ. и природн. ресурсы. 1986. № 1. С. 87.
10. *Frost P.G.H., Robertson F.* The ecological effects of fire in savannas // Determinant. Tropic. Savannas / Ed. Walker B.H. Oxford: OX8 1JJ, 1987. P. 93–140.
11. *Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д., Титлянова А.А.* Сухие и опустыненные степи Тувы. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. С. 77–87.
12. *Гордеева В.А.* Фитомасса и темпы ее разложения в травяных сообществах в условиях техногенного загрязнения почвы: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2018. 24 с.
13. *Санданова И.Б.* Микробиологическая деструкция растительного опада степных экосистем Юго-Восточного Забайкалья. Улан-Удэ, 2007. 20 с.
14. *Паршина Е.К.* Разложение растительного вещества в тундре // Сибир. экол. журн. 2007. № 5. С. 781–787.
15. *Лисецкий Ф.И.* Особенности трансформации растительного вещества степных экосистем // Фундамент. исслед.-я. Биол. науки. 2012. № 3. С. 245–249.
16. *Попова Н.В.* Оценка интенсивности процессов трансформации органического вещества подстилки для диагностики устойчивости экосистем // Вестн. РУДН. Сер. Экол. и безопасность жизнедеят.-ти. 2007. № 1. С. 27–31.
17. *Попова Н.В., Михно В.Б.* Оптимизация ландшафтно-экологической обстановки на основе метода индикации экосистем // Вестн. ВГУ. Сер. Географ. Геоэкол. 2012. № 1. С. 21–28.
18. *Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. М.: Наука, 1980. 187 с.
19. *Титлянова А.А.* Биологический круговорот азота и зольных элементов в травяных биогеоценозах. Новосибирск: Наука, 1979. 151 с.



20. Цыганова Г.П. Протеиновая питательность и минеральный состав степного травостоя в Забайкальском крае // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2015. № 1. С. 32–38.
21. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н. В. Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыс Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
22. Дубынина С.С. Сезонная и многолетняя динамика мортмассы степей Забайкалья в условиях современного климата // Совр. пробл. науки и образ-я. 2017. № 6. С. 262–271.
23. Меркушева М.Г., Бадмаева Н.К., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н. Структура, разнообразие и продукция леймусовых сообществ (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) южной части Восточного Забайкалья // Изв. ИркутГУ. Сер. Биол. Экол. 2022. Т. 40. С. 24–41.  
DOI:10.26516/2073-3372.2022.40.24
24. Королук А.Ю. Экологическая ординация степных сообществ Забайкалья // Уч. зап. ЗабайкалГУ. Сер. Естеств. науки. 2013. № 1(48). С. 26–30.
25. Болонева Л.Н., Бадмаева Н.К., Лаврентьева И.Н., Меркушева М.Г. Качественные показатели питательной ценности леймуса китайского (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) Восточного Забайкалья // Химия раст. сырья. 2021. № 3. С. 191–200.
26. Бобринев В.П., Пак Л.Н. Агролесомелиоративное районирование Забайкальского края // Вестн. КрасГАУ. 2009. № 4. С. 152–157.
27. Определитель растений Бурятии. Улан-Удэ, 2021. 672 с.
28. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
29. Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. М.: Росинформагротех, 2004. 8 с.
30. Янишевский Ф.В., Серегин В.В. Модификация метода Тюрина для определения содержания углерода в растительном материале // Агрохимия. 2000. № 3. С. 69–71.
31. Методы биохимического исследований растений. Л.: Колос, 1987. 430 с.
32. Родин Л.Р., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. Л., М.: Наука, 1965. 253 с.
33. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
34. Enwezor W.O. The mineralization of nitrogen and phosphorus in organic materials of varying C : N and C : P ratios // Plant Soil. 1976. V. 44. P. 237–240.
35. Walker N. Soil microorganisms and plant protection chemicals // Soil biology / Eds. Burges A., Raw F. N.Y.: Academic Press, 1967. 493 p.
36. Чимитдоржиева Г.Д. Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. 388 с.
37. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // Агрохимия. 2019. № 1. С. 86–96.
38. Chanchal M.C.H., RitiThapar K., Deepak G. Alleviation of abiotic and biotic stresses in plants by silicon supplementation // Sci. Agricult. 2016. V. 13. № 2. P. 59–73.
39. Ma J.F. Function of silicon in higher plants // Prog. Mol. Subcell. Biol. 2003. V. 33. P. 127–147.
40. Richmond R.E., Sussman M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient // Cur. Opin. Plant Biol. 2003. № 6. P. 268–272.
41. Ma J.F., Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants // Cell Mol. Life Sci. 2008. V. 65. P. 3049–3057.

# Stocks, Chemical Composition of Grassland Litter and Felts of *Leymus* Communities (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.) in the South of Eastern Transbaikalia and Assessment of Their Resistance to Decomposition

M. G. Merkusheva<sup>a, #</sup>, L. N. Boloneva<sup>a</sup>, I. N. Lavrentieva<sup>a</sup>, N. K. Badmaeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: merkusheva48@mail.ru*

The reserves and chemical composition of grassland litter and felts in monodominant *Leymus chinensis* communities of the southern part of Eastern Transbaikalia, growing in different soil and ecological conditions of a distinctly continental climate and performing protective functions in winter for the thermal and water regimes of the upper soil horizons, the preservation of plant renewal buds, are studied. It was revealed that the stocks of grassland litter and felts varied significantly: 2.9–102.9 and 54–107 g/m<sup>2</sup>, respectively. The amount of grassland litter mainly depended on the species composition of communities and the degree of pasture load. A correlation was established between the accumulation of grassland litter and felts from the dominant production and the total green phytomass of leymus communities, but the relationship between the content of grassland litter and felts in leymus communities was weak ( $r = 0.44$ ). To restore the optimal accumulation of rags, according to the values of the litter fall coefficient (LFC) and the destruction coefficient ( $K_d$ ), will take a relatively long time. A high negative correlation between these indicators was revealed ( $r = -0.89 \dots -0.91$ ). Concentrations of macronutrients in grassland litter and felts from different communities were determined by species composition and availability of nutrients and moisture. According to the values of the C : N, C : P, C : N : S : P, Ca : K and Si : Ca ratios in the aboveground phytomass of communities, it was shown for the first time that the grassland litter and felts of leymus communities in the southern part of Eastern Transbaikalia are resistant to decomposition and mineralization. However, the degree of stability can be adjusted with changes in species composition, climatic (drought, heavy rainfall) and anthropogenic (spring snowfall and steppe fires) conditions.

**Keywords:** grassland litter, felts, leymus communities, chemical composition, southern steppes, Eastern Transbaikalia.

УДК 631.416.1:631.122.2

## ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЗОТНОГО РЕЖИМА ПОЧВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

© 2025 г. А. О. Герасимов<sup>1,\*</sup>, Ю. М. Поляк<sup>1</sup>, Л. Г. Бакина<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –

Федеральный исследовательский центр РАН

197110 Санкт-Петербург, Корпусная ул., 18, Россия

\*E-mail: recchi@rambler.ru

Рассмотрены результаты исследований азотного режима загрязненных нефтью почв за последние годы. Подчеркнута недостаточная изученность данного вопроса для техногенных почв, несмотря на то что загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами может вызвать значительные изменения в круговороте азота и привести к необратимым нарушениям экологических функций почв. Обобщение результатов исследований позволило выявить наиболее информативные показатели для оценки процессов азотного режима и экологического состояния нефтезагрязненных почв. В условиях нефтяного загрязнения в почве возрастает соотношение содержания углерода и азота, снижается нитрифицирующая активность почв, относительно увеличивается доля аммонийных форм азота. Показано, что нарушения процессов азотного цикла, содержания и соотношения содержания разных форм азота, характеризующих определенные стадии его превращения в почве, могут восстанавливаться в различной степени при рекультивации в зависимости от свойств почвы. В настоящий момент наиболее перспективными направлениями исследований процессов азотного цикла в нефтезагрязненных почвах являются: изучение жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, осуществляющих различные стадии процессов азотного цикла, взаимосвязи структуры и разнообразия микробиоты со скоростью процессов биодеструкции нефти и трансформации азотных соединений в загрязненных почвах. Изучение процессов азотного цикла имеет важное значение для оценки последствий загрязнения почв нефтепродуктами и выбора наиболее эффективных стратегий их восстановления.

**Ключевые слова:** нитратный азот, аммонийный азот, рекультивация, микроорганизмы, нефтезагрязнение, почвы.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010084, **EDN:** VCJRCA

### ВВЕДЕНИЕ

Азот – это важнейший компонент почвы, от которого зависит стабильность и функционирование почвенных экосистем. Общие запасы азота в земной коре исчисляются десятками миллиардов тонн.

В пахотном слое разных почв количество азота меняется в широких пределах: в дерново-подзолистых, песчаных и супесчаных почвах – 0.04–0.08, в суглинистых и глинистых – 0.1–0.15%. Наиболее богаты общим азотом серые лесные и черноземные почвы, где его количество достигает 0.3–0.5% и больше [1–3].

Круговорот азота является одним из наиболее важных круговоротов веществ, происходящих в природе, большая часть его цикла происходит с участием биосферы и напрямую связана с почвой [4, 5].

Азот в почвах находится преимущественно в недоступной растениям органической форме, доля минерального азота составляет всего около 1% от общего [6]. Между тем доступность азота является основным фактором, определяющим рост и продуктивность растений [7, 8]. Под влиянием непрерывных биологических процессов органический азот частично переходит в доступные растениям минеральные формы – в нитрат-ионы  $\text{NO}_3^-$ , нитрит-ионы  $\text{NO}_2^-$  и ионы аммония  $\text{NH}_4^+$  [9].

Основу превращений азота составляют процессы минерализации и иммобилизации. При минерализации органический азот превращается в минеральный посредством аммонификации и нитрификации. Начальным процессом минерализации органических соединений является аммонификация – осуществляемый микроорганизмами распад азотсодержащих органических соединений почвы до аммонийного

азота, органических кислот, углекислого газа [10]. Ежегодно в процессе аммонификации высвобождается до 2% азота от общих запасов азотсодержащих органических соединений [11]. В анаэробных условиях аммонийный азот может усваиваться растениями, а в аэробных происходит процесс нитрификации, когда он под влиянием микроорганизмов переходит в нитриты и затем окисляется до нитратов. Таким образом, в почве формируются усваиваемые растениями минеральные формы азота: аммонийная, нитритная, нитратная [12, 13].

Максимальное количество обменного аммония в почвах отмечают весной, затем оно снижается летом и вновь возрастает осенью. Кроме того, объемы обменного аммония возрастают при избыточном и недостаточном увлажнении, а также при холодной погоде. Растения, предпочитающие почвы с высоким уровнем pH, лучше усваивают нитратный азот, а растения кислых почв — аммонийный. Растения способны усваивать до 80% запасов аммонийного азота [14]. Пик нитрификации приходится на первую половину вегетации. Накопление нитратной формы минерального азота определяется потенциальными запасами почвенного плодородия и возрастает с повышением содержания гумуса и общего азота [6, 13].

В зависимости от соотношения C : N в субстрате, может происходить либо накопление аммонийного азота в почве, либо потребление высвобождающегося аммония микроорганизмами — процесс иммобилизации азота [15]. При иммобилизации минеральные соединения азота вновь переходят в органические, не усвояемые растениями. Кроме того, содержание минерального азота в почве уменьшается в результате денитрификации, развивающейся в анаэробных условиях. В процессе денитрификации нитратный азот восстанавливается микроорганизмами до различных газообразных соединений, которые теряются из почвы. Потери азота могут также происходить при значительном выносе аммонийного и нитратного азота урожаем культур и при вымывании азота в составе почвенного раствора [15, 16].

На поглощение корнями растений аммонийных или нитратных ионов влияет аэрация и величина pH окружающего раствора. Нитраты легко абсорбируются корнями, а для поглощения аммония необходим контакт корневого волоска с почвенно-поглощающим комплексом [13].

Весь цикл происходящих в почве превращений азота, в том числе минерализация (преобразование органического азота в неорганический), азотфиксация (преобразование неорганического азота в органический), нитрификация (преобразование  $\text{NH}_4^+$  в  $\text{NO}_3^-$ ) и денитрификация (преобразование  $\text{NO}_3^-$  в  $\text{N}_2$ ), осуществляется благодаря деятельности почвенных микроорганизмов [17, 18]. Преобразование

азота играет ключевую роль в продуктивности и устойчивости почвенных экосистем [19, 20].

Загрязнение почвы различными поллютантами, в том числе нефтью и нефтепродуктами, может вызывать непредсказуемые изменения в круговороте азота и привести к необратимым нарушениям экологического баланса, что является потенциально серьезной экологической проблемой [21–23]. В общих случаях участвующие в круговороте азота микроорганизмы (аммонофицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, азотфиксирующие) под влиянием нефтяного загрязнения в небольших дозах получают стимул к развитию вследствие внесения в почву свежего органического материала. Однако высокие дозы нефтепродуктов угнетают нитрифицирующие бактерии, численность которых не восстанавливается до фонового уровня и через 10 лет после загрязнения [24].

Необходимость более полного понимания поведения азота в условиях нефтяного загрязнения обуславливает актуальность исследований.

#### ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА В ПОЧВЕ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Необходимо отметить, что научных исследований, посвященных изучению воздействия нефтью и нефтепродуктов на содержание азота и азотный режим почв, сравнительно немного. Пути превращения азота в нефтезагрязненных почвах систематически не изучали, количественное определение коэффициентов трансформации азота не проводили [25]. Тем не менее, изучением влияния нефти и различных видов нефтепродуктов на азотный режим почв занимаются ученые ряда стран. Основная часть работ по данной тематике выполнена российскими, нигерийскими, польскими и — в меньшей степени — индийскими и китайскими исследователями.

Нефть является практически безазотистым веществом, поэтому ее попадание в почву способно привести к изменению содержания общего азота вследствие нарушения биологических процессов азотного цикла. Влияние нефтепродуктов на содержание общего азота проявляется в различных почвах по-разному.

Увеличение содержания общего азота в супесчаных почвах было отмечено при 10% и 20%-ном загрязнении их отработанным моторным маслом — до 29.2 и 31.5% от контроля соответственно [26]. Нефтяное загрязнение в дозах 5–50 мл/кг почвы повышало содержание общего азота и органического углерода в почве параллельно увеличению дозы нефти [27]. Увеличение показателей содержания

общего азота в загрязненной сырой нефтью почве почти в 2 раза по сравнению с фоном связывали с фиксацией атмосферного азота микроорганизмами, ассимилировавшими углеводороды.

В ряде исследований количество общего азота в результате нефтезагрязнения, напротив, снижалось. Показано, что загрязнение сырой нефтью уменьшало содержание общего азота через 2 нед после загрязнения в окрестностях нигерийского Порт-Харкорта [28], и даже очень небольшое количество нефти (менее 2% масс.) в зоне нефтеразлива снижало содержание доступного азота в почве [29]. Через 2 нед после загрязнения дизельным топливом в объемах от 1.4 – 5% в почве дельты р. Нигер уменьшилось общее содержание азота и основных катионов. Причем снижение происходило по мере увеличения концентрации поллютанта. Причиной могло стать преобразование микроорганизмами минеральных форм азота в почве в органические. Загрязнение почвы дизельным топливом в дозах 5–15 мл/кг снижало содержание общего азота в надземной части овса *Avena sativa* L. на 30%. Причиной этого стало увеличение численности почвенных микроорганизмов (интенсификация развития денитрифицирующих бактерий с одновременным угнетением нитрификаторов), которые поглощали значительное количество азота, тем самым снижая его доступность для растений [30].

Диагностическая роль соотношения C : N отмечена в литературе при оценке азотного режима нефтезагрязненных почв. Загрязнение почв нефтью – безазотистым веществом – как правило, приводит к увеличению этого показателя. Например, соотношение C : N увеличилось во всех вариантах, достигнув 114.3 на участке с максимальным уровнем загрязнения (5%), что, вероятно, зависело от активности микроорганизмов [30, 31]. Высокое соотношение C : N, приводящее к иммобилизации почвенных нитратов, в сочетании с нефтезагрязнением, по мнению авторов, объясняет низкий уровень содержания нитратного азота в загрязненной почве [32]. После загрязнения товарной нефтью серой лесной почвы Предкамья количество общего азота в ней не изменилось, но снизилось содержание подвижных форм азота (оно было чуть больше контроля, что было обусловлено обволакиванием почвенных частиц нефтяной пленкой, затрудняющей переход питательных элементов в почвенный раствор) и расширилось соотношение между азотом и углеродом с 1 : 13 в контроле до 1 : 17.5 в сильнозагрязненной почве (40 л/м<sup>2</sup>). Эти изменения агрохимических свойств, вызванные высокими дозами нефти, сохранились и через 10 лет [33]. Загрязнение сырой нефтью в дозах от 0.35 до 50 г/кг изменяло содержание минерального азота в заболоченных почвах и соотношение C : N, а также приводило к иммобилизации доступного азота почвенными микроорганизмами, что значительно снижало

возможность поглощения его растениями. Одновременно увеличивалось накопление азота в микробной биомассе почвы [34].

Загрязнение почв нефтью в первую очередь отражается на подвижных, биодоступных формах азота, которые непосредственно связаны с функционированием микробиоценоза и определяют экологическую устойчивость экосистем [35]. Нефтепродукты в почве вызывают снижение биодоступных форм азота и других элементов [30].

Изучение литературных источников позволило выявить общие тенденции: токсическое действие углеводородов изменяет физико-химические свойства почвы, способствует возрастанию соотношения углерода к азоту и фосфору, вызывает ухудшение азотного режима, снижение нитрифицирующей активности почв и увеличение доли аммонийных форм азота. Уменьшение концентрации нитратного азота и возрастание содержания аммонийного азота происходит вследствие нарушения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов. Кроме того, часто наблюдают переизбыток содержания углерода на фоне недостатка азота и фосфора (C : N : P = 100 : 5 : 1).

С увеличением концентрации нефти при ее внесении в светло-каштановую почву Калмыкии в дозах 2.5, 5 и 10% от массы почвы содержание аммонийного азота на загрязненных участках возрастало (с 44.2 в контроле до 66.4, 84.5 и 91.3 мг/кг соответственно), нитратного азота – уменьшалось (с 123 в контроле до 113, 88.4 и 78.2 мг/кг соответственно). Общее содержание азота варьировало в пределах 1620–2440 мг/кг. Также значительно увеличивалось соотношение органического углерода к общему азоту [36]. Нефтяное загрязнение пахотного слоя серой лесной почвы в объеме 2 т/га снизило содержание нитратного азота с 6.5 до 3.8 мг/кг, легкогидролизуемого азота – на порядок, с 41 до 3.8 мг/кг. Количество аммонийного, трудно- и негидролизуемого азота, напротив, существенно возросло. При этом содержание валового азота не изменилось [35].

Также отрицательно влияло на процесс нитрификации и содержание азота загрязнение дизельным топливом и бензином бурой почвы, где было зафиксировано повышенное содержание аммонийного азота и пониженное – нитратного. Загрязняющие вещества ингибировали нитрификацию в следующем порядке: дизельное топливо > дизельное топливо + рапсовое масло > рапсовое масло > бензин + этанол > бензин. Спустя 1.5 мес. после загрязнения добавление рапсового масла в дизельное топливо и этанола в бензин снижало уровень содержания аммонийного азота в почве на 88–99% [37].

Отмечено значительное воздействие нефти в дозах 10 и 20 г/кг на содержание нитратного азота в черноземе выщелоченном и темно-серой лесной почве. В варианте с внесением нефти под культуру сорго

нитратный азот в верхнем горизонте практически отсутствовал (до 1.9 мг/100 г почвы) вследствие резкого угнетения активности нитрификаторов нефтью, а также поглощения его растениями. В контроле количество нитратного азота уменьшалось к осени с 22.5 до 6.8 мг/100 г почвы. Внесение нефти в чернозем способствовало повышению содержания нитратного азота, но через несколько лет нитрификационная способность чернозема тоже угнеталась. Содержание нитратного азота в черноземе и луговой почве достоверно уменьшалось за 3 года при возделывании всех культур — райграса и клевера, овсяницы и ежи [38].

Отрицательное влияние нефтепродуктов на процесс нитрификации и высокая чувствительность нитрифицирующих бактерий к загрязнению почвы сырой нефтью установлены также рядом зарубежных исследователей [39, 40]. Загрязнение почвы бензином и дизельным топливом значительно увеличивало содержание аммонийного азота в ущерб уровню нитратного азота [41]. Это явление объяснялось изменениями в жизнедеятельности микробиоты. Увеличение количества аммонийного азота в нефтезагрязненной почве связывали прежде всего с повышением численности аммонифицирующих микроорганизмов, которым компенсировалось ингибирование углеводородами активности почвенной протеазы. Это приводило к нарушению почвенного гомеостаза и развитию токсикоза почв. Как следствие, угнетался рост растений, нарушались функции фотосинтеза и дыхания [42, 43].

Анализ современного состояния данной проблемы показал, что, несмотря на выявленные нарушения азотного режима, вызванные загрязнением почв нефтью и нефтепродуктами, возможность прогнозирования данных воздействий пока ограничена [44, 45]. Исследования изменений азотного режима почв, вызванных нефтезагрязнением, в естественных условиях ограничены высокой изменчивостью внешней среды, разнообразием почвенной микробиоты и взаимодействием между этими факторами [22]. Данные о круговороте азота в почвах, загрязненных нефтью, очень немногочисленны [45].

Комплексность проблемы изучения азотного режима нефтезагрязненных почв определяется тем фактом, что биологические процессы азотного цикла сами по себе являются очень сложными, разнонаправленными, комплексными и зависящими от условий окружающей среды как непосредственно, так и опосредованно, через нарушения состава и функционирования комплекса почвенных микроорганизмов. Сбалансированность процессов превращения азота естественным образом складывается как результирующая этих процессов, определяет общее экологическое состояние почвы и восстановление нормального функционирования биогеоценоза после

разлива нефти. Вследствие этого изучение процессов азотного цикла в нефтезагрязненных почвах требует разносторонних комплексных исследований, затрагивающих по возможности все необходимые аспекты процессов его трансформации.

## ВЛИЯНИЕ РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ

Выбор методов рекультивации нефтезагрязненных почв должен базироваться на технологиях, которые максимально эффективно восстанавливали бы биологические процессы превращения азота в почвах, во многом определяющие здоровье почвы и нормальное выполнение ею экологических функций.

Азотный режим имеет ведущее значение для восстановления плодородия нефтезагрязненных почв [46]. Сведения о воздействии рекультивационных мероприятий на азотный режим нефтезагрязненных почв в научной литературе немногочисленны и зачастую противоречивы. Очевидно, что по прошествии некоторого времени первоначальные условия, сложившиеся в почве после попадания в нее нефти, меняются. Содержание и соотношение разных форм азота, характеризующих определенные стадии его превращения в почве, меняются. Это происходит по мере включения механизмов самоочищения почвы, а также после внесения в загрязненную почву удобрений и биопрепаратов во время рекультивации. Трансформация показателей азотного режима имеет важное значение при оценке последствий загрязнения почв нефтепродуктами [43].

Обычно по мере снижения содержания нефтяных углеводородов вследствие испарения и минерализации усиливаются процессы нитрификации. Количество аммонийного азота постепенно сокращается, а нитратного — возрастает [40, 47].

Внесение компоста, бентонита и CaO нейтрализовывало влияние бензина и дизельного топлива и изменяло содержание аммонийного и нитратного азота в почве после уборки урожая. Бентонит в дозе 5 см<sup>3</sup>/кг и оксид кальция способствовали увеличению содержания нитратного азота в 4 раза и снижению содержания аммонийного азота (на 11%) в загрязненной бензином почве после уборки ярового ячменя. Бентонит и компост снижали объемы аммонийного азота (на 42 и 35% соответственно) и увеличивали содержание нитратного азота в почве при загрязнении дизельным топливом (2.5 см<sup>3</sup>/кг) [41].

Применение удобрения диаммонийфосфата увеличало содержание нитратного азота в загрязненной нефтью почве в 1.1–1.3 раза при дозах нефти 5 и 10% соответственно. Диаммонийфосфат подавлял денитрификацию, в результате чего азот накапливался в почве. Напротив, препараты Гумат, Урожай-С, Эко-органика стимулировали рост микробиоты, которая

участвовала в процессе денитрификации и снижала содержание нитратного азота в почве по сравнению с контролем в среднем в 1.5–3.3 раза. В загрязненном образце, не обработанном препаратами, при объеме нефти 20% содержание нитратного азота повысилось в 2.3 раза [48].

Внесение перегноя в виде органических и минеральных удобрений для восстановления нефтезагрязненной (2 т/га) серой лесной почвы на 2-й год активизировало микробиологические процессы нитрификации. Они привели к повышенному накоплению нитратного азота и биомассы растений, хотя в первый год количество нитратного азота оставалось низким. Минеральные удобрения способствовали восстановлению количества азота в почве, но изменения произошли только в содержании трудно- и негидролизуемой форм азота. За 4 года эксперимента количество аммонийного азота выросло с 1.7 до 2.2 мг/кг, внесение N60P60K60 привело к его уменьшению с 1.9 до 1.4 мг/кг, а сочетание N60P60K60 с органическим удобрением повысило содержание азота с 2.4 до 2.6 мг/кг. Количество нитратного азота выросло на фоне загрязнения нефтью с 3.8 до 8.6 мг/кг, а при внесении N60P60K60 и органических удобрений — с 5.3 до 13.4 мг/кг соответственно [35].

Содержание общего азота в загрязненных почвах со временем также восстанавливалось. Внесение осадка сточных вод (активного ила) оказывало восстанавливающее действие на почвы, загрязненные дизельным топливом, в которых увеличилось содержание общего азота [30].

Обработка загрязненных сырой нефтью суглинистых песков сельхозугодий обезжиривающими и моющими средствами способствовала увеличению содержания в почве элементов почвенного плодородия — общего азота, углерода и доступного фосфора на 33–103% за счет бактериальной биодеградации нефти. Это биоразложение увеличило фиксацию атмосферного азота. После рекультивации количество азота в почве полностью восстановилось [49].

Во время ремедиации загрязненных дизельным топливом почв в дельте р. Нигер соотношение C : N значительно снизилось, особенно в вариантах с высокими дозами загрязнения. Причиной этого снижения стало сопутствующее увеличение содержания общего азота в почве (на 50–80%) по сравнению с первыми неделями после загрязнения [31].

Вместе с тем, в связи с изменчивостью химических и физических свойств почвы, а также почвенных микробных сообществ, данные, полученные в краткосрочных экспериментах, зачастую противоречивы, особенно при сравнении результатов лабораторных и полевых опытов [21]. Лабораторные исследования, как правило, продолжаются не дольше нескольких недель, а иногда и суток, в то время как в природных условиях процесс биодеструкции нефти в почве

может занимать годы и даже десятилетия [50, 51]. Поэтому для лучшего понимания изменений, происходящих в азотном цикле под влиянием нефти, выявления долгосрочных последствий загрязнения и оценки эффективности восстановления азотного режима почвы, желательно и даже необходимо проведение многолетних полевых экспериментов.

## ВОЗМОЖНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ АЗОТА В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ

Несмотря на наличие упомянутых работ, в настоящее время большинство исследований азотного режима почв по-прежнему преимущественно касается использования азотных удобрений [52–55].

Весьма перспективным представляется изучение роли микроорганизмов в процессах превращения азота в нефтезагрязненных почвах, которая пока фактически не освещена. Малочисленны и спорадичны данные об изменениях видового состава микроорганизмов, осуществляющих различные стадии процессов азотного цикла в нефтезагрязненных почвах [56]. Нет информации о взаимосвязи структуры и разнообразия почвенных микроорганизмов, осуществляющих процессы превращения азота, со скоростью процессов биодеструкции нефти и трансформации азотных соединений в нефтезагрязненных почвах [25].

Столь же малочисленны данные о составе и функциональной активности почвенных микроорганизмов [45]. Известно, что микробная сукцессия с активным развитием микроорганизмов, устойчивых к нефтяным углеводородам и/или способных к их деградации, происходит достаточно быстро [57]. Значительно больше времени требуется микроорганизмам для адаптации метаболизма к углеводородам нефти. Адаптационные процессы, включающие динамику популяций, сосуществование видов и генетическую изменчивость, обычно ускоряют естественную деградацию углеводородов [58]. Поддержание гомеостаза зависит от видового состава микробиоты, круговорота азота и механизмов микробного метаболизма в загрязненной нефтью почве. В условиях загрязнения метаболическая активность микробиоты определяется множественными взаимодействиями (положительными, отрицательными и нейтральными), реакцией на изменение скорости роста и выживаемостью [59]. Кроме того, благодаря негативным взаимодействиям происходит регуляция плотности микробных популяций [22]. В данный момент не известно, будут ли изменения, происходящие в нефтезагрязненных почвах в процессе их восстановления, направлены на формирование тех

микробных сообществ, которые способствовали бы наиболее полному использованию соединений азота и максимальной скорости реакций азотного цикла.

Отклик почвенной микробиоты, участвующей в круговороте азота, на загрязнение нефтью во многом зависит от факторов среды [56, 60]. Нефть, одновременно как источник углерода и как токсичное соединение, может заметно влиять на микробиологические процессы трансформации азота. Это предопределяет необходимость изучения метаболизма азота при загрязнении почвы в зависимости от концентраций нефти. Важными задачами в этом случае будут изучение влияния нефти на общие показатели преобразования азота в почве, сравнение отклика процессов трансформации азота на загрязнение различными концентрациями нефти — низкими, средними и высокими, выявление механизмов круговорота азота, осуществляемых микроорганизмами различных функциональных групп, особенностей восстановления и сохранения биоразнообразия почвенной микробиоты азотного цикла в нефтезагрязненных экосистемах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществляемые почвенной микробиотой биологические процессы преобразования азота играют ключевую роль в продуктивности и устойчивости почвенных экосистем. Изучение процессов азотного режима почв необходимо для более полного понимания поведения азота в условиях нефтяного загрязнения и механизмов восстановления нефтезагрязненных почв. На сегодняшний момент проблему изучают, но имеющиеся публикации по данной тематике представляют собой достаточно разрозненный материал, и проведенных исследований пока недостаточно, чтобы составить о проблеме комплексное представление.

Тем не менее, имеющиеся публикации позволяют сделать предварительные выводы о том, что попадающие в почву нефтепродукты изменяют содержание общего азота, влияют на баланс аммонийной и нитратных форм азота, а также на соотношение C : N, важное в диагностическом плане. Изучение влияния различных рекультивационных мероприятий на азотный режим нефтезагрязненных почв показало, что внесение различных удобрений обычно способствует эффекту восстановления, накоплению нитратного азота в почве и в целом улучшает почвенное плодородие.

Перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение роли микроорганизмов в процессах превращения азота в нефтезагрязненных почвах, что может способствовать разработке новых методов рекультивации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузина В.Д., Антонова И.Н., Наполова Г.В., Наполов В.В. Динамика легкогидролизуемого азота под ячменем // Использование генетических ресурсов сельскохозяйственных растений в современном земледелии: сб. научн.-практ. конф. молод. ученых. Орел: Орел ГАУ, 2012. С. 265–266.
2. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроэкосистеме на черноземных почвах. М.: РАН, 2018. 180 с.
3. Чекин Г.В., Смольский Е.В. Агрохимические свойства почв опытного поля Брянского ГАУ // Вестн. Брянск. ГСХА. 2022. С. 31–37.
4. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems / Eds. P. Marschner, Z. Rengel. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 397 p.
5. Филиппова Л.С. Круговорот азота и его соединений в почве // Международ. научн.-исслед. журн. 2023. № 8(134). С. 5.
6. Рагимов И.И. Содержание и формы азота в почве // Школа науки. 2021. № 5(42). С. 58–59.
7. Lawlor D.W., Lemaire G., Gastal F. Nitrogen, plant growth and crop yield // Plant Nitrogen / Eds. Lea P.J., Morot-Gaudry J.F. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. P. 369–378.
8. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
9. Hofman G., Van Cleemput O. Soil and plant nitrogen. Paris, France, September 2004. International Fertilizer Industry Association, 48 p.
10. Лямкина Ю.Б., Хворова Л.А. Моделирование динамики азота в почве (теоретические аспекты) // Изв. АлтайГУ. 2011. № 1–2(69). С. 94–97.
11. Васильченко Н.И. Агрогенная трансформация азота в почвах северного Казахстана // Вестн. АлтайГАУ. 2014. № 6. С. 67–71.
12. Hachiya T., Sakakibara H. Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and signaling in plants // J. Exp. Bot. 2017. V. 68. Iss. 10. P. 2501–2512.
13. Таракановский А. Минеральный азот в почве. URL: <https://direct.farm/post/mineralnyy-azot-v-pochve-17471> (дата обращения: 27.04.2023).
14. Попова Е.Н., Семенов С.М. Влияние антропогенного азота на продуктивность сельскохозяйственных растений // Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2003. Т. 19. С. 180–199.
15. Heil J., Vereecken H., Brüggemann N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil // Europ. J. Soil Sci. 2016. 67. P. 23–39.
16. Задорожний А.Н., Семенов М.В., Ходжаева А.К., Семенов В.М. Почвенные процессы продукции,



- потребления и эмиссии парниковых газов // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 75–92.
17. *Paśmionka I.B., Bulski K., Boligłowa E.* The participation of microbiota in the transformation of nitrogen compounds in the soil – a review // *Agronomy*. 2021. № 11(5). P. 977.
  18. *Robertson G.P., Groffman P.M.* Chapter 14 – Nitrogen transformations // *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 2024. P. 407–438.
  19. *Hayatsu M., Tago K., Saito M.* Various players in the nitrogen cycle: diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2008. V. 54. Iss. 1. P. 33–45.
  20. *Ollivier J., Töwe S., Bannert A., Hai B., Kastl E.-M., Meyer A., Su M.X., Kleineidam K., Schloter M.* Nitrogen turnover in soil and global change // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2011. V. 78. Iss. 1. P. 3–16.
  21. *Ribeiro H., Mucha A.P., Azevedo I., Salgado P., Teixeira C., Almeida C.M.R., Joye S.B., Magalhães C.* Differential effects of crude oil on denitrification and anammox, and the impact on N<sub>2</sub>O production // *Environ. Pollut.* 2016. 216. P. 391–399.
  22. *Zhao M.Y., Wang S., Li F.M., Guo S.H., Gao P.* Soil oil pollution and its microbial community characteristics in Liaohe oilfield // *J. Appl. Ecol.* 2020. № 31(12). P. 4215–4224.
  23. *Raimi M.O., Ilesanmi A., Ogah A., Omini D.E.* Exploring how human activities disturb the balance of biogeochemical cycles: evidence from the carbon, nitrogen and hydrologic cycles // *Res. World Agric. Econom.* 2021. № 2(3). P. 23–44.
  24. *Федорова Т.Н., Синиговец М.Е., Саранин Е.К., Кузьмич М.А.* Экологические проблемы при углеводородном загрязнении, самоочищение и реабилитация почв // *Экология*. 2011. № 2. 17 с.
  25. *Liu H., Wu M., Gao H., Gao J., Wang S.* Application of <sup>15</sup>N tracing and bioinformatics for estimating microbial-mediated nitrogen cycle processes in oil-contaminated soils // *Environ. Res.* 2023. V. 217. P. 114799. DOI:10.21203/rs.3.rs-2231711/v1
  27. *Uquetan U.I., Osang J.E., Egor A.O., Essoka P.A., Alozie S.I., Bawan A.M.* A case study of the effects of oil pollution on soil properties and growth of tree crops in Cross River State, Nigeria // *Inter. Res. J. Pure Appl. Physics*. 2017. V. 5. 2. P. 19–28.
  28. *Obasi N.A., Eze E., Anyanwu D.I., Okorie U.C.* Effects of organic manures on the physicochemical properties of crude oil polluted soils // *Afric. J. Biochem. Res.* 2013. V. 7(6). P. 67–75.
  29. *de Jong E.* The effect of a crude oil spill on cereals // *Environ. Pollut. Ser. A. Ecol. Biol.* 1980. V. 22. Iss. 3. P. 187–196.
  30. *Wyszkowski M., Wyszkowska J., Borowik A., Kordala N.* Contamination of soil with diesel oil, application of sewage sludge and content of macroelements in oats // *Water Air Soil Pollut.* 2020. V. 231. P. 546.
  31. *Akpan G.U., Udoh B.T.* Evaluation of some properties of soils affected by diesel oil pollution in Uyo, Niger delta area, Nigeria // *J. Biol. Agric. Healthcare*. 2013. V. 3. № 8. P. 33–42.
  32. *Barua D., Buragohain J., Sarma S.K.* Certain physicochemical changes in the soil brought about by contamination of crude oil in two oil fields of Assam, NE India // *Europ. J. Exp. Biol.* 2011. № 1(3). P. 154–161.
  33. *Осипова Р.А., Равзутдинов А.Р., Гилязов М.Ю., Кулжамбердиева С.Ж.* Трансформация агрохимических свойств серой лесной почвы под действием нефти в зависимости от уровня и давности загрязнения // *Плодородие*. 2020. № 3(114). С. 55–60.
  34. *John R.C., Ntino E.S., Itah A.Y.* Impact of crude oil on soil nitrogen dynamics and uptake by legumes grown in wetland ultisol of the Niger delta, Nigeria // *J. Environ. Protect.* 2016. № 07(04). P. 507–515.
  35. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль удобрений в азотном питании растений при загрязнении почвы нефтью // *Агрохимия*. 2020. № 4. С. 76–84.
  36. *Булуктаев А.А., Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д.* Изменение эколого-биологических свойств светло-каштановых почв Калмыкии при нефтяном загрязнении // *Изв. Саратов. ун-та. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2013. Т. 13. Вып. 1. С. 102–107.
  37. *Kucharski J., Tomkiel M., Boros E., Wyszkowska J.* The effect of soil contamination with diesel oil and petrol on the nitrification process // *J. Elementol.* 2010. № 15(1). P. 111–118.
  38. *Швец А.А.* Фиторемедиация загрязненных нефтью почв в условиях Северо-Западного Кавказа: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2009. 20 с.
  39. *Amadi A., Abbey S.D., Nma A.* Chronic effects of oil spil on soil properties and microflora of rainforest ecosystem in Nigeria // *Water Air Soil Pollut.* 1996. V. 86. P. 1–11.
  40. *Niewolak S., Koziello M.* Intensity of some nitrogen transformations in soils experimentally contaminated with crude oil // *Pol. J. Environ. Stud.* 1998. № 7(3). P. 161–168.
  41. *Wyszkowski M., Ziolkowska A.* Relationship between petrol and diesel oil contamination versus mineral nitrogen content in soil following application of compost, bentonite and calcium oxide // *Ecol. Chem. Engin.* 2009. V. 16. № 8.
  42. *Ерофеевская Л.А., Глянцева Ю.С., Чалая О.Н.* Использование дернообразующих растений в биоремедиации нефтезагрязненных мерзлотных

- почв // Усп. совр. естествознания. 2012. № 11. Ч. 1. С. 128–129.
43. Смирнова Т.С., Панина Ю.Ю. Мониторинг углеводородного загрязнения почвы посредством анализа ее ферментативной активности // Защита окруж. среды в нефтегаз. комплексе. 2015. № 12. С. 33–38.
  44. Schutte C.A., Marton J.M., Bernhard A.E. No evidence for long-term impacts of oil spill contamination on salt marsh soil nitrogen cycling processes // Estuaries and Coasts. 2020. V. 43. P. 865–879.
  45. Liu H., Wu M., Zhang M., Gao H., Yan Z., Yang Z. New insight into the effect of nitrogen on hydrocarbon degradation in petroleum-contaminated soil revealed through <sup>15</sup>N tracing and flow cytometry // Sci. Total. Environ. 2023. V. 891. P. 164409.
  46. Фатеев А.И., Мирошниченко Н.Н., Панасенко Е.В., Христенко С.И. Изменение агрохимических и микробиологических свойств нефтезагрязненного чернозема в рекультивационный период // Агрохимия. 2004. № 6. С. 53–60.
  47. Kucharski J., Jastrzebska E., Wyszowska J. Effects of some oil products on the course of ammonification and nitrification // Acta Agr. Silv. Ser. Agr. 2004. V. 42. P. 249–255.
  48. Баландина А.В., Жилкин С.М., Кузнецов Д.Б., Дубровина С.С. Восстановительная способность нефтезагрязненных почв при использовании различных препаратов // Совр. пробл. науки и образ-я. 2015. № 5. С. 42–48.
  49. Essien O.E., John I.A.J. Impact of crude-oil spillage pollution and chemical remediation on agricultural soil properties and crop growth // Appl. Sci. Environ. Manage. 2010. V. 14(4). P. 147–154.
  50. Li H., Zhang Y., Kravchenko I., Xu H., Zhang C. Dynamic changes in microbial activity and community structure during biodegradation of petroleum compounds: a laboratory experiment // J. Environ. Sci. 2007. 19. P. 1003–1013.
  51. Colla T.S., Andreazza R., Bücker F., de Souza M.M., Tramontini L., Prado G.R., Frazzon A.P.G., de Oliveira Camargo F.A., Bento F.M. Bioremediation assessment of diesel-biodiesel-contaminated soil using an alternative bioaugmentation strategy // Environ. Sci. Pollut. Res. 2014. V. 21(4). P. 2592–2602.
  52. Bouman A.F., Van Drecht G., Van der Hoek K.W. Global and regional surface nitrogen balances in intensive agricultural production systems for the period 1970–2030 // Pedosphere. 2005. V. 15. P. 137–155.
  53. Rochette P., Angers D.A., Chantigny M.H., Gasser M.O., MacDonald J.D., et al. NH<sub>3</sub> volatilization, soil NH<sub>4</sub> concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates // Canad. J. Soil Sci. 2013. V. 93. P. 261–268.
  54. Jahangir M.M.R., Fenton O., Carolan R., Harrington R., Johnston P., Zaman M., Richards K.G., Müller C. Application of <sup>15</sup>N tracing for estimating nitrogen cycle processes in soils of a constructed wetland // Water Res. 2020. V. 183. P. 116062.
  55. Li Y., Wang C., Wu J., Zhang Y., Li Q., Liu S., Gao Y. The Effects of localized plant–soil–microbe interactions on soil nitrogen cycle in maize rhizosphere soil under long-term fertilizers // Agronomy. 2023. V. 13(8). P. 2114.
  56. Gao Y., Yuan L., Du J., Wang H., Yang X., Duan L., Zheng L., Bahar M.M., Zhao Q., Zhang W., Liu Y., Fu Z., Wang W., Naidu R. Bacterial community profile of the crude oil-contaminated saline soil in the Yellow River Delta Natural Reserve, China // Chemosphere. 2022. V. 289. P. 133207.
  57. Siles J.A., Margesin R. Insights into microbial communities mediating the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2018. V. 102(10). P. 4409–4421.
  58. Sun Y., Ding A., Zhao X., Chang W., Ren L., Zhao Y., Song Z., Hao D., Liu Y., Jin N., Zhang D. Response of soil microbial communities to petroleum hydrocarbons at a multi-contaminated industrial site in Lanzhou, China // Chemosphere. 2022. V. 306. P. 135559.
  59. Zhang X., Kong D., Liu X., Xie H., Lou X., Zeng C. Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. // Chemosphere. 2021. V. 273. P. 129666.
  60. Polyak Y.M., Bakina L.G., Mayachkina N.V., Chugunova M.V., Bityutskii N.P., Yakkonen K.L., Shavarda A.L. Long-term effects of oil contamination on soil quality and metabolic function // Environ. Geochem. Health. 2023. DOI: 10.1007/s10653-023-01779-2

## Diagnostic Value of Some Indicators of Soil Nitrogen Regime for Assessing the Ecological State of Oil-Pollutant Soils

A. O. Gerasimov<sup>a, #</sup>, Yu. M. Polyak<sup>a</sup>, L. G. Bakina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Scientific Research Center for Ecological Safety of the RASg – St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Korpusnaya ul. 18, Saint-Petersburg 197110, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: recchi@rambler.ru*

The results of studies of the nitrogen regime of oil-contaminated soils in recent years are considered. Insufficient knowledge of this issue for man-made soils is emphasized, despite the fact that soil pollution with oil and petroleum products can cause significant changes in the nitrogen cycle and lead to irreversible violations of the ecological functions of soils. The generalization of the research results made it possible to identify the most informative indicators for assessing the processes of the nitrogen regime and the ecological state of oil-contaminated soils. Under conditions of oil pollution, the ratio of carbon and nitrogen contents in the soil increases, the nitrifying activity of soils decreases, and the proportion of ammonium forms of nitrogen increases relatively. It is shown that violations of the processes of the nitrogen cycle, the content and the ratio of the contents of different forms of nitrogen characterizing certain stages of its transformation in the soil can be restored to varying degrees during reclamation, depending on the properties of the soil. At the moment, the most promising areas of research into the processes of the nitrogen cycle in oil-contaminated soils are: the study of the vital activity of soil microorganisms carrying out various stages of the nitrogen cycle processes, the relationship of the structure and diversity of the microbiota with the rate of biodegradation of oil and transformation of nitrogen compounds in contaminated soils. The study of the nitrogen cycle processes is important for assessing the effects of soil pollution with petroleum products and choosing the most effective strategies for their restoration.

**Keywords:** nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, reclamation, microorganisms, oil pollution, soils.

УДК 632.122.1:631.445.41:631.879.2(470.57)

## СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЧЕРНОЗЕМЕ ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ ПРИ ВНЕСЕНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ УДОБРЕНИЯ<sup>§</sup>

© 2025 г. О. А. Мелентьева<sup>1</sup>, И. М. Габбасова<sup>1,\*</sup>, Т. Т. Гарипов<sup>1</sup>,  
И. К. Хабилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН  
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Башкортостан, Россия

<sup>2</sup>Опытная станция “Уфимская”  
450535 с. Черноречовский, ул. Тополиная, 1,  
Уфимский р-н, Башкортостан, Россия

\*E-mail: gimib@mail.ru

Исследование проводили в южной лесостепи Республики Башкортостан на агрочерноземе тяжелосуглинистом, с высоким содержанием гумуса, близкой к нейтральной реакции среды, высокой емкостью катионного обмена с преобладанием кальция. Осадки сточных вод (ОСВ) с городских очистных сооружений г. Уфы были внесены в дозе 30 т/га и заделаны в верхний слой 0–20 см почвы. Образцы отбирали с глубин 0–5, 5–20 и 20–40 см через полгода после внесения. Внесение ОСВ привело к увеличению содержания гумуса, минерального азота (до 2.5 раза) подвижного фосфора (до 30%) и обменного калия (до 12%), а также нейтрализации почвенного раствора. При этом содержание подвижных форм Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Cd не превышало 16.6% от ПДК, содержание валовых форм As, Zn, Pb, Hg, Cd, Cr, Co, Cu и Mn не превышало 51% от ПДК, суммарный химический показатель содержания ТМ был “допустимым” (2.6–10.2). Только концентрация Ni, которая в фоновой почве составляла 0.75 ПДК, увеличилась до 0.8 ПДК. Следовательно, содержание никеля являлось лимитирующим при внесении ОСВ, и он был ключевым элементом для мониторинга содержания ТМ в почвах.

**Ключевые слова:** агрочернозем, осадки сточных вод (ОСВ), тяжелые металлы, суммарный химический показатель.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010095, **EDN:** VCGUAN

### ВВЕДЕНИЕ

Утилизация отходов является одной из основных экологических проблем современной цивилизации. Особое место среди них занимают вещества, содержащие элементы питания растений, которые могут быть возвращены в биологический круговорот и использованы в сельском хозяйстве. К ним относятся осадки сточных вод (ОСВ), количество которых постоянно возрастает, составляя в РФ миллионы тонн в пересчете на сухое вещество и сотни миллионов — с учетом влажности. По содержанию углерода, азота, фосфора, калия и микроэлементов ОСВ не уступают традиционным органическим удобрениям. Многие авторы указывают на существенное повышение

плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур, особенно при внесении ОСВ в почвы с невысоким естественным плодородием [1–5]. В то же время эффективность ОСВ отмечена и на почвах черноземного ряда [6–10]. Дозы ОСВ сильно варьируют от десятков [11–13] и сотен т/га [14], доходя до тысяч т/га в течение многолетнего опыта [15, 16] в зависимости прежде всего от почвенных условий и выращиваемых культур. Вместе с тем применение ОСВ в качестве удобрения даже после их обеззараживания от патогенной микрофлоры осложняется наличием тяжелых металлов (ТМ). При этом состав ОСВ зависит от технологии обработки, сезона, климатической зоны и конкретного города. Максимально допустимые дозы ОСВ не должны приводить к загрязнению почвы ТМ. Поэтому утилизация ОСВ путем использования в качестве органического удобрения должна соответствовать самым строгим гигиеническим нормативам и регулярно контролироваться.

<sup>§</sup>Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № 123020800003-9. Часть данных была получена с использованием оборудования ЦКП “Агидель”.

Цель работы — изучение влияния осадков сточных вод на содержание тяжелых металлов при их внесении в агрочернозем Южного Предуралья.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на агрочерноземе южной лесостепи Республики Башкортостан. Почва опыта характеризовалась высоким потенциальным плодородием: тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, высоким содержанием гумуса, близкой к нейтральной реакцией среды, высокой емкостью катионного обмена с преобладанием кальция. *ОСВ* были взяты с городских очистных сооружений г. Уфы после окончания технологического цикла их обработки. *ОСВ* (влажность 21%) были внесены в дозе 30 т/га и заделаны в верхний слой 0–20 см почвы. Образцы были отобраны на 4-х пробных площадках и фоновой почве с глубин 0–5, 5–20 и 20–40 см через полгода после внесения.

Аналитические исследования проводили в соответствии с общепринятыми методами [17]: содержание гумуса определяли по Тюрину, нитратного азота — колориметрическим методом с дисульфифеноловой кислотой, аммонийного азота — колориметрическим методом с реактивом Несслера, подвижного фосфора и обменного калия — по Чирикову, обменных катионов — трилонометрическим методом,  $pH_{KCl}$  — потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность — по методу Каппена в модификации ЦИНАО [18]. Содержание ТМ определяли по [19, 20].

Суммарный химический показатель ( $Z_c$ ) определяли по формуле Саета [21]:  $Z_c = (\sum K_c) - (n - 1)$ , где  $K_c$  — коэффициент концентрации  $i$ -го химического элемента,  $n$  — число, равное количеству элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Коэффициент концентрации ( $K_c$ ) рассчитывали по формуле:  $K_c = C_i / C_{фон}$ ,

где  $C_i$  — фактическое содержание элемента,  $C_{фон}$  — геохимический фон.

Определение максимально допустимой дозы внесения *ОСВ* проводили по формуле [22] с учетом глубины пахотного слоя:

$$D_{ОСВ} = (0.8ПДК - C_{\phi}) \times 2000 / C_{ОСВ},$$

где  $D_{ОСВ}$  — теоретически допустимая доза осадка, т сухой массы/га,  $C_{\phi}$  — концентрация ТМ в фоновой почве, мг/кг, 2000 — масса слоя 0–20 см почвы, т сухой массы/га,  $C_{ОСВ}$  — концентрация ТМ в *ОСВ*, мг/кг.

Данные обрабатывали статистическими методами в программе MS Excel.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение *ОСВ* в агрочернозем оказало заметное влияние на его агрохимические свойства: увеличилось содержание гумуса (особенно в слое 5–20 см) и питательных элементов (табл. 1).

Содержание минерального азота возросло в пахотном горизонте в 2.2–2.5 раза, преимущественно за счет его аммонийной формы, содержание которой увеличилось в слое 0–5 см в 5 раз, в слое 5–20 см — в 3 раза. Обеспеченность почвы подвижным фосфором возросла на 18–30%, перейдя из категории “высокая” в “очень высокую” в слое 0–5 см. Количество обменного калия изменилось в меньшей степени — на 9–12%. Внесение *ОСВ* способствовало также снижению гидролитической кислотности и нейтрализации почвенного раствора, при этом содержание поглощенных оснований существенно не изменилось. Во многом сходные тенденции к изменениям агрохимических свойств черноземов при внесении *ОСВ* выявлены и другими авторами [6, 8, 23]. Но при улучшении агрохимических свойств почвы может возникнуть опасность загрязнения токсичными элементами, особенно в регионах с повышенным фоновым содержанием ТМ и вблизи крупных промышленных центров.

Таблица 1. Агрохимические свойства почвы

Вариант	Контроль		Поле	
Глубина, см	0–5 см	5–20 см	0–5 см	5–20 см
Гумус, %	10.6 ± 0.9	7.9 ± 0.6	11.8 ± 0.9	11.9 ± 0.7
pH <sub>KCl</sub>	5.6 ± 0.1	5.5 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
$H_p$ , смоль/кг	3.79 ± 0.63	5.48 ± 0.91	1.98 ± 0.32	2.74 ± 0.45
$Ca^{2+}$ , смоль/кг	25.6 ± 1.2	26.6 ± 1.1	24.7 ± 1.3	26.0 ± 1.0
$Mg^{2+}$ , смоль/кг	3.4 ± 0.2	3.5 ± 0.1	3.3 ± 0.2	3.4 ± 0.3
N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	12.9 ± 0.8	6.2 ± 0.6	65.8 ± 1.9	20.0 ± 1.8
N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	28.9 ± 1.7	19.3 ± 1.1	37.6 ± 18.	36.6 ± 2.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	169 ± 8	154 ± 7	220 ± 7	181 ± 8
K <sub>2</sub> O, мг/кг	128 ± 1	125 ± 1	143 ± 1	137 ± 1

Высокое содержание гумуса и нейтральная реакция среды обусловили низкое содержание подвижных форм ТМ (табл. 2).

При внесении *ОСВ* оно варьировало в диапазоне от 0.4 до 16.6% от ПДК и возрастало в ряду:  $Mn - Cu - Zn - Co - Pb$ . По сравнению с фоновой почвой только концентрации  $Co$  и  $Mn$  повысились в 1.5–2.0 раза, а содержание  $Zn$  в слое 0–5 см – в 8 раз. Концентрация этих элементов в *ОСВ* была заметно больше, чем в почве, но существенно меньше ПДК. Суммарный химический показатель составил в слоях 0–5, 5–20 и 20–40 см соответственно 10.2, 4.6, 3.6, что определяло уровень загрязнения как “допустимый”.

Валовое содержание валовых форм ТМ после внесения *ОСВ* не превышало ПДК (табл. 3).

Их суммарный химический показатель также был “допустимым” и в слоях 0–5, 5–20 и 20–40 см равнялся 4.8, 2.6, 4.7 соответственно. Вместе с тем необходимо отметить, что согласно ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, запрещается использование *ОСВ* в качестве удобрения при содержании в почве отдельных ТМ в концентрациях, превышающих 0.8 ПДК, на основании чего рассчитывают максимально допустимую дозу внесения *ОСВ*. В данной работе концентрации ТМ в фоновой почве изменялись в диапазоне 0.09–0.51 ПДК за исключением никеля (0.75 ПДК). Следует отметить, что почвы Южного Предуралья отличаются его повышенным содержанием [24, 25]. Никель относится к умеренно подвижным элементам, для которых характерно как накопление, так и частичный вынос [26], а коэффициент его миграции

из внесенного в почву *ОСВ* оценивали в пределах 10–11% [27]. Максимально допустимая доза внесения *ОСВ*, рассчитанная по величине содержания этого элемента, составила 98 т/га. Однако после внесения 30 т *ОСВ*/га валовое содержание никеля (с учетом погрешности определения) вплотную приблизилось к величине 0.8 ПДК, что привело к опасности загрязнения почвы и нецелесообразности дальнейшего внесения *ОСВ* в почву этого поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, утилизация *ОСВ* путем использования его в качестве удобрения в дозе 30 т/га привело к увеличению содержания гумуса, минерального азота (до 2.5 раза), подвижного фосфора (до 30%) и обменного калия (до 12%), а также нейтрализации почвенного раствора. При этом содержание подвижных форм  $Mn$ ,  $Cu$ ,  $Zn$ ,  $Co$ ,  $Pb$  и  $Cd$  не превышало 16.6% от ПДК, содержание валовых форм  $As$ ,  $Zn$ ,  $Pb$ ,  $Hg$ ,  $Cd$ ,  $Cr$ ,  $Co$ ,  $Cu$  и  $Mn$  также не превышало 51% от ПДК. Суммарный химический показатель содержания ТМ был “допустимым”. Только концентрация  $Ni$ , которая в фоновой почве составляла 0.75 ПДК, увеличилась до 0.8 ПДК. Следовательно, содержание никеля было лимитирующим при внесении *ОСВ* и ключевым элементом для мониторинга содержания ТМ в почвах.

**Таблица 2.** Содержание подвижных форм ТМ при внесении *ОСВ* в качестве удобрения, мг/кг

Элемент	Глубина, см	Поле	Контроль	<i>ОСВ</i>	ПДК
Цинк	0–5	$1.59 \pm 0.41$	$0.20 \pm 0.02$	$4.10 \pm 0.93$	23
	5–20	$0.82 \pm 0.14$	$0.20 \pm 0.04$		
	20–40	$0.54 \pm 0.10$	$0.23 \pm 0.03$		
Свинец	0–5	$1.0 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.2$	6
	5–20	$0.9 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.1$		
	20–40	$1.0 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.1$		
Кадмий	0–5	$0.12 \pm 0.04$	$<0.05$	$0.44 \pm 0.09$	—
	5–20	$<0.05$	$<0.05$		
	20–40	$<0.05$	$<0.05$		
Кобальт	0–5	$0.34 \pm 0.07$	$0.28 \pm 0.11$	$0.63 \pm 0.25$	5
	5–20	$0.29 \pm 0.06$	$0.21 \pm 0.08$		
	20–40	$0.60 \pm 0.04$	$0.33 \pm 0.10$		
Медь	0–5	$0.18 \pm 0.03$	$0.16 \pm 0.02$	$0.50 \pm 0.08$	3
	5–20	$0.16 \pm 0.02$	$0.16 \pm 0.01$		
	20–40	$0.10 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.03$		
Марганец	0–5	$46.0 \pm 3.4$	$32.4 \pm 2.3$	$74.2 \pm 5.1$	140
	5–20	$32.0 \pm 2.7$	$29.1 \pm 1.9$		
	20–40	$48.3 \pm 3.1$	$33.8 \pm 3.3$		

**Таблица 3.** Содержание валовой формы ТМ в черноземе при внесении *ОСВ* в качестве удобрения, мг/кг

Элемент	Глубина, см	Поле	Контроль	<i>ОСВ</i>	ПДК
Мышьяк	0–5	$4.8 \pm 0.4$	$4.4 \pm 0.3$	$4.8 \pm 0.3$	10
	5–20	$3.9 \pm 0.7$	$3.3 \pm 0.4$		
	20–40	$3.8 \pm 0.2$	$3.6 \pm 0.2$		
Цинк	0–5	$95.0 \pm 4.8$	$77.7 \pm 9.6$	$92.8 \pm 4.7$	220
	5–20	$79.8 \pm 2.6$	$72.2 \pm 6.2$		
	20–40	$72.8 \pm 1.8$	$67.1 \pm 3.2$		
Свинец	0–5	$9.9 \pm 0.3$	$10.7 \pm 1.2$	$12.3 \pm 2.2$	130
	5–20	$10.4 \pm 0.6$	$11.8 \pm 0.8$		
	20–40	$10.7 \pm 0.5$	$11.2 \pm 1.1$		
Кадмий	0–5	$0.40 \pm 0.07$	$0.14 \pm 0.05$	$1.02 \pm 0.41$	2
	5–20	$0.18 \pm 0.04$	$0.17 \pm 0.06$		
	20–40	$0.07 \pm 0.01$	$0.05 \pm 0.02$		
Ртуть	0–5	$0.06 \pm 0.01$	$0.03 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.07$	2.1
	5–20	$0.05 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.01$		
	20–40	$0.05 \pm 0.01$	$0.02 \pm 0.01$		
Хром	0–5	$81.5 \pm 8.4$	$61.0 \pm 5.6$	$77.5 \pm 9.6$	—
	5–20	$74.3 \pm 5.7$	$58.8 \pm 4.4$		
	20–40	$76.8 \pm 4.3$	$61.4 \pm 4.7$		
Кобальт	0–5	$13.29 \pm 0.25$	$12.14 \pm 0.14$	$13.54 \pm 0.37$	—
	5–20	$13.28 \pm 0.42$	$12.41 \pm 0.41$		
	20–40	$13.75 \pm 0.25$	$11.93 \pm 0.48$		
Никель	0–5	$62.8 \pm 2.7$	$60.2 \pm 1.9$	$62.3 \pm 3.5$	80
	5–20	$66.2 \pm 1.7$	$61.2 \pm 0.1$		
	20–40	$70.0 \pm 1.9$	$62.8 \pm 2.9$		
Медь	0–5	$31.66 \pm 1.04$	$27.65 \pm 1.65$	$52.26 \pm 2.15$	132
	5–20	$28.60 \pm 0.81$	$26.55 \pm 1.55$		
	20–40	$26.75 \pm 0.85$	$24.95 \pm 1.12$		
Марганец	0–5	$705.3 \pm 21.1$	$663.2 \pm 27.1$	$658.2 \pm 30.7$	1500
	5–20	$683.0 \pm 29.0$	$667.4 \pm 28.3$		
	20–40	$675.3 \pm 35.9$	$653.8 \pm 24.2$		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.И., Иванов И.А., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А., Моисеев Д.А.* Азотный режим легких дерново-подзолистых почв и пути его улучшения в современных условиях // *Агрохимия*. № 9. 2008. С. 5–15.
2. *Кириллов Н.А., Фадеева Н.А.* Перспективы использования осадков сточных вод для повышения продуктивности малогумусных почв // *Экол. вестн. Север. Кавказа*. 2015. Т. 1. № 1. С. 79–83.
3. *Варламова Л.Д., Короленко И.Д.* Нетрадиционные удобрительные материалы в растениеводческом комплексе России и Нижегородской области // *Агрохим. вестн.* 2017. № 2. С. 15–20.
4. *Жигарева Ю.В.* Агроэкологическая оценка эффективности осадков сточных вод при возделывании картофеля // *Вестн. ТвГУ. Сер. биол. и экол.* 2018. № 1. С. 194–202.
5. *Васбиева М.Т., Косолапова А.И.* Тяжелые металлы в системе почва–растения при утилизации осадков сточных вод в качестве удобрения // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 83–89. DOI: 10.7868/S0002188118030110
6. *Юмашев Н.П.* Использование осадков сточных вод в качестве удобрений на выщелоченных черноземах Тамбовской области // *Агрохимия*. 2008. № 2. С. 57–65.
7. *Арефьев А.Н.* Влияние осадков сточных вод и их сочетаний с цеолитом на плодородие лугово-черноземной почвы и урожайность сельскохозяйственных культур // *Агропром. технол. Центральной России*. 2017. Вып. 2. № 4. С. 37–44.

8. Никитин С.Н., Завалин А.А. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность зернопарового севооборота, потоки элементов питания и свойства чернозема выщелоченного в лесостепи Среднего Поволжья // *Агрохимия*. 2017. № 6. С. 12–29.
9. Яппаров И.А., Газизов Р.Р., Дегтярева И.А., Суханова И.М., Ильясов М.М., Яппарова Л.М., Садеретдинова И.С., Ежкова Д.В. Влияние последствий осадков сточных вод на агрохимические показатели чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур // *Вестн. техн. ун-та*. 2017. Т. 20. № 10. С. 128–131.
10. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Мелентьева О.А. Содержание токсичных элементов при внесении фосфогипса и помета в агрочернозем слабоэродированный // *Агрохимия*. 2023. № 9. С. 50–55.  
DOI: 10.31857/S0002188123070050
11. Пахненко Е.П., Ермаков А.В., Убугунов Л.Л. Влияние осадков сточных вод города Улан-Удэ на свойства почвы, продуктивность и качество картофеля // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение*. 2009. № 4. С. 33–39.
12. Володина Т.И., Макарова А.И. Влияние органических систем удобрения на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность севооборота в условиях Северо-Запада России // *Агрохимия*. 2010. № 8. С. 24–30.
13. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Действие биокомпостов на основе побочной продукции животноводства и городских отходов на агроэкологические свойства дерново-подзолистой почвы // *Владимир. земледелец*. 2023. № 2(104). С. 30–34.  
DOI: 10.24412/2225-2584-2023-2104-30-34
14. Щипцова Н.В., Ларионов Г.А., Мардарьева Н.В. Использование осадков городских сточных вод в качестве удобрения // *Вестн. Чуваш. ГАУ*. 2022. № 1. С. 32–37.  
DOI: 10.48612/vch/5653-nu3k-tu1a
15. Касатиков В.А., Чемерис М.С., Яшин И.М., Пескарев А.А. Последствие внесения ОСВ и известкования на содержание подвижных форм тяжелых металлов в пахотном слое почвы и их транслокацию в растительную продукцию // *Плодородие*. 2012. № 5. С. 45–47.
16. Фрид А.С., Касатиков В.А., Борисочкина Т.И., Колчанова К.А., Никитина Н.С. Влияние длительного применения осадков сточных вод и извести на валовое содержание и концентрацию подвижных форм тяжелых металлов в супесчаной дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2023. № 1. С. 83–96.  
DOI: 10.31857/S0002188123010040
17. Агрохимические методы исследования почв. Коллект. моногр. / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
18. ГОСТ 26212–2021 Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 10 с.
19. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 62 с.
20. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
21. Саев Ю.Е., Смирнова Р.С. Геохимические принципы выявления зон воздействия промышленных выбросов в городских агломерациях // *Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды*. М.: Мысль, 1983. 98 с.
22. ГОСТ Р 17.4.3.07–2001 Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрения. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.
23. Куликова А.Х., Никитин С.Н., Сайдяшева Г.В. Влияние удобрений на содержание и баланс гумуса в черноземе выщелоченном при возделывании культур в зернопаровом севообороте // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 7–15.  
DOI: 10.7868/S000218811712002X
24. Асылбаев И.Г. Тяжелые металлы второго класса опасности в почвах и породах Южного Урала: запасы и оценка загрязнения // *Плодородие*. 2015. № 5. С. 58–66.
25. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Дорогая Е.С., Комиссаров М.А., Назырова Ф.И., Нигматзянов А.С. Влияние осадков сточных вод в сочетании с различными добавками на азотное состояние чернозема выщелоченного // *Агрохимия*. 2023. № 11. С. 112–116.  
DOI: 10.31857/S0002188123110054
26. Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во МГУ, 1997. 104 с.
27. Белопухов С.Л., Сюняев Н.К., Тютюнькова М.В., Сюняева О.И. Массоперенос никеля в агроэкосистеме с дерново-подзолистой супесчаной почвой при длительном применении осадков сточных вод // *Агрохимия*. 2017. № 5. С. 86–90.



## Content of Heavy Metals in Agrochernozen of the Southern Cis-Urals after Introduction of Sewage Sludge as a Fertilizer

O. A. Melentyeva<sup>a</sup>, I. M. Gabbasova<sup>a, #</sup>, T. T. Garipov<sup>a</sup>, I. K. Khabirov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Ufa Institute of Biology, UFIC RAS,  
prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Bashkortostan, Russia*

<sup>b</sup>*Ufa experimental station,  
ul. Topolinaya 1, Bashkortostan, Ufa district, s. Chernolesovsky 450535, Russia,  
<sup>#</sup>E-mail: gimib@mail.ru*

The study was conducted in the southern forest-steppe of the Republic of Bashkortostan on heavy loamy agrochernozen with a high content of humus, close to a neutral pH, high capacity of cation exchange with a predominance of calcium. Sewage sludge (SS) from Ufa municipal wastewater treatment plants was introduced at a dose of 30 t/ha in the top layer of 0–20 cm of soil. Samples were taken from depths of 0–5, 5–20 and 20–40 cm six months after application. The introduction of SS led to an increase in the content of humus, mineral nitrogen (up to 2.5 times), mobile phosphorus (up to 30%) and exchangeable potassium (up to 12%), as well as the neutralization of the soil solution. At the same time, the content of mobile forms of heavy metals (HM) Mn, Cu, Zn, Co, Pb and Cd did not exceed 16.6% of the model predictive control (MPC), the content of gross forms of As, Zn, Pb, Hg, Cd, Cr, Co, Cu and Mn did not exceed 51% of the MPC, the total chemical index of the HM content was “acceptable” (2.6–10.2). Only the concentration of Ni, which was 0.75 MPC in the background soil, increased to 0.8 MPC. Consequently, the nickel content was a limiting factor in the introduction of SS, and it was a key element for monitoring the content of HM in soils.

**Keywords:** agrochernozen, sewage sludge (SS), heavy metals (HM), total chemical index.

УДК 631.81:631.416.8:631.445.41

## ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТА НА ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СЛОЯХ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОГО

© 2025 г. С. В. Пугаев<sup>1,\*</sup>, Л. Н. Прокина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого  
430904 Саранск, р.п. Ялга, ул. Мичурина, 5, Россия

\*E-mail: niish-mordovia@mail.ru

Изучили степень подвижности (СП) Cd, Pb, Cu и Zn в пахотном (0–20 см) и подпахотном (21–40 см) слоях почвы при внесении фосфорно-калийных и азотных удобрений на фоне известкования и без него. Выявлено, что величины СП тяжелых металлов (ТМ) были в основном меньше при известковании. У Cu она варьировала менее значительно по сравнению с другими металлами. Удобрения на фоне известкования достоверно понижали СП Cd по сравнению с контролем, а без него – увеличивали ее в обоих слоях. Вектор изменений СП металла в слоях при известковании зависел от доз азота в комплексе НРК. Фосфорно-калийные удобрения снижали СП металлов, а известкование усиливало их действие. Величины СП снижались до минимума с применением РК- и НРК-удобрений с низкой дозой азота в условиях известкования и без него, а при максимальной дозе азота – увеличивались. Известкование усиливало различия в СП между слоями в вариантах без азота, при его внесении – значительно снижало их. Известкование не изменяло расположение СП металлов по их величине в условиях опыта:  $Cd > Pb > Zn > Cu$ .

**Ключевые слова:** почва, удобрения, тяжелые металлы, подвижность.

**DOI:** 10.31857/S0002188125010106, **EDN:** VBZGPW

### ВВЕДЕНИЕ

Длительное применение минеральных удобрений в современном сельском хозяйстве изменяет свойства почв, в том числе защитные, увеличивая риск загрязнения почвы, продукции и природных вод поллютантами [1–4].

Существенный вклад в увеличение уровня токсикантов в окружающей среде приносят тяжелые металлы (ТМ), которые из почвы не исчезают, а медленно мигрируют в сопредельные компоненты [4].

С удобрениями вносят различные металлы (мг/кг): Cu ( $P_{сд} = 21.0–28.0$ ,  $K_x = 0.44–18.0$ ,  $N_{aa} = 2.0–8.8$ ), Cd ( $P_{сд} = 0.18–1.3$ ,  $K_x = 0.04–1.5$ ,  $N_{aa} = 0.08–0.1$ ), Pb ( $P_{сд} = 1.21–15.0$ ,  $K_x = 0.31–4.9$ ,  $N_{aa} = 0.1–0.57$ ), в известняковой муке: Cu = 6.3–15.0, Cd = 0.18–2.2, Pb = 13.7–28.0 [5–7]. Также трансформируются фракции ТМ и изменяется степень их подвижности (СП) в удобренных почвах по сравнению с неудобренными [8–11]. Токсичность и подвижность ТМ в почве может усиливаться при полиэлементном загрязнении.

Однако пока недостаточно исследований по изучению изменения СП ТМ в почве при длительном

совместном применении различных средств химизации [12, 13]. В этой связи возрастает ценность исследований в длительных стационарных полевых опытах с удобрениями для разработки современных экологически безопасных и эффективных агротехнологий.

Цель работы – изучение степени подвижности Cd, Pb, Cu и Zn в слоях чернозема выщелоченного под влиянием длительного применения комплекса средств химизации.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в Мордовском НИИСХ – филиале ФАНЦ Северо-Востока на базе длительного стационарного полевого опыта, заложенного в 1972 г. Почва – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый по классификации Добровольского [14]. Агрохимическая характеристика (слой 0–20 см) перед закладкой опыта: содержание гумуса –  $8.7 \pm 0.5\%$ ,  $pH_{H_2O}$   $6.3 \pm 0.1$  ед.,  $pH_{KCl}$   $5.4 \pm 0.1$ ,  $H_T$  и  $S$  –  $6.2 \pm 0.3$  и  $32.6 \pm 0.8$  ммоль(экв)/100 г соответственно,  $V$  –  $84 \pm 2\%$ ,  $P_2O_5$  –  $65 \pm 15$  и  $K_2O$  –  $12 \pm 38$  мг/кг.

Посевная площадь делянки — 112.5 м<sup>2</sup> (7.5 × 15 м), учетная для зерновых — 75 м<sup>2</sup> (5 × 15 м), повторность трехкратная. Опыт заложен методом расщепленных делянок [15]. Блок делянок 1-го порядка: 1 — без известкования с 1972 г. (контроль), 2 — известкование по 0.5 гидролитической кислотности (г.к.). Делянки 2-го порядка: I — без удобрений с 1972 г. (контроль), II — фосфорно-калийные удобрения (P50K80), III — РК + N30, IV — РК + N90.

Известкование проводили перед закладкой опыта в 1972 г. и в 2000 г. Минеральные удобрения вносили в соответствии со схемой опыта поделочно, вручную: Р<sub>сд</sub> и К<sub>х</sub> — под основную обработку почвы, N<sub>аа</sub> — ежегодно весной.

Последовательность культур в зернотравянопропашном севообороте: яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) — яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) + многолетние травы — многолетние травы 1-го года пользования — многолетние травы 2-го года пользования — многолетние травы 3-го года пользования — озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) — яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) — соя культурная (*Glycine max* (L.) Merr.) — овес посевной (*Avena sativa* L.), многолетние травы — костреч безостый (*Bromus inermis* Leyss). Агротехника культур — рекомендованная для условий Мордовии, кроме изученных факторов [16].

Почвенные пробы отбирали после уборки овса (2012 г.) с глубины 0–20 (пахотный слой) и 21–40 см (подпахотный слой) методом конверта. Лабораторные исследования, наблюдения и агрохимические анализы проводили в соответствии с общепринятыми методиками. Содержание подвижных (ПФ) и кислоторастворимых форм (КРФ) ТМ анализировали в трехкратной повторности атомно-адсорбционным методом (спектрометр “Квант”, Россия)

по методике [17]. Результаты доложены в работе [18]. На их основании определяли СП металлов в почве по методике [19]. Обработку данных проводили статистическими методами по [15] и сводили в таблицы с указанием средней величины, стандартной ошибки среднего. Достоверность различий вариантов оценивали по *t*-критерию Стьюдента (*td*).

Агроклиматические условия проведения опытов были типичными для зоны неустойчивого увлажнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

СП ТМ была различной у разных металлов и изменялась как в зависимости от слоя почвы, так и от воздействия средств химизации.

СП Cd в пахотном слое контрольной почвы без известкования оказалась практически равновеликой с его подвижностью в варианте II (РК-удобрения), а в других вариантах отмечена тенденция к увеличению подвижности металла в пахотном слое при усилении минерального питания (варианты III, IV) (табл. 1) и увеличении содержания ПФ Cd [18].

СП Cd в подпахотном слое контроля была значимо меньше, чем в пахотном. При этом содержание фосфатов было в этих слоях было одинаковым (табл. 2), а содержание ПФ Cd — меньше в подпахотном [18]. Использование РК-удобрений (вариант II) вызвало в подпахотном слое достоверное снижение СП Cd, вероятнее всего, из-за образования фосфатов металла в опыте, подобное отмечали другие авторы [13].

СП Cd достоверно увеличивалась в подпахотном слое варианта III с минимальной дозой азота в составе NPK-удобрения и становилась равной в обоих слоях при практически одинаковом содержании

**Таблица 1.** Зависимость степени подвижности (СП) ТМ в почве при действии изученных факторов, %

Вариант	Слой почвы		Достоверность различий*	
	0–20 см	21–40 см	пахотный слой	подпахотный слой
СП Cd				
Без известкования				
I. Контроль	19.0 ± 0.8	17.2 ± 0.5	—	I–II, I–III, II–III, II–IV
II. P50K80	18.8 ± 0.8	15.1 ± 0.2		
III. N30P50K80	19.6 ± 0.7	19.9 ± 0.2		
IV. N90P50K80	20.4 ± 0.5	18.5 ± 0.5		
			пах/п-пах—I, II	
Известкование 0.5 г.к.				
I. Контроль	18.3 ± 0.8	19.3 ± 0.6	II–IV, III–IV	I–II, II–III, III–IV
II. P50K80	17.5 ± 0.1	16.8 ± 0.1	пах/п-пах–IV	
III. N30P50K80	18.2 ± 0.4	18.2 ± 0.4	<u>изв/неизв</u> –пах–IV,	
IV. N90P50K80	16.4 ± 0.2	18.1 ± 0.3	п-пах–III	

Таблица 1. Окончание

Вариант	Слой почвы		Достоверность различий*	
	0–20 см	21–40 см	пахотный слой	подпахотный слой
СП Pb				
Без известкования				
I. Контроль	15.1 ± 2.6	9.98 ± 1.02	I–II, II–III, III–IV	II–III
II. P50K80	10.2 ± 0.3	9.42 ± 0.12		
III. N30P50K80	6.94 ± 0.55	7.46 ± 0.32		
IV. N90P50K80	10.2 ± 0.8	11.9 ± 1.8		
Известкование 0.5 г.к.				
I. Контроль	8.11 ± 0.34	9.04 ± 0.57	I–IV, II–IV, III–IV	I–II, I–III, I–IV  пах/п-пах–IV, <u>изв/неизв</u> –пах–II, п-пах–II
II. P50K80	6.30 ± 0.63	6.74 ± 0.39		
III. N30P50K80	6.35 ± 0.53	6.70 ± 0.37		
IV. N90P50K80	11.9 ± 0.7	7.27 ± 0.11		
СП Cu				
Без известкования				
I. Контроль	3.09 ± 0.09	3.58 ± 0.04	–	I–II, I–III, III–IV
II. P50K80	3.07 ± 0.03	2.90 ± 0.03		
III. N30P50K80	3.36 ± 0.18	2.83 ± 0.03		
IV. N90P50K80	2.75 ± 0.04	3.37 ± 0.05		
Известкование 0.5 г.к.				
I. Контроль	3.13 ± 0.04	3.42 ± 0.09	I–III, I–IV, II–III, II–IV, III–IV	I–II, I–IV, III–IV  пах/п-пах– I, II, III <u>изв/неизв</u> –пах–III, п-пах–III, IV
II. P50K80	3.53 ± 0.05	2.93 ± 0.04		
III. N30P50K80	4.04 ± 0.02	3.18 ± 0.10		
IV. N90P50K80	2.90 ± 0.07	2.99 ± 0.01		
СП Zn				
Без известкования				
I. Контроль	5.88 ± 0.06	7.69 ± 0.11	I–II, I–III, III–IV	I–II, I–III, I–IV, II–III, II–IV, III–IV
II. P50K80	6.27 ± 0.10	6.87 ± 0.29		
III. N30P50K80	7.38 ± 0.17	6.63 ± 0.13		
IV. N90P50K80	5.76 ± 0.13	6.63 ± 0.14		
Известкование 0.5 г.к.				
I. Контроль	6.67 ± 0.02	6.61 ± 0.04	I–II, I–III, III–IV	I–II, I–III, I–IV II–III, II–IV, III–IV  пах/п-пах–II, III <u>изв/неизв</u> пах–I, IV п-пах– I, II, III
II. P50K80	6.43 ± 0.13	5.39 ± 0.10		
III. N30P50K80	7.73 ± 0.02	7.30 ± 0.11		
IV. N90P50K80	6.81 ± 0.06	7.06 ± 0.13		

\* Достоверность различий: I–II – между вариантами, пах–II – в пахотном слое варианта II, п-пах–III – в подпахотном слое варианта III, пах/п-пах–IV – между слоями варианта IV, изв/неизв–пах IV – в пахотном слое варианта IV между известкованным и неизвесткованным фонами.

фосфатов (табл. 2) и увеличении содержания ПФ металла в слоях [18].

При увеличении дозы азота в величинах СП металла проявлялись тенденции: в пахотном слое варианта IV – к увеличению, достигая максимума, как отмечали [13, 20], за счет высокой растворимости и подвижности соединений Cd с органическим

веществом, содержание которого увеличивалось в опыте с 9.0 в контроле до 9.5% в варианте IV, в подпахотном слое – к снижению при увеличении содержания фосфатов (табл. 2) и без изменений содержания ПФ металла [18].

Таким образом, СП Cd в пахотном слое изменялась недостоверно, но имела тенденцию

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почвы вариантов опыта (2012 г.)

Вариант	Органическое вещество, %		pH <sub>KCl</sub>		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			K <sub>2</sub> O	
	1	2	1	2	мг/кг				
					1	2	1	1	2
Без известкования									
I. Контроль	9.03 ± 0.22	9.51 ± 0.09	4.81 ± 0.003	4.77 ± 0.003	123 ± 0.9	125 ± 0.6	156 ± 3.8	136 ± 1.2	
2. P50K80	9.78 ± 0.06	9.88 ± 0.06	4.69 ± 0.06	4.57 ± 0.03	190 ± 1.00	191 ± 1.2	171 ± 1.5	161 ± 1.5	
3. N30P50K80	9.69 ± 0.25	9.75 ± 0.16	4.73 ± 0.003	4.93 ± 0.003	229 ± 3.8	210 ± 2.5	156 ± 2.9	149 ± 3.5	
4. N90P50K80	9.52 ± 0.08	8.85 ± 0.11	4.73 ± 0.003	4.69 ± 0.003	240 ± 1.5	253 ± 2.7	157 ± 2.4	149 ± 2.9	
Известкование 0.5 г.к.									
I. Контроль	9.45 ± 0.05	8.97 ± 0.16	5.02 ± 0.003	5.20 ± 0.01	195 ± 0.7	168 ± 0.6	184 ± 3.3	144 ± 3.2	
II. P50K80	9.39 ± 0.04	9.75 ± 0.04	5.07 ± 0.003	5.34 ± 0.003	214 ± 1.7	297 ± 1.5	237 ± 3.0	166 ± 0.6	
III. N30P50K80	9.95 ± 0.05	9.65 ± 0.14	4.87 ± 0.02	4.82 ± 0.003	308 ± 1.2	297 ± 1.3	169 ± 2.0	204 ± 2.3	
IV.N90P50K80	9.72 ± 0.10	9.01 ± 0.24	4.85 ± 0.00	4.85 ± 0.00	307 ± 2.0	288 ± 1.0	235 ± 12	176 ± 3.5	

Примечание. В графе 1 – слой 0–20 см, 2 – слой 21–40 см.

к увеличению до максимума в варианте IV. Она достоверно увеличивалась в подпахотном слое при внесении РК-удобрений (вариант II) и добавлении к ним низкой дозы азота (вариант III). При внесении более высокой дозы азота (вариант IV) были достоверными различия с контролем и с вариантом внесения РК-удобрений (вариант II).

Известкование по 0.5 г.к. вызвало тенденцию к снижению СП Cd в пахотном слое вариантов I, II и III, вызванную, вероятно, образованием прочных органо-минеральных соединений металла с кислотами сидерофоров злаков [10], а также увеличением содержания фосфатов (табл. 2). Внесение извести достоверно снижало СП Cd в варианте IV, где происходило увеличение содержания гумуса, фосфатов и КРФ [18].

СП металла имела тенденцию к увеличению в подпахотном слое после известкования в вариантах контроля и II, в варианте III — достоверное снижение, а в варианте IV изменений не отмечено. Тенденция к увеличению СП металла проявилась, видимо, из-за увеличения содержания ПФ металла, а к снижению — из-за увеличения содержания КРФ Cd в соответствующих вариантах, вызванное, вероятно, более значительным увеличением содержания КРФ металла, чем ПФ [18].

Значимых изменений не было выявлено при внесении удобрений после известкования по сравнению с пахотным слоем контрольного варианта. Однако СП Cd значительно увеличивалась при добавлении к РК-удобрениям низкой дозы азота (вариант III) вследствие увеличения содержания ПФ металла [18] и органического вещества, а также усиления кислотности почвы. Она достоверно снижалась до минимума при увеличении дозы азота (вариант IV) и содержания КРФ Cd [18], аналогичный результат получен авторами работы [21].

СП Cd — максимальная в подпахотном слое в контроле, достоверно снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II) вследствие снижения содержания ПФ металла [18] и увеличения количества фосфатов (табл. 2). Она увеличивалась в вариантах при внесении НРК-удобрений (варианты III и IV) по сравнению с вариантом II (РК-удобрения), но не достигала величины в контроле. В вариантах III и IV содержание фосфатов изменялось незначительно, но увеличивалось содержание ПФ металла [18]. Усиление дозы азота в НРК-удобрениях (вариант IV) не изменяло значимо СП металла по сравнению с вариантом III. Таким образом, только РК-удобрения (вариант II) так изменяли величину СП Cd, которая затем значимо различалась с контролем и вариантами применения НРК-удобрений (варианты III и IV).

СП Pb имела в пахотном слое контроля без известкования максимальную величину среди других вариантов из-за самого низкого содержания фосфатов (табл. 2) и высокого содержания ПФ металла [18]

(табл. 1). Она снижалась в варианте II (использование РК-удобрений) вследствие увеличения связей металла с органическим веществом, содержание которого увеличивалось. Также увеличивалась концентрация в почве фосфатов (табл. 2) и снижалось содержание ПФ Pb из-за связывания ими ионов металла [18]. На это указывали авторы в исследованиях на серых лесных почвах [13]. СП металла достигала минимума при внесении полного минерального удобрения с низкой дозой азота (вариант III) и значимо различалась с вариантом II вследствие увеличения содержания фосфатов (табл. 2) и минимального содержания ПФ металла [18]. СП Pb достоверно увеличивалась до уровня варианта II после увеличения дозы азота (вариант IV) из-за повышения содержания ПФ металла также до величины в варианте II [18] и при незначительном изменении содержания фосфатов. Таким образом, СП Pb при внесении минеральных удобрений значимо изменялась: в варианте II с РК-удобрениями отмечено снижение, которое продолжалось при внесении азота (вариант III), а при увеличении его дозы (вариант IV) — увеличивалась (табл. 1).

СП металла была в подпахотном слое контроля и варианта II значимо меньше, чем в пахотном слое соответствующих вариантов. Она имела тенденции: к снижению в вариантах II, III, в варианте IV — к увеличению. Значимое увеличение было отмечено при повышении дозы азота в НРК-удобрениях (вариант IV) из-за увеличения содержания ПФ металла [18] и снижения содержания органического вещества почвы (табл. 2).

Известкование вызвало тенденцию снижения СП Pb в пахотном и в подпахотном слоях контроля, вероятно, путем иммобилизации ПФ металла [22]. Оно значимо снижало СП Pb в подпахотном слое (табл. 1) при внесении РК-удобрений (вариант II) из-за более низкого содержания ПФ и более высокого содержания КРФ металла [18] и при увеличении содержания фосфатов в почве (табл. 2).

Известкование, как мощный агрохимический фактор, снижало СП металла в почве контроля, причем сильнее в пахотном слое, чем в подпахотном, но в обоих случаях это было недостоверно. Снижение СП металла усиливалось при применении РК-удобрений (вариант II) до значимых различий в обоих слоях. В других вариантах значимых различий не отмечено.

При известковании минеральные удобрения значимо снижали СП Pb по сравнению с контролем в подпахотном слое вариантов II и III, в варианте IV — в обоих слоях. Добавление к РК-удобрениям азота в низкой дозе (вариант III) не вызывало значимых изменений величины СП Pb в обоих слоях. Она значимо повышалась в пахотном слое варианта IV при увеличении дозы азота в НРК-удобрениях

из-за того, что увеличивалось содержание ПФ Pb [18], на это указывали подобные исследования с высокими дозами NPK [23].

Величина СП Pb снижалась в обоих слоях во всех вариантах с удобрениями и известкованием практически до величин, меньших контроля, кроме пахотного слоя варианта IV. Такой же результат получили в работе [21], вероятно, из-за увеличения адсорбции металла на гуминовых кислотах [24], т.к. содержание органического вещества увеличивалось (табл. 2). Таким образом, разные дозы азота в составе NPK-удобрения проявили разнонаправленное действие в сравнении с контролем.

СП Cu была минимальной среди других металлов в обоих слоях почвы, видимо, из-за образования медью более прочных по сравнению с другими металлами связей с органическим веществом черноземной почвы [25, 26]. Она незначимо варьировала в пахотном слое вариантов без известкования при внесении минеральных удобрений (табл. 1). СП металла достоверно снижалась в подпахотном слое варианта II (внесение РК-удобрений), а при повышенной дозе азота (вариант IV) достоверно увеличивалась и сравнивалась с контролем.

При известковании СП Cu претерпевала существенные изменения. В пахотном слое варианта II (РК-удобрения) проявлялась тенденция к ее увеличению. СП металла значимо увеличивалась при использовании NPK-удобрений с низкой дозой азота (вариант III), а при ее увеличении — достоверно снижалась (вариант IV), вероятно, из-за более низкой кислотности почвы (табл. 2). В подпахотном слое СП меди значимо снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II) и при увеличенной дозе азота (вариант IV), когда росло содержание КРФ Cu [18] и снижалось содержание органического вещества (табл. 2). Оба слоя достоверно различались между собой в вариантах I и II в условиях без известкования и при известковании, причем в обоих случаях в варианте I СП Cu была больше в подпахотном слое, а в варианте II — в пахотном.

СП Zn значимо увеличивалась в пахотном слое в условиях без известкования при использовании РК-удобрений (вариант II) и при внесении NPK с низкой дозой азота (вариант III) (табл. 1). Вероятно, это происходило в результате повышения доступности металла вследствие минерализации органического вещества сидерофорами [7] и подкисления почвы (табл. 2). СП металла достоверно снижалась до уровня контроля при повышении дозы азота (вариант IV), подобное отмечено в работе [21]. В нашем случае было выявлено увеличение содержания КРФ Zn [18] и фосфатов (табл. 2). СП Zn значимо снижалась до минимума в подпахотном слое при внесении NPK-удобрений (вариант III и IV) по сравнению с контролем, вероятно, из-за значительного

увеличения содержания фосфатов и снижения содержания ПФ Zn [18].

Известкование разнонаправленно и значимо изменяло СП Zn в слоях почвы в контроле: повышало в пахотном и снижало в подпахотном, в которых соответствующим образом изменялось содержание ПФ металла [18], в результате чего величины его СП не имели достоверного различия между слоями (табл. 1). Внесение РК-удобрений (вариант II) значимо снижало СП Zn в пахотном слое из-за образования менее подвижных форм металла с фосфатами (КРФ) [18], в том числе при известковании [11, 27, 28] (табл. 2). Добавление к РК-удобрениям низкой дозы азота (вариант III) значимо по сравнению с контролем увеличивало СП металла до максимума в опыте (табл. 1) из-за того, что увеличивалось содержание ПФ Zn [18] и усиливалась кислотность в почве варианта III (табл. 2). Увеличение дозы азота в составе NPK (вариант IV) вызвало снижение СП Zn из-за повышения содержания ПФ металла [18] и снижения содержания органического вещества в почве варианта (табл. 2).

СП Zn значимо уменьшалась в подпахотном слое с внесением РК-удобрений (вариант II) после известкования в условиях снижения содержания ПФ металла [18], увеличения содержания фосфатов, снижения содержания органического вещества и уменьшения кислотности (табл. 2). Добавление к РК-удобрениям азота в низкой дозе (вариант III) способствовало значимому росту СП Zn, связанному, вероятно, с увеличением содержания ПФ металла [18] при неизменном содержании фосфатов и снижении содержания органического вещества в почве варианта.

Увеличение дозы азота (вариант IV) вызвало тенденцию к снижению СП Zn, вероятно, из-за роста содержания КРФ металла при неизменной величине его ПФ [18], снижения содержания органического вещества почвы варианта.

Таким образом, отдельное и совместное использование мелиоранта и разных видов и доз удобрений оказывало существенное влияние на изменения СП ТМ с проявлением общих закономерностей. Например, величины СП Cd, Pb и Zn были в основном меньше при известковании, а СП Cu варьировала в условиях опыта менее значительно по сравнению с другими металлами. Удобрения на фоне известкования понижали СП Cd, а без него — увеличивали, причем вектор этих изменений в слоях часто зависел от доз азота в NPK. Фосфорно-калийные удобрения в основном снижали СП металлов, а известкование усиливало действие этих удобрений, снижая СП Cd и Zn в пахотном слое. Величины СП Pb снижались до минимума при применении РК- и NPK-удобрений с низкой дозой азота в условиях известкования и без него, а с максимальной дозой азота — увеличивались. Известкование усиливало различия в величинах СП Zn между слоями в вариантах применения

РК-удобрений, а при внесении азота различия значительно уменьшались.

Величины СП ТМ в условиях известкования и без него составили следующий ряд:  $Cd > Pb > Zn > Cu$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Действие и последствие длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и баланс макроэлементов в черноземе обыкновенном // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 49–56.
2. Пугаев С.В. Содержание и транслокация поллютантов в компонентах антропогенно измененных биогеоценозов в условиях Республики Мордовия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород: ННГУ, 2013. 23 с.
3. Boincean B., Nica L., Stadnic S. Fertilizarea si fertilitatea cenoziomului din stepa Baltiului sub influenta intensificarii tehnologice a agriculturii // 1<sup>a</sup> Conferinta Internationala la "Transfer de inovatii in activitatile agrocole in contextual Schimbăriichemei si dezvoltării durable," Agroinform, Chisinau, 11–12 noiembrie, 2009. P. 174–186.
4. Никитин Е.Д., Скворцова Е.Б., Кочергин А.Н., Никитина О.Г., Иванов О.П., Сабодина Е.П., Воронцова Е.М. О развитии учения об экологических функциях почвенного покрова и других геосфер // *Почвоведение*. 2010. № 7. С. 771–778.
5. Esitken A., Yildiz H.E., Ercisli S., Dönmez M.F., Turan M., Gunes A. Effects of plant growth promoting bacteria (P<sub>g</sub>PB) in yield, growth and nutrient contents of organically growth strawberry // *Sci. Horticult.* 2010. № 124. P. 626.
6. Мязин Н.Г., Павлов Р.А., Шеина В.В. Влияние удобрений на накопление нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях и на продуктивность звена зернопаропропашного севооборота // *Агрохимия*. 2006. № 2. С. 22–29.
7. Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С. Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
8. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Агрохимия*. 2020. № 10. С. 79–88.
9. Потатиева Ю.А. Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // *Агрохимия*. 2013. № 6. С. 83–94.
10. Romheld V., Marschner H. Evidence for a specific uptake system for iron phyto siderophores in roots of grasses // *Plants Physiol.* 1986. V. 80. P. 175–180.
11. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ЛНИИСХ РАСХН, 2010. 254 с.
12. Пугаев С.В. Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях Республики Мордовия // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 71–80.
13. Якименко В.Н., Конарбаева Г.А. Трансформация фонда тяжелых металлов серой лесной почвы в агроценозе // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 61–69.
14. Классификация и диагностика почв СССР / Под ред. Г.В. Добровольского. М., 1977. 223 с.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 423 с.
16. Адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Республики Мордовия (метод. рук-во). Саранск, 2003. 428 с.
17. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
18. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Влияние длительного применения средств химизации на содержание фракций Cd, Pb, Cu и Zn в слоях чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого // *Агрохимия*. 2022. № 5. С. 43–55.
19. Манджиева С.С., Минкина Г.Н., Мотузова Г.Н., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // *Почвоведение*. 2014. № 5. С. 632–640.
20. Ямалтдинова В.Р., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Влияние систем удобрения на агрохимические показатели и накопление тяжелых металлов в почве и яровой пшенице (*Triticum aestivum* L.) // *Пробл. агрохим. и экол.* 2020. № 3. С. 39–43.
21. Черникова О.В., Карпов А.Н. Приемы восстановления плодородия черноземных почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Агрохим. вестн.* 2014. № 2. С. 24–25.
22. Назарова Л.К., Дильмухаметова И.К., Егоров В.С., Кирпичников Н.А., Морачевская Е.В., Карпунин М.М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и известкования на состояние баланса свинца в агроценозе на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Московской области // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 2. С. 18–23.
23. Чеглакова О.А., Шихова Л.Н. Сезонная динамика содержания свинца в дерново-подзолистой почве при внесении минеральных удобрений // *Аграрн. наука Евро-Северо-Востока*. 2021. № 2. С. 234–243.
24. Переломов Л.В., Чилачева К.В., Швыкин А.Ю., Атрощенко Ю.М. Влияние органических веществ



- гумуса на поглощение тяжелых металлов глинистыми минералами // *Агрохимия*. 2017. № 2. С. 89–96.
25. Минкина Т.М., Пинский Т.М., Самохин А.П., Статовой А.А. Поглощение меди, цинка и свинца черноземом обыкновенным при моно- и полиэлементном загрязнении // *Агрохимия*. 2005. № 8. С. 58–64.
  26. Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants. 4-th edit. Boca Raton, Florida: C.R.C. Press, 2010. 548 p.
  27. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Самохин А.П., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Влияние различных мелиорантов на подвижность цинка и свинца в загрязненном черноземе // *Агрохимия*. 2007. № 10. С. 67–75.
  28. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // *Почвоведение*. 2011. № 11. С. 1304–1311.

## Effect of Fertilizers and Meliorants on the Mobility of Cd, Pb, Cu and Zn in Layers of Leached Heavy Loam Chernozem

S. V. Pugaev<sup>a, #</sup>, L. N. Prokina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Mordovian Research Institute of Agriculture – Branch of the N.V. Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East,*

*ul. Michurina 5, r.p. Yalga, Saransk 430904, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: niish-mordovia@mail.ru*

The degree of mobility (DM) of Cd, Pb, Cu and Zn in arable (0–20 cm) and sub-arable (21–40 cm) soil layers was studied when applying phosphorus-potassium and nitrogen fertilizers on the background of liming and without it. It was revealed that the values of the DM of heavy metals (HM) were mainly lower during liming. In Cu, it varied less significantly compared to other metals. Fertilizers on the background of liming significantly lowered the Cd loss compared to the control, and without it – increased it in both layers. The vector of changes in the DM of the metal in the layers during liming depended on the doses of nitrogen in the NPK complex. Phosphorus-potash fertilizers reduced the DM of metals, and liming enhanced their effect. The values of DM decreased to a minimum with the use of PK- and NK-fertilizers with a low dose of nitrogen in liming conditions and without it, and increased with a maximum dose of nitrogen. Liming increased the differences in the joint venture between the layers in the nitrogen-free versions, and significantly reduced them when applied. Liming did not change the location of the metals in terms of their DM under experimental conditions: Cd > Pb > Zn > Cu.

**Keywords:** soil, fertilizers, heavy metals, mobility.

# СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ И МЕТОДОВ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2025 г. А. А. Брагин<sup>1,\*</sup>, А. Д. Базык<sup>2</sup>, Н. А. Павлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, лаборатория физико-химического анализа департамента по реализации проекта “Инновационные корма и кормовые добавки”

350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, кафедра биохимии, биофизики и биотехнологии факультета зоотехнии

350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

\*E-mail: Bunss16@yandex.ru

Многие действующие вещества пестицидов являются опасными токсикантами, способными нарушать стабильность природных и агрокультурных экосистем и причинять необратимый вред здоровью человека при попадании в организм. Кроме того, ежегодно разрабатывают от нескольких единиц до нескольких десятков новых действующих веществ пестицидов и препаратов на их основе. Это определяет критическую необходимость в контроле их применения и содержания в объектах окружающей среды, особенно в сельскохозяйственной продукции. Развитие современных химических аналитических методов помогает повысить эффективность такого контроля. Совершенствование методов экстрагирования пестицидов из крайне сложных матриц почв и сельскохозяйственной продукции позволяет значительно ускорить и удешевить проведение единичного анализа, а улучшение аналитического оборудования позволяет определять пикограммовые содержания целевых пестицидов или проводить мониторинговые исследования образцов для идентификации загрязнителей.

**Ключевые слова:** пестициды, сельскохозяйственная продукция, инсектициды, гербициды, фунгициды, хлорорганические пестициды, фосфорорганические пестициды, газовая хроматография, жидкостная хроматография, масс-спектрометрия, QuEChERS-пробоподготовка, твердофазная экстракция, дисперсионная жидкость-жидкостная микроэкстракция.

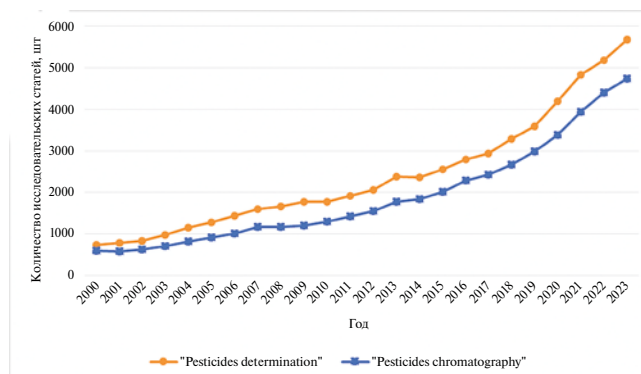
**DOI:** 10.31857/S0002188125010117, **EDN:** VBXNAL

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно ФЗ № 109 “О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами” [1], пестициды – вещества или смесь веществ, в том числе используемые в качестве регуляторов роста растений, феромонов, дефолиантов, десикантов и фумигантов, и препараты химического или биологического происхождения, предназначенные для борьбы с вредными организмами.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, использование пестицидов за последние 30 лет выросло более чем в 2 раза [2]. В связи с этим актуальность проблемы определения пестицидов с каждым годом возрастает. Это подтверждается проведенным анализом литературы, представленной на платформе ScienceDirect.com: количество исследовательских статей по запросу “определение пестицидов” выросло с 739 в 2000 г. до 5861 в 2023 г. (рис. 1).

Всемирная организация здравоохранения сообщает, что пестициды потенциально токсичны для других организмов, включая человека, спустя многие десятилетия после их применения на аграрных территориях. Многие из старых и более дешевых



**Рис. 1.** График роста публикационной активности по теме определения пестицидов в период с 2000 по 2023 г.

пестицидов, таких как дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и линдан, могут годами оставаться как в почве, так и в воде [3].

Контроль за уровнем содержания пестицидов в объектах окружающей среды, включая сельскохозяйственную продукцию, развивается и ужесточается. Например, список контролируемых действующих веществ пестицидов расширился с 571 наименования в 2013 г. до 603 — в 2018 г. и затем до 627 в 2021 г. (ГН 1.2.3111-13, ГН 1.2.35.39-18, СанПиН 1.2.3685-21 соответственно), а максимальные допустимые уровни (МДУ) многих веществ планомерно снижались.

Основным способом контроля применения пестицидных препаратов в объектах окружающей среды является количественное определение их действующих веществ. Сегодня широкое применение при определении пестицидов получили такие методы, как газовая хроматография (ГХ), высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), тандемная масс-спектрометрия (МС/МС) и ее сочетания с вышеуказанными методами. Несмотря на последние достижения в разработке высокоточных и высокочувствительных методов, определение пестицидов по-прежнему остается актуальной проблемой для многих исследователей. Большое разнообразие используемых пестицидов, постоянный рост производства все новых препаратов, сложный состав и разнообразие исследуемых матриц требует не только высокоточного оборудования, но и создания более экспрессных и эффективных подходов к решению данной проблемы [4].

Цель работы — предоставление актуальной информации о наиболее часто применяемых пестицидах в аграрной промышленности и о современных методах их количественного определения.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЕСТИЦИДОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Использование пестицидов в сельском хозяйстве Российской Федерации растет. По данным Росстата, в 2018 г. применение пестицидов составило 154.3 т, в 2022 г. — уже 215.6 т. Увеличение спроса происходит за счет интенсификации сельского хозяйства и ввода новых земель сельскохозяйственного назначения. При этом доля гербицидов в общей массе была равна 68, фунгицидов — 17, инсектицидов — 14% [5, 6].

Согласно результатам исследования [7], наибольшее распространение в отечественном сельском хозяйстве получили препараты на основе следующих действующих веществ гербицидов, фунгицидов и инсектицидов. В табл. 1 представлены некоторые их представители и их предельно допустимые концентрации в сельскохозяйственной продукции (с.п.).

Основным механизмом загрязнения сельскохозяйственной продукции пестицидами является их миграция по трофическим уровням [6]. Из-за низкой эффективности методов применения пестицидных препаратов многие сельхозпредприятия используют дозировки, в разы превышающие необходимые нормы. Избыток препаратов остается в почве или мигрирует в водоемы, расположенные недалеко от полей. Основной причиной низкой эффективности использования пестицидов является плохое удержание пестицидов на целевой поверхности листьев сельскохозяйственных культур. Во-первых, более 50% капель распыляемых пестицидов демонстрируют нежелательное поведение при распылении в виде разбрызгивания и подпрыгивания на поверхности листьев, поскольку большая часть поверхности листьев растений обладает гидрофобной природой из-за их шероховатой структуры и покрытия воском [8]. Во-вторых, осевшие пестициды довольно легко удаляются с поверхности листьев в неблагоприятных погодных условиях, например, при дожде, поскольку между веществом пестицида и поверхностью листьев растений нет сильного взаимодействия [9]. Таким образом, ключевым путем для снижения пестицидной нагрузки на объекты окружающей среды является повышение эффективности их применения, что подразумевает регулирование смачивания и улучшение осаждения распыленных пестицидов на водоотталкивающую поверхность листьев растений и усиление адгезии пестицидов к поверхности листьев, увеличение их устойчивости к фотолизу, дождю или другим факторам окружающей среды [10]. Наиболее перспективные разработки в этом направлении представлены в табл. 2.

Основным направлением совершенствования применения пестицидов является разработка различных добавок к распыляемым растворам и суспензиям пестицидов. Но данный подход обладает рядом существенных недостатков, среди которых могут быть дороговизна и/или сложность производства и применения данных добавок, потенциальная токсичность для человека и окружающей среды. Поэтому наибольшее распространение на современном рынке получили модернизированные системы распыления пестицидов, например электростатическое распыление. Однако даже они не позволяют избежать необходимости применения избытка пестицидов. Большое разнообразие пестицидных препаратов, их высокая токсичность, а также ужесточение требований к безопасности сельскохозяйственной продукции требуют разработки новых эффективных аналитических методов контроля пестицидов как в продукции, так и объектах окружающей среды.

**Таблица 1.** Перечень ПДК пестицидов, применяемых в России

Наименование группы	Наименование пестицида	ПДК в с.п., мг/кг
Гербициды	2,4-Д (2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота)	0.01
	Флорасулам	0.05
	Флуметсулам	1.0
	Амидосульфурон	0.1
	Йодосульфурон-метил натрия	0.01
	Мефенпир-диэтил	0.01
	Трибенурон-метил	0.01
	Феноксапроп-П-этил	0.01
	Клоквинтосет-мексил	0.1
	Глифосат	0.05
Фунгициды	Карбендазим	0.05
	Пропиконазол	0.01
	Беномил	0.015
	Флутриафол	0.05
	Тебуконазол	0.01
	Пираклостробин	0.02
	Ципроконазол	0.05
	Азоксистробин	0.01
	Димоксистробин	0.05
	Боскалид	0.02
Инсектициды	Циперметрин	0.005
	Цигалотрин	0.01
	Диметоат	0.05
	Имидаклоприд	0.02
	Тиаметоксам	0.02
	Ацетамиприд	0.03
	Дифенокназол	0.02
	Хлорпирифос	0.05
	Индоксакарб	0.01
	Малатион	0.01
	Хлорантранилипрол	0.01

### СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Определение пестицидов с использованием инструментальных аналитических методов включает в себя несколько основных этапов: гомогенизацию образца, экстракцию из матрицы, очистку экстракта и идентификацию аналита. Каждый этап обладает рядом лимитирующих стадий. Перевод аналита из матрицы в органический экстракт называется экстракцией. На данном этапе лимитирующей стадией становится извлечение аналитов и получение экстракта, содержащего минимальное количество компонентов матрицы. С целью оптимизации данного этапа полученный экстракт подвергают отдельному

этапу очистки. Данный этап позволяет не только избавиться от мажорных компонентов матрицы, но и в ряде случаев сконцентрировать определяемые компоненты пробы [4].

*Экстракция и очистка экстрактов.* Жидкость-жидкостная экстракция (ЖЖЭ) — перевод одного или нескольких компонентов раствора из одной жидкой фазы в контактирующую и не смешивающуюся с ней другую жидкую фазу. Для экстракции пестицидов используют различные растворители или смеси растворителей, например, гексан [11], ацетонитрил [12], дихлорметан-ацетон [13], этилацетат-циклогексан [14] и др. В работе [15] для извлечения большого количества разных пестицидов к измельченным образцам шпината (50 г), мандаринов (50 г) и риса (25 г),

**Таблица 2.** Различные стратегии увеличения эффективности применения пестицидов

Способ	Преимущества	Недостатки	Источник
Электростатическое распыление	Высокая точность распыления	Слабое взаимодействие с поверхностью листа	128
Уменьшение размера капель	Высокая эффективность осаждения	Сложное техобслуживание	129
Полимерные добавки	Высокая эффективность осаждения	Токсичность	130
Добавки поверхностно активных веществ	Высокая эффективность осаждения	Токсичность	131
Добавки растительных масел	Высокая эффективность осаждения	Высокая стоимость, закрытие устьиц листьев	132
Добавки полиэлектролитов	Высокая эффективность осаждения	Высокая сложность использования	133
Добавки наночастиц оксида титана	Высокая эффективность осаждения	Токсичность	134
Добавка нанокапсул с кремнеземной оболочкой	Контролируемое высвобождение пестицидов	Слабое взаимодействие с поверхностью листа	135
Добавка наночастиц авермектина	Контролируемое высвобождение пестицидов	Сложный процесс производства и использования, низкая эффективность осаждения	136
Добавка наногеля	Высокая эффективность осаждения, устойчивость к удалению.	Токсичность	137

разбавленных водой (30 мл), добавляли 100 мл ацетонитрила и отстаивали в течение 2 ч. Затем, после гомогенизации, смесь фильтровали, а фильтрат собирали в делительную воронку. Добавляли 15 г хлорида натрия и интенсивно встряхивали. После этого отбирали 10 мл органической фазы, концентрировали на водяной бане при 40 °С и растворяли в 4 мл дихлорметана, содержащего 1% метанола. Полученный экстракт подвергали очистке при помощи ТФЭ (твердофазной экстракции) с использованием специального картриджа. Результат очистки выпаривали, перерастворяли в 5 мл ацетонитрила и подвергали анализу. Авторы [16] для повышения эффективности экстракции использовали смесь из ацетонитрила и циклогексана, т.к. ЖЖЭ применяли для извлечения широкого спектра пестицидов из различных сельскохозяйственных продуктов, таких как рис, огурцы, паприка, виноград, пшеничная мука и яблоки. В гомогенизированные образцы добавляли 200 мл ацетонитрила и 35 г хлорида натрия. Смесь гомогенизировали, добавляли 100 мл смеси этил ацетата/циклогексана (1 : 1). Смесь повторно гомогенизировали и отстаивали до разделения фаз. Полученные 200 мл органической фазы фильтровали через фильтр,

содержащий 100 г сульфата натрия, в круглодонную колбу. Фильтр четырежды промывали смесью этил ацетата/циклогексана (1 : 1) порциями по 20 мл. Фильтрат выпаривали до водянистого остатка, добавляли 7.5 мл этил ацетата до полного растворения остатка от упаривания, 5 г солевой смеси (сульфат/хлорид натрия, 1 : 1), перемешивали, добавляли 7.5 мл циклогексана, снова перемешивали. После отстаивания супернатант подвергали анализу. На сегодняшний день от использования метода ЖЖЭ все чаще отказываются ввиду его трудоемкости, дороговизны, требования большого количества потенциально опасных растворителей.

Дальнейшее развитие ЖЖЭ получила в форме дисперсионной жидкость-жидкостной микроэкстракции (ДЖЖМЭ). Метод разработан в 2006 г. В его основе лежит трехкомпонентная система растворителей, состоящая из анализируемого водного раствора, неполярного органического растворителя-экстрагента с плотностью большей, чем у воды, и полярного органического растворителя-диспергента, смешивающегося с водой и экстрагентом. В качестве экстрагентов в этом варианте ДЖЖМЭ

чаще всего используют хлороформ (42%), дихлорэтан (18%), четыреххлористый углерод (15%), а в качестве диспергентов — ацетонитрил (56%) и метанол (28%). Другие диспергирующие растворители, например, ацетон и этанол, применяют значительно реже [17]. Инструментальное направление ДЖЖМЭ нацелено на отказ от использования диспергентов. В работах чаще всего встречаются ультразвуковое диспергирование [18], вихревое диспергирование [19], диспергирование пузырьками воздуха [20] и др. В данном случае основными параметрами, влияющими на эффективность экстракции, являются время проведения экстрагирования, используемый органический растворитель, отношение объема растворителя к объему образца, использование высаливания и применяемые для него реагенты, температура и pH пробы. Разработка и применение новых, нетипичных экстрагентов — одно из актуальных направлений развития данного метода. В классическом варианте применяют растворители с большей чем у воды плотностью (хлороформ, хлорбензол, тетрахлорметан и тетрахлорэтилен). Однако есть возможность применять и более “легкие” растворители — гексан, циклогексан, гексадекан, *m*-ксилон, ундеканол, додеканол [21]. Такие растворители обладают меньшей токсичностью и хорошо сочетаются с такими методами, как высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) и капиллярный элеткорфорез (КЭ). Главным недостатком таких растворителей является склонность “легких” растворителей распределяться по поверхности воды в виде тончайшей пленки, что затрудняет отбор органической фазы.

Альтернативой таким растворителям являются ионные жидкости (ИЖ). В традиционном варианте берут 30–60 мкл гидрофобной ИЖ, выбранной в качестве экстрагента, смешивают с 200–500 мкл диспергента, в качестве которого чаще всего используют метанол (ацетонитрил, ацетон, этанол или гидрофильную ИЖ). Полученную смесь ИЖ и диспергента при помощи шприца быстро вводят в анализируемую пробу и перемешивают вручную в течение нескольких минут. После центрифугирования в течение 5–10 мин выделившуюся фазу экстракта, находящуюся на дне конической пробирки, отбирают при помощи микрошприца, разбавляют метанолом для снижения вязкости экстракта и используют для анализа [22]. В некоторых случаях этап центрифугирования заменяют введением в раствор деэмульгатора (чаще всего это ацетонитрил, метанол, этанол), вследствие чего происходит разрушение эмульсии [23]. Ограничением ДЖЖМЭ с ИЖ является невозможность определения сконцентрированных органических соединений методом газовой хроматографии [22].

Параллельно развитию ДЖЖМЭ широкое применение получил метод однокпельной микроэкстракции (single drop microextraction, SDME). Впервые

в современном виде данный метод был представлен в 1997 г. [24]. В качестве водной фазы использовали водные растворы 4-метилацетофенона, прогестерона, 4-нитротолуола и малатиона с известными концентрациями. Органическая фаза представляет собой *n*-октан, содержащий фиксированную концентрацию внутреннего стандарта, представляющего собой *n*-тетрадекан, *n*-октадекан или *n*-додекан. В работе [25] экстрагирование проводили следующим образом: в шприц объемом 2 мкл отбирали органическую фазу, 1 мкл которой сразу же выпускали в виде капли. Этим шприцом протыкали мембрану вials, в которой находится водный раствор пробы, при этом капля органического растворителя в него не попадала. Выпускали из шприца оставшийся 1 мкл органического растворителя, который образовывал каплю на кончике иглы. После перемешивания в течение заданного периода времени отбирали шприцом 2 мкл, таким образом отбирая и каплю органического экстракта, и 1 мкл водного раствора. После шприц вынимали, 1 мкл водного раствора вытесняли, протирали иглу салфеткой, а органический экстракт вводили в газовый хроматограф. Часто для увеличения эффективности экстракции в таких случаях использовали водный раствор пробы со значительным содержанием полярного органического растворителя. Это связано с тем, что водные растворы проб часто представляют из себя эмульсию, что сильно осложняет процесс экстракции [25]. Добавление в образец неорганических солей, таких как хлорид натрия, снижает растворимость пестицидов ввиду повышения ионной силы раствора, что приводит к увеличению эффективности экстракции. В свою очередь это влияет на выбор растворителя для капли: он не должен растворяться в полученном растворе, иначе проведение экстракции будет невозможно. Кроме того, растворитель должен быть нелетучим и вязким для обеспечения стабильности капли при проведении экстракции. Объем капли также является важным фактором: при его увеличении растет количество экстрагируемых аналитов, но при этом уменьшается стабильность самой капли. Температура имеет неоднзначное влияние на процесс экстрагирования. Увеличение температуры приводит к увеличению диффузии аналита как в органический растворитель, так и из него, однако при этом температура в значительной степени определяет стабильность капли и ее растворимость в водном растворе. Некоторые исследования показали положительное влияние увеличения температуры на эффективность экстракции [24], в других же говорится о его негативном влиянии [26]. Время экстрагирования и интенсивность перемешивания с увеличением температуры повышали эффективность экстракции, но снижали устойчивость капли [27, 28].

*Твердофазная экстракция (ТФЭ).* С развитием производства сорбентов широкое распространение

при анализе пестицидов из разнообразных матриц получил метод твердофазной экстракции. Ключевым этапом применения данного метода является выбор подходящего сорбента для адсорбции аналита, т.к. эффективность применения ТФЭ напрямую зависит от характера взаимодействия извлекаемых веществ и сорбента [29]. Именно в направлении разработки новых типов сорбентов и модернизации уже существующих происходит основное развитие метода твердофазной экстракции. ТФЭ с использованием многостенных нанотрубок предполагает использование специальных картриджей, в которые помещают данный сорбент. Через данный картридж пропускают раствор образца, в ходе чего происходит сорбция аналитов на поверхности нанотрубок. После этого картридж высушивают и элюируют органическим растворителем (например, 20 мл дихлорметана), в ходе чего происходит десорбция пестицидов в органический растворитель. Элюат выпаривают, перерастворяют в 1 мл циклогексана и проводят газохроматографический анализ [30].

С развитием метода ТФЭ появилась магнитная твердофазная экстракция. Сорбент, являющийся магнитным материалом, добавляют в раствор пробы и диспергируют с помощью ультразвукового облучения. После чего сорбент удаляют с помощью сильного магнита и элюируют органическим растворителем. Снова удаляют сорбент магнитом, а элюат выпаривают и перерастворяют в органическом растворителе [31]. Ключевыми достоинствами данного метода являются экспрессность и дешевизна, однако он не может обеспечить сравнимую с другими методами экстракции степень извлечения пестицидов из проб.

Метод МТФД (матрично-дисперсионная твердофазная экстракция) как развитие метода ТФЭ впервые был представлен в 1989 г. Образцы готовят следующим образом: заготовки тканей животных массой 0.5 г добавляют к 2 г сорбента  $C_{18}$  (шарики диоксида кремния, покрытые октадецилсиланом). Образец осторожно перемешивают стеклянным пестиком в течение 30 с до получения полусухого однородного на вид материала. Добавляют в колонку, объемом 10 мл, содержащую фритт и 0.5 г чистого  $C_{18}$ . Затем добавляют еще 0.25 г сорбента сверху и утрамбовывают для удаления воздушных карманов. После этого через полученную смесь пропускают отдельно 4 органических растворителя: гексан, бензол, этилацетат, метанол (объемом по 8 мл). Каждую фракцию затем упаривают досуха в атмосфере азота, а потом растворяют в соответствующих органических растворителях. Перед проведением анализа каждую фракцию подвергают центрифугированию и фильтрованию супернатанта [32].

Подход с применением ТФЭ для извлечения пестицидов позволяет достаточно эффективно объединить этапы экстракции и очистки. Данный метод

использовали для извлечения гербицидов на основе фенилмочевины из кормов и кормового сырья [33] и батата [34], степень извлечения составляла от 78 до 102%. Данный метод извлечения применим и для жидких образцов — например, фосфор- и хлорорганические пестициды извлекали из проб молока [35], степень извлечения составляла 75–105%.

Метод ТФМЭ (твердофазная микроэкстракция) был представлен в 1990 г. [36] и имел целью преодолеть большинство ограничений, связанных с классическими методами экстракции. Волокно из сплавленного силикагеля с полиимидным покрытием активировали, выдерживая в течение 4 ч при температуре 350°C, и помещали в специальный шприц. Для проведения экстракции данное волокно помещали в раствор образца и перемешивали. После этого с помощью того же шприца волокно извлекали из образца и помещали в инжектор газового хроматографа, где происходила термическая десорбция экстрагируемых пестицидов. Это определяло основные направления развития метода — разработку новых типов и совершенствование существующих видов волокон и различные варианты модернизации их покрытий. Применение ионных жидкостей в качестве сорбента лишило возможности прямого контакта волокна с образцом, что послужило развитием метода ТФМЭ в свободном пространстве [37]. Закрытую колбу с 80 мл водного раствора образца, содержащего 5 г/л каждого извлекаемого пестицида и 30% хлорида натрия, помещали на магнитную мешалку с нагревателем. Вводили в колбу иглу и обнажали волокно для экстракции, устанавливали температуру на уровне 70°C и перемешивали в течение 50 мин. После волокно помещали в инжектор газового хроматографа и проводили анализ. В настоящее время в качестве материалов покрытия для ТФМЭ широко используют ковалентные органические каркасы [38], углеродные материалы (такие как нанотрубки или пористые материалы) [39] и металлорганические каркасы [33].

*QuEChERS* (аббревиатура от Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe или быстрый, легкий, дешевый, эффективный, надежный и безопасный). Большое разнообразие пестицидов и необходимость их регулярного контроля стимулировало разработку методов комплексного извлечения аналитов. *QuEChERS* — один из методов, широко используемых для одновременного извлечения пестицидов различного химического строения [40]. Данный метод был разработан с целью одновременного извлечения полярных и неполярных пестицидов. Данный подход получил настолько широкое распространение, что некоторые его модификации стали *стандартными* — их принимают международные регулирующие органы, такие как Европейский комитет и АОАС (Association of Official Agricultural Chemists). При выполнении метода *QuEChERS* существуют 3 общие

стандартные процедуры. Это оригинальный (без использования буфера) метод QuEChERS, метод AOAC QuEChERS и метод EN QuEChERS, предполагающий использование буфера (табл. 3).

Все стандартные модификации метода QuEChERS на сегодняшний день активно используют для извлечения и последующего определения содержания пестицидов в объектах окружающей среды [41–57].

Дальнейшее развитие данный метод извлечения пестицидов получил через попытки решения проблем извлечения аналитов из особо сложных матриц и извлечения пестицидов, чувствительных к величине pH. Применение метода QuEChERS к pH-чувствительным пестицидам проблематично. Такие пестициды могут быть кислотными или основными. Кислотные пестициды имеют карбоксильные группы и могут быть ковалентно связаны с компонентами матрицы, что затрудняет их извлечение при использовании методов QuEChERS [58, 59]. Некоторые кислые пестициды также образуют мезомерные структуры. Электроны, образующие двойные связи в сопряженных кислотных пестицидах, могут переходить между атомами, слегка изменяя структуру молекулы. Таким образом, молекула пестицида фактически существует в гибридном состоянии между различными структурами, образованными вариациями связей. Образование этих мезомерных структур усложняет хроматографический анализ кислотных пестицидов. Кислотные пестициды ионизируются в водной среде, эти ионные формы гидрофильны, их трудно экстрагировать с использованием органических неполярных растворителей. Таким образом, стандартные методы QuEChERS должны были быть

изменены, чтобы обеспечить эффективное извлечение кислотных пестицидов.

Сорбенты ПВА являются основными и не подходят для использования при извлечении кислотных пестицидов, ввиду образования кислотно-основных связей с сорбентом. Отказ от использования сорбентов ПВА предотвращает потерю кислотных пестицидов в процессе очистки [60]. Еще одной важной модификацией стандартных методов QuEChERS при анализе кислотных пестицидов является включение стадии щелочного гидролиза. Щелочной гидролиз разрушает ковалентные связи, образующиеся между компонентами матрицы и кислотными пестицидами, тем самым освобождая пестициды во время экстракции [61].

Матрицы с высоким содержанием липидов относятся к числу проблемных матриц при использовании метода QuEChERS. Некоторые пестициды липофильны и образуют связи с липидами. Поэтому они абсорбируются и задерживаются жировым слоем, например, в тканях животных, что является причиной низкой степени извлечения пестицидов из подобных образцов [62, 63]. С другой стороны, некоторые жиры соэкстрагируются при извлечении пестицидов методом QuEChERS. Эти липиды будут являться серьезной помехой при проведении хроматографического анализа, поскольку они могут вызвать засорение аналитических колонок. Таким образом, стандартные методы QuEChERS должны быть модифицированы для работы с матрицами с высоким содержанием жира.

Соэкстрагирование липидов можно значительно сократить, включив в метод QuEChERS этап

Таблица 3. Сравнение стандартных методов QuEChERS

Оригинальный метод	EN QuEChERS	AOAC QuEChERS
Экстракция		
10 мл ацетонитрила добавляют к 10 г гомогенизированного образца и перемешивают	15 мл 1%-ной уксусной кислоты в ацетонитриле добавляют к 15 г гомогенизированного образца и перемешивают	
Добавляют 4 г сульфата магния и 1 г хлорида натрия, центрифугируют смесь после перемешивания в течение 5 мин при 5000 об./мин	Добавляют 6 г сульфата магния и 1.5 г ацетата натрия, центрифугируют смесь после перемешивания в течение 1 мин при >1500 об./мин	Добавляют 4 г сульфата магния, 1 г хлорида натрия, 0.5 г гидроцитрата натрия, 1 г цитрата натрия, центрифугируют смесь после перемешивания в течение 5 мин при 3000 об./мин
Очистка		
1 мл супернатанта добавляют к 150 мг сульфата магния и 50 мг ПВА, смесь перемешивают и центрифугируют 1 мин при 6000 об./мин	1 мл супернатанта добавляют в пробирку, содержащую сульфат магния и сорбент или смесь сорбентов (ПВА, C <sub>18</sub> , GCB), перемешивают и центрифугируют 1 мин при >1500 об./мин	1 мл супернатанта добавляют к 150 мг сульфата магния и 25 мг ПВА (и 2.5 или 7.5 мг GCB, если образец пигментирован), смесь перемешивают и центрифугируют 5 мин при 3000 об./мин
Супернатант используют для анализа		



жидкость-жидкостной экстракции гексаном [49, 58]. Кроме того, во время анализа объектов с высоким содержанием жира в матрице можно выполнить этап вымораживания в течение ночи для удаления совместно экстрагирующихся липидов, а также других компонентов, растворимых в ацетонитриле [64].

Метод QuEChERS наиболее эффективен для экстракции пестицидов из образцов с высоким содержанием воды, таких как фрукты и овощи. Для образцов с низким содержанием воды добавляют дополнительную воду для обеспечения оптимального процесса экстрагирования. Технику гидратации сухих образцов успешно использовали во время анализа образцов зерновых (молотый рис, пшеничная мука и молотая кукуруза) с использованием методологии QuEChERS [65, 66].

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ

За последние десятилетия было разработано множество аналитических методов детектирования и определения содержания пестицидов в образцах объектов окружающей среды и продуктов питания. Большое разнообразие аналитов и матриц предполагает применение различных методов анализа. Чаще всего используют газовую хроматографию и высокоэффективную жидкостную хроматографию.

Высокоэффективную жидкостную хроматографию (**ВЭЖХ**) применяют в качестве метода разделения и определения высокополярных нелетучих пестицидов. При проведении анализа **ВЭЖХ** ее часто сочетают с ультрафиолетовым детектированием (**УФ**) [67–71] или детектором с диодной матрицей (**ДМ**) [72–74]. Однако у данных методов отмечен ряд критических недостатков. Например, было проведено определение 323 пестицидов методами **ВЭЖХ-УФ** и **ГХ-МС** [67], 300 из которых определяли с помощью **ГХ-МС**, а 23 – **ВЭЖХ-УФ**. При идентичной пробоподготовке для обоих методов (авторы использовали метод QuEChERS) **ВЭЖХ-УФ** показала большее влияние матричных эффектов на результаты определения, а пределы обнаружения пестицидов находились в диапазоне 0.0025–0.005 для метода **ГХ-МС** и 0.003–0.027 мг/кг – для метода **ВЭЖХ-УФ**. В другой работе при определении диквата, параквата, этилвиологена и дифенцоквата [69] для минимизации матричных эффектов использовали метод **МТФД**. Однако для подбора оптимальных условий экстрагирования необходимо варьировать множество параметров, таких как количество используемого сорбента и элюента, тип элюента, тип подвижной фазы для проведения **ВЭЖХ-УФ** и время проведения экстракции, что является трудозатратным процессом. Применение масс-селективных детекторов в методе **ВЭЖХ** усугубляет эту проблему, т.к. наличие компонентов матрицы в анализируемых экстрактах

не только мешает проведению количественного анализа, но может также привести к быстрому износу дорогостоящего оборудования.

Однако нельзя не отметить ряд достоинств, благодаря которым методы, основанные на жидкостной хромато-масс-спектрометрии, получили широкое распространение. Применение масс-селективных детекторов позволяет идентифицировать большое количество разнообразных пестицидов и определять их на уровне десятых частей нанограмма на килограмм пробы, что делает его наилучшим выбором при проведении научно-исследовательских работ. Однако для проведения мониторингового, рутинного анализа его использование представляется нецелесообразным ввиду дороговизны.

Газовая хроматография (**ГХ**) лишена большинства недостатков **ВЭЖХ** и сохраняет преимущества масс-селективного детектирования при его использовании. Это позволило данному методу стать наиболее распространенным хроматографическим методом определения пестицидов. Газовая хроматография больше всего подходит для разделения неполярных, летучих и легко испаряющихся соединений. Существует большое разнообразие детекторов, применяемых совместно с газовой хроматографией с целью определения пестицидов. Среди них пламенно-фотометрические детекторы (**ПФД**) [75, 76], азотно-фосфорные детекторы (**АФД**) [77, 78], пламенно-ионизационные детекторы (**ПИД**) [79], однако наиболее популярными являются электронозахватные детекторы (**ЭЗД**) [80, 81] и масс-селективные детекторы (**МСД**) [82–86].

Главным преимуществом **ЭЗД** является высокая чувствительность и селективность по отношению ко многим пестицидам при сравнительно дешевой стоимости оборудования. **ГХ-ЭЗД** позволяет детектировать порядка 1.7 нг хлорорганических пестицидов/л [80] и 1.4 нг фосфорорганических пестицидов/л [81]. Однако данный метод обладает существенным недостатком – ввиду невозможности полного хроматографического разделения всех аналитов при попытках одновременного определения широкого спектра пестицидов происходит наложение времен удерживания соединений и, как следствие, проведение их идентификации становится невозможным. Также велико влияние матрицы на результаты исследования образца, вследствие чего требуется проведение дополнительной идентификации методом газовой хромато-масс-спектрометрии (**ГХ-МС**).

Главными преимуществами газовой хромато-масс-спектрометрии являются высокая чувствительность, возможность одновременного определения сотен действующих веществ пестицидов, низкое влияние матричных компонентов на проведение анализа и возможность использования микрообъемов проб. Кроме того, данный метод подлежит стандартизации:

большинство работ выполняют на одних и тех же колонках (кварцевая капиллярная колонка 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, реже используют колонки с длиной 50 или 15 м), в качестве газа-носителя используют высокочистый гелий, ионизацию осуществляют с помощью электронного удара при энергии 70 эВ. При этих условиях масс-спектры определяемых пестицидов обладают крайне высокой воспроизводимостью. Это позволяет накапливать большие библиотеки данных, что облегчает идентификацию пестицидов.

Температурный режим термостатирования газохроматографической колонки является одним из важнейших факторов разделения пестицидов. Программная настройка температурных режимов дает возможность одновременного определения сотен действующих веществ пестицидов: низкая скорость повышения температуры способствует более полному хроматографическому разделению веществ, однако при этом время анализа может достигать 50 мин и более, что не всегда является приемлемым. При совместном определении 300 пестицидов [67] начальная температура печи составляла 70°C, постепенно ее повышали со скоростью 25°C/мин до 120°C, затем со скоростью 5°C/мин до 300°C. Общее время анализа составило 56,8 мин. При определении специфических, легко разделяющихся пестицидов можно сократить время анализа до 14 мин, как в работе [87]. Начальная температура печи также составляла 70°C, которую повышали до 180°C со скоростью 60°C/мин. После этого нагрев уменьшали до 40°C/мин до 300°C.

Чаще всего температурный режим термостата газохроматографической колонки представлен следующим образом: начальная температура печи составляет 50–100°C. Удержание этой температуры применяют, как правило, при использовании пробоподготовки по методу QuEChERS, и оно длится не более 5 мин. Этот этап является необходимым, т.к. экстракты, полученные с помощью данного метода, содержат большое количество солей, которые могут повредить детектор. Затем температуру быстро (со скоростью 15–50°C/мин) поднимают до промежуточного плато (200–230°C), после чего нагревание замедляют (до 5–10°C/мин), доводят температуру печи до максимальной (280–300°C) и выдерживают до завершения анализа. Подобный температурный режим представляет из себя компромисс между эффективностью хроматографического разделения пестицидов и экспрессностью проведения анализа [87–108].

В последнее время в зарубежной литературе активно набирает популярность многомерная газовая хроматография (ГХхГХ). Данный метод действительно предоставляет ряд критических преимуществ, таких как кратное увеличение чувствительности по сравнению с классическим ГХ-МС, еще большее снижение матричных эффектов, возможность одновременного эффективного разделения полярных

и неполярных пестицидов за счет использования разных колонок. При этом данный метод нацелен в первую очередь на определение следовых количеств целевых пестицидов, а не на мониторинговые исследования, предполагающие определение и идентификацию значительно большего количества аналитов за единичный анализ. Кроме того, обычно ГХхГХ используют совместно с масс-спектрометрией высокого разрешения (танDEMная масс-спектрометрия, времяпролетные детекторы, орбитальные ловушки), что еще сильнее увеличивает цену единичного анализа и делает рутинное применение данного метода нецелесообразным [109–118].

Отдельно стоит поговорить о газовой хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения (ГХ-МСВР). Масс-селективные детекторы с тройным квадруполем, времяпролетные детекторы и детекторы с орбитальной ловушкой обладают на порядки большей чувствительностью по сравнению с масс-селективными детекторами низкого разрешения, при этом условия проведения газохроматографического разделения определяемых веществ практически никак не отличаются [119–123]. Ключевым отличием масс-селективных детекторов с высоким разрешением является принцип идентификации и детектирования веществ. Например, в случае использования масс-селективного детектора с 3-мя квадруполями идентификацию проводят не по селективным ионам, а по селективным реакциям, что и позволяет значительно увеличить чувствительность анализа [124–127]. Это определяет высокий интерес в научном сообществе, однако с прикладной точки зрения на сегодняшний день методы масс-спектрометрии высокого разрешения являются несравнимо более дорогими в плане проектирования, изготовления и содержания аналитического оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее распространенными методами идентификации и определения содержания пестицидов являются газовая хроматография, ультра-высокоэффективная и высокоэффективная жидкостная хроматография в сочетании с масс-селективными детекторами высокого и низкого разрешения с экстрагированием пестицидов по методу QuEChERS.

Выбор аналитического метода напрямую зависит от поставленной цели, определяемых пестицидов и объекта анализа. В частности, матричный эффект намного более выражен в методах жидкостной хроматографии, чем газовой. Кроме того, часто применение ВЭЖХ и УВЭЖХ для определения пестицидов требует проведения дериватизации, что повышает цену анализа и затрудняет внедрение принципов зеленой химии. Газовая хроматография лишена таких недостатков. При этом метод масс-спектрометрии низкого

разрешения чаще применяют для мониторинговых исследований, для идентификации большого спектра неизвестных веществ, а применение масс-спектрометрии высокого разрешения более актуально при определении целевых пестицидов с крайне низкими содержаниями определяемых веществ.

Есть основания полагать, что дальнейшее развитие методов извлечения и определения пестицидов будет фокусироваться на повышении чувствительности к отдельным действующим веществам, развитию методик совместного определения пестицидов, увеличению экспрессности анализа и внедрению принципов зеленой химии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами: Федеральный закон № 109-ФЗ (редакция от 10 июня 2023 г.) [принят Государственной думой 19 июля 1997 г. // СПС КонсультантПлюс. Режим доступа: локальный, по договору. Обновление еженедельно.
2. Продовольственная и сельскохозяйственная организации Объединенных Наций [официальный сайт]. Рим. URL: <https://www.fao.org/home/ru> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Всемирная организация здравоохранения: [официальный сайт]. Женева. URL: <https://www.who.int/ru> (дата обращения: 17.11.2023).
4. Andreu V., Picó Y. Determination of pesticides and their degradation products in soil: critical review and comparison of methods // TrAC Trend. Analyt. Chem. 2004. V. 23. № 10–11. P. 772–789.
5. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС): [официальный сайт]. Москва. URL: <https://fedstat.ru/indicator/40540> (дата обращения: 23.11.2023).
6. Захаренко В.А. Особенности развития рынка пестицидов в России // Защита и карантин раст. 2020. № 2. С. 34–36.
7. Зинченко В.А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность. М.: КолосС, 2012. 127 с.
8. Damak M., Hyder M.N., Varanasi K.K. Enhancing droplet deposition through in-situ precipitation // Nat. Commun. 2016. V. 7. № 1. P. 125–130.
9. Xiang Y. Controlling pesticide loss through nanonetworks // ACS Sust. Chem. Engin. 2014. V. 2. № 4. P. 918–924.
10. Su H. Tackling pesticide overusing through foliar deposition and retention: Frontiers and challenges // Adv. Agrochem. 2023. V. 2. № 4. P. 298–305.
11. Specht W., Pelz S., Gilsbach W. Gas-chromatographic determination of pesticide residues after clean-up by gel-permeation chromatography and mini-silica gel-column chromatography: 6. Communication: Replacement of dichloromethane by ethyl acetate/cyclohexane in liquid-liquid partition and simplified conditions for extraction and liquid-liquid partition // Fresen. J. Analyt. Chem. 1995. V. 353. P. 183–190.
12. Sannino A., Bolzoni L., Bandini M. Application of liquid chromatography with electrospray tandem mass spectrometry to the determination of a new generation of pesticides in processed fruits and vegetables // J. Chromatogr. 2004. V. 1036. № 2. P. 161–169.
13. Li Y., Yuan T. Detection of pyrethroid pesticide residues in concentrate juice // Chin. J. Health Lab. Technol. 2008. V. 18. P. 1774–1775.
14. Cabras P. Fenhexamid residues in grapes and wine // Food Addit. Contam. 2001. V. 18. № 7. P. 625–629.
15. Rezaee M. Determination of organic compounds in water using dispersive liquid-liquid microextraction // J. Chromatogr. 2006. V. 1116. №. 1–2. P. 1–9.
16. Min Shin J. Comparison of QuEChERS and Liquid-Liquid extraction methods for the simultaneous analysis of pesticide residues using LC-MS/MS // Food Control. 2022. V. 141. P. 109202.
17. Дмитриенко С.Г. Дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция органических соединений // Журн. аналит. хим. 2020. Т. 75. № 10. С. 867–884.
18. Regueiro J. Ultrasound-assisted emulsification-microextraction of emergent contaminants and pesticides in environmental waters // J. Chromatogr. 2008. V. 1190. № 1–2. P. 27–38.
19. Seebunrueng K., Santaladchaiyakit Y., Srijaranai S. Vortex-assisted low density solvent based demulsified dispersive liquid-liquid microextraction and high-performance liquid chromatography for the determination of organophosphorus pesticides in water samples // Chemosphere. 2014. V. 103. P. 51–58.
20. Zhou Q. Ultrasound-enhanced air-assisted liquid-liquid microextraction for the UPLC determination of organophosphorus pesticides in river water // Microchem. J. 2022. V. 183. P. 108046.
21. Torbati M. Development of microwave-assisted liquid-liquid extraction combined with lighter than water in syringe dispersive liquid-liquid microextraction using deep eutectic solvents: Application in extraction of some herbicides from wheat // Microchem. J. 2019. V. 147. P. 1103–1108.
22. Ya-Li W. Benzyl functionalized ionic liquid as new extraction solvent of dispersive liquid-liquid microextraction for enrichment of organophosphorus pesticides and aromatic compounds // Chin. J. Analyt. Chem. 2016. V. 44. № 6. P. 942–949.
23. Caldas S.S. Multi-residue method for determination of 58 pesticides, pharmaceuticals and personal care products in water using solvent demulsification dispersive liquid-liquid microextraction combined

- with liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *Talanta*. 2016. V. 146. P. 676–688.
24. *Jeannot M.A., Cantwell F.F.* Mass transfer characteristics of solvent extraction into a single drop at the tip of a syringe needle // *Analyt. Chem.* 1997. V. 69. № 2. P. 235–239.
25. *Amvrazi E.G., Tsiropoulos N.G.* Application of single-drop microextraction coupled with gas chromatography for the determination of multiclass pesticides in vegetables with nitrogen phosphorus and electron capture detection // *J. Chromatograp.* 2009. V. 1216. № 14. P. 2789–2797.
26. *Tang S.* Single-drop microextraction // *TrAC Trend. Analyt. Chem.* 2018. V. 108. P. 306–313.
27. *Zhang M.* Mixed liquids for single-drop microextraction of organochlorine pesticides in vegetables // *Talanta*. 2008. V. 74. № 4. P. 599–604.
28. *Wu L.* Dynamic microwave-assisted extraction on-line coupled with single drop microextraction of organophosphorus pesticides in tea samples // *J. Chromatograp.* 2015. V. 1407. P. 42–51.
29. *Farina Y.* Determination of pesticide residues in leafy vegetables at parts per billion levels by a chemometric study using GC-ECD in Cameron Highlands, Malaysia // *Food Chem.* 2017. V. 224. P. 55–61.
30. *Katsumata H.* Preconcentration of diazinon using multiwalled carbon nanotubes as solid-phase extraction adsorbents // *Microchem. J.* 2008. V. 88. № 1. P. 82–86.
31. *Liu Y.* Magnetic porous carbon derived from a bimetallic metal-organic framework for magnetic solid-phase extraction of organochlorine pesticides from drinking and environmental water samples // *J. Chromatograp.* 2017. V. 1479. P. 55–61.
32. *Barker S.A., Long A.R., Short C.R.* Isolation of drug residues from tissues by solid phase dispersion // *J. Chromatograp.* 1989. V. 475. № 2. P. 353–361.
33. *Wang Y., Xiao L., Cheng M.* Determination of phenylureas herbicides in food stuffs based on matrix solid-phase dispersion extraction and capillary electrophoresis with electrochemiluminescence detection // *J. Chromatograp.* 2011. V. 1218. № 50. P. 9115–9119.
34. *Hu Y.* Simultaneous determination of phenylurea herbicides in yam by capillary electrophoresis with electrochemiluminescence detection // *J. Chromatograp.* 2015. V. 986. P. 143–148.
35. *Schenck F.J., Wagner R.* Screening procedure for organochlorine and organophosphorus pesticide residues in milk using matrix solid phase dispersion (MSPD) extraction and gas chromatographic determination // *Food Addit. Contam.* 1995. V. 12. № 4. P. 535–541.
36. *Arthur C.L., Pawliszyn J.* Solid phase microextraction with thermal desorption using fused silica optical fibers // *Analyt. Chem.* 1990. V. 62. № 19. P. 2145–2148.
37. *Pang L.* Trace determination of organophosphate esters in environmental water samples with an ionogel-based nanoconfined ionic liquid fiber coating for solid-phase microextraction with gas chromatography and flame photometric detection // *J. Separat. Sci.* 2016. V. 39. № 22. P. 4415–4421.
38. *Yang Y.* An ultrastable 2D covalent organic framework coating for headspace solid-phase microextraction of organochlorine pesticides in environmental water // *J. Hazard. Mater.* 2023. V. 452. P. 131–148.
39. *Valenzuela E.F.* A new carbon nanomaterial solid-phase microextraction to pre-concentrate and extract pesticides in environmental water // *Talanta*. 2020. V. 217. P. 121–131.
40. *Anastassiades M.* Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce // *J. AOAC Inter.* 2003. V. 86. № 2. P. 412–431.
41. *Han L.* Evaluation of a recent product to remove lipids and other matrix co-extractives in the analysis of pesticide residues and environmental contaminants in foods // *J. Chromatograp.* 2016. V. 1449. P. 17–29.
42. *Tette P.A.S.* Multiclass method for pesticides quantification in honey by means of modified QuEChERS and UHPLC-MS/MS // *Food Chem.* 2016. V. 211. P. 130–139.
43. *Bernardi G.* An effective method for pesticide residues determination in tobacco by GC-MS/MS and UHPLC-MS/MS employing acetonitrile extraction with low-temperature precipitation and d-SPE clean-up // *Talanta*. 2016. V. 161. P. 40–47.
44. *Dankyi E.* Application of the QuEChERS procedure and LC-MS/MS for the assessment of neonicotinoid insecticide residues in cocoa beans and shells // *J. Food Compos. Anal.* 2015. V. 44. P. 149–157.
45. *He Z.* Multiresidue analysis of over 200 pesticides in cereals using a QuEChERS and gas chromatography-tandem mass spectrometry-based method // *Food Chem.* 2015. V. 169. P. 372–380.
46. *Golge O., Koluman A., Kabak B.* Validation of a modified QuEChERS method for the determination of 167 pesticides in milk and milk products by LC-MS/MS // *Food Analyt. Method.* 2018. V. 11. № 4. P. 1122–1148.
47. *Zheng W.* Development and validation of modified QuEChERS method coupled with LC-MS/MS for simultaneous determination of cymiazole, fipronil, coumaphos, fluvalinate, amitraz, and its metabolite in various types of honey and royal jelly // *J. Chromatograp.* 2018. V. 1072. P. 60–69.
48. *Herrmann S.S., Poulsen M.E.* Clean-up of cereal extracts for gas chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry pesticide residues analysis using primary secondary amine and C18 // *J. Chromatograp.* 2015. V. 1423. P. 47–53.

49. *Rejczak T., Tuzimski T.* A review of recent developments and trends in the QuEChERS sample preparation approach // *Open Chem.* 2015. V. 13. № 1. P. 980–1010.
50. *Vidal J.L.M.* Determination of pesticide transformation products: A review of extraction and detection methods // *J. Chromatograph.* 2009. V. 1216. № 40. P. 6767–6788.
51. *Andrade G.C.R.M.* Liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry and dynamic multiple reaction monitoring method for determining multiple pesticide residues in tomato // *Food Chem.* 2015. V. 175. P. 57–65.
52. *Han Y.* Simultaneous determination of 70 pesticide residues in leek, leaf lettuce and garland chrysanthemum using modified QuEChERS method with multi-walled carbon nanotubes as reversed-dispersive solid-phase extraction materials // *J. Chromatograph.* 2015. V. 1005. P. 56–64.
53. *Sinha S.N., Vasudev K., Rao M.V.V.* Quantification of organophosphate insecticides and herbicides in vegetable samples using the “Quick Easy Cheap Effective Rugged and Safe” (QuEChERS) method and a high-performance liquid chromatography-electrospray ionization-mass spectrometry (LC-MS/MS) technique // *Food Chem.* 2012. V. 132. № 3. P. 1574–1584.
54. *Mello D.C.* Pesticide residues in dry herbs used for tea preparation by UHPLC-MS/MS: Method validation and analysis // *J. Food Compos. Anal.* 2024. V. 125. P. 105–117.
55. *Wu X., Ding Z.* Evaluation of matrix effects for pesticide residue analysis by QuEChERS coupled with UHPLC-MS/MS in complex herbal matrix // *Food Chem.* 2023. V. 405. P. 134–155.
56. *Morsi R.* Detection of 11 carbamate pesticide residues in raw and pasteurized camel milk samples using UHPLC-MS/MS: Method development, method validation, and health risk assessment // *J. Dairy Sci.* 2023.
57. *Dong Y.* Simultaneous detection of pesticides and pharmaceuticals in three types of bio-based fertilizers by an improved QuEChERS method coupled with UHPLC-q-ToF-MS/MS // *J. Hazard. Mater.* 2023. V. 458. P. 131–142.
58. *Afffy A.M.R.* Multiresidue method of analysis for determination of 150 pesticides in grapes using quick and easy method (QuEChERS) and LC-MS/MS determination // *J. Food Agric. Environ.* 2010. V. 8. № 2. P. 602–606.
59. *Ghoniem I.R., Attallah E.R., Abo-Aly M.M.* Determination of acidic herbicides in fruits and vegetables using liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) // *Inter. J. Environ. Analyt. Chem.* 2017. V. 97. № 4. P. 301–312.
60. *Kostelac D., Anastassiades M.* QuEChERS validation method for acidic pesticides. Valenda, Spain: CRL Workshop, 2007. 34 p.
61. *Steinborn A.* Development of a QuEChERS-based method for the simultaneous determination of acidic pesticides, their esters, and conjugates following alkaline hydrolysis // *J. Agricult. Food Chem.* 2017. V. 65. № 6. P. 1296–1305.
62. *Vázquez P.P.* Large multiresidue analysis of pesticides in edible vegetable oils by using efficient solid-phase extraction sorbents based on quick, easy, cheap, effective, rugged and safe methodology followed by gas chromatography-tandem mass spectrometry // *J. Chromatograph.* 2016. V. 1463. P. 20–31.
63. *Xu X.* Determination of methenamine residues in edible animal tissues by HPLC-MS/MS using a modified QuEChERS method: Validation and pilot survey in actual samples // *Food Control.* 2016. V. 61. P. 99–104.
64. *Ferreira J.A.* Determination of pesticides in coconut (*Cocos nucifera* Linn.) water and pulp using modified QuEChERS and LC-MS/MS // *Food Chem.* 2016. V. 213. P. 616–624.
65. *He Z.* Multiresidue analysis of over 200 pesticides in cereals using a QuEChERS and gas chromatography-tandem mass spectrometry-based method // *Food Chem.* 2015. V. 169. P. 372–380.
66. *Lee Y.J.* Detection of three herbicide, and one metabolite, residues in brown rice and rice straw using various versions of the QuEChERS method and liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *Food Chem.* 2016. V. 210. P. 442–450.
67. *Kardani F.* Determination of 323 pesticide residues in Iran’s cereal by GC-MS and HPLC-UV combined with QuEChERS extraction and mixed-mode SPE clean-up method // *J. Food Compos. Anal.* 2023. V. 124. P. 105–120.
68. *Fuke C.* Analysis of paraquat, diquat and two diquat metabolites in biological materials by high-performance liquid chromatography // *Legal Med.* 2002. V. 4. № 3. P. 156–163.
69. *Amini S.* PVA/Stevia/MIL-88A@ AuNPs composite nanofibers as a novel sorbent for simultaneous extraction of eight agricultural pesticides in food and vegetable samples followed by HPLC-UV analysis // *Food Chem.* 2022. V. 386. P. 132–144.
70. *Ran J.* Cucurbit [7] uril as a matrix solid-phase dispersion for the extraction of quaternary ammonium pesticides from vegetables and their determination using HPLC-UV // *Food Chem.* 2021. V. 350. P. 129–136.
71. *Heidari H., Razmi H.* Multi-response optimization of magnetic solid phase extraction based on carbon coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles using desirability function approach for the determination of the organophosphorus pesticides in aquatic samples by HPLC-UV // *Talanta.* 2012. V. 99. P. 13–21.
72. *Rejczak T., Tuzimski T.* QuEChERS-based extraction with dispersive solid phase extraction clean-up using PSA and ZrO<sub>2</sub>-based sorbents for determination of

- pesticides in bovine milk samples by HPLC-DAD // Food Chem. 2017. V. 217. P. 225–233.
73. *Yetim N.K.* Preparation of AChE immobilized microspheres containing thiophene and furan for the determination of pesticides by the HPLC-DAD method // J. Mol. Struct. 2020. V. 1222. P. 128–131.
  74. *Watanabe E.* Aqueous acetonitrile extraction for pesticide residue analysis in agricultural products with HPLC-DAD // Food Chem. 2014. V. 154. P. 7–12.
  75. *Xiao Z.* Polydimethylsiloxane/metal-organic frameworks coated stir bar sorptive extraction coupled to gas chromatography-flame photometric detection for the determination of organophosphorus pesticides in environmental water samples // Talanta. 2016. V. 156. P. 126–133.
  76. *Blankson G.K.* Contamination levels of organophosphorus and synthetic pyrethroid pesticides in vegetables marketed in Accra, Ghana // Food Control. 2016. V. 68. P. 174–180.
  77. *Salemi A.* Ultrasonic assisted headspace single drop micro-extraction and gas chromatography with nitrogen-phosphorus detector for determination of organophosphorus pesticides in soil // Analyt. Chim. Acta. 2013. V. 769. P. 121–126.
  78. *Mahpishanian S., Sereshti H., Baghdadi M.* Superparamagnetic core-shells anchored onto graphene oxide grafted with phenylethyl amine as a nano-adsorbent for extraction and enrichment of organophosphorus pesticides from fruit, vegetable and water samples // J. Chromatogr. 2015. V. 1406. P. 48–58.
  79. *Farajzadeh M.A., Mogaddam M.R.A.* Acid-base reaction-based dispersive liquid-liquid microextraction method for extraction of three classes of pesticides from fruit juice samples // J. Chromatogr. 2016. V. 1431. P. 8–16.
  80. *Moawed E.A., Radwan A.M.* Application of acid modified polyurethane foam surface for detection and removing of organochlorine pesticides from wastewater // J. Chromatogr. 2017. V. 1044. P. 95–102.
  81. *Nodeh H.R.* New magnetic graphene-based inorganic-organic sol-gel hybrid nanocomposite for simultaneous analysis of polar and non-polar organophosphorus pesticides from water samples using solid-phase extraction // Chemosphere. 2017. V. 166. P. 21–30.
  82. *Shamsipur M., Yazdanfar N., Ghambarian M.* Combination of solid-phase extraction with dispersive liquid-liquid microextraction followed by GC-MS for determination of pesticide residues from water, milk, honey and fruit juice // Food Chem. 2016. V. 204. P. 289–297.
  83. *Liu J.* Comparison of two extraction methods for the determination of 135 pesticides in *Corydalis rhizoma*, *Chuanxiong rhizoma* and *Angelicae sinensis radix* by liquid chromatography-triple quadrupole-mass spectrometry. Application to the roots and rhizomes of Chinese herbal medicines // J. Chromatogr. 2016. V. 1017. P. 233–240.
  84. *Montory M.* First report on organochlorine pesticides in water in a highly productive agro-industrial basin of the Central Valley, Chile // Chemosphere. 2017. V. 174. P. 148–156.
  85. *Zhang J.*  $\beta$ -cyclodextrin functionalized meso-/macroporous magnetic titanium dioxide adsorbent as extraction material combined with gas chromatography-mass spectrometry for the detection of chlorobenzenes in soil samples // J. Chromatogr. 2015. V. 1401. P. 24–32.
  86. *Lu Y., Zhu Y.* Determination of chlorobenzenes in textiles by pressurized hot water extraction followed by vortex-assisted liquid-liquid microextraction and gas chromatography-mass spectrometry // J. Chromatogr. 2013. V. 1319. P. 27–34.
  87. *Bulgurcuoğlu A.E.* Development of a switchable solvent liquid phase extraction method for the determination of chlorthiamid, ethyl parathion, penconazole and fludioxonil pesticides in well, tap and lake water samples by gas chromatography mass spectrometry // Microchem. J. 2021. V. 168. P. 106–112.
  88. *Kaur R.* Rapid monitoring of organochlorine pesticide residues in various fruit juices and water samples using fabric phase sorptive extraction and gas chromatography-mass spectrometry // Molecules. 2019. V. 24. № 6. P. 10–13.
  89. *Wondimu K.T., Geletu A.K.* Residue analysis of selected organophosphorus and organochlorine pesticides in commercial tomato fruits by gas chromatography mass spectrometry // Heliyon. 2023. V. 9. № 3. P. 43–49.
  90. *Yasien S.* Quantification of multi-class pesticides in stomach contents and milk by gas chromatography-mass spectrometry with liquid extraction method // Arab. J. Chem. 2022. V. 15. № 7. P. 103937.
  91. *Грибанов Е.Н., Оскотская Э.Р., Саунина И.В.* Хромато-масс-спектрометрическое определение пестицидов различных классов в растительных объектах // Завод. лаб. Диагностика мат-лов. 2017. Т. 83. № 5. С. 5–8.
  92. *Тремасова М., Борисова Т.* Определение пестицидов: решения Shimadzu // Аналитика. 2016. № 2. С. 38–53.
  93. *Фицев И.М., Шлямина О.В., Сайфутдинов А.М., Макаева А.Р.* Пробоподготовка способом QuEChERS при определении пестицидов методом хромато-масс-спектрометрии // Фундаментальные научные исследования как фактор обеспечения конкурентоспособности общества и государства: сб. научн. тр. по мат-лам Международ. научн.-практ. конф., Белгород, 10 апреля 2020 г. Белгород: ООО “Агентство перспективных научных исследований”, 2020. С. 6–9.
  94. *Амелин В.Г., Никешина Т.Б., Третьяков А.В.* Идентификация и определение пестицидов и полициклических ароматических углеводородов в воде и пищевых

- продуктах методом хромато-масс-спектрометрии // Журн. аналит. хим. 2011. Т. 66. № 10. С. 1036–1041.
95. Андрияшина Т.В., Саратовских Е.А., Чепегин И.В., Чиждова М.А. Исследование содержания техногенных загрязняющих веществ в почвах Орловской области // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 4. С. 67–72.
  96. Горшкова М.П., Андреева М.А., Киселева Е.М. Мониторинг пестицидов в продукции растительного происхождения // Санитарно-эпидемиологическое благополучие населения и защита прав потребителей: региональные аспекты. Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня образования гос. сан.-эпид. службы России, Иркутск, 23 сентября 2022 г. Иркутск: ООО Типография “ИРКУТ”, 2022. Р. 49–54.
  97. Мухамметшина А.Г., Рахметова Э.Р., Мухарлямова А.З. Мониторинг остаточных количеств пестицидов и микотоксинов в зерновых культурах // Наука, технологии, кадры – основы достижений прорывных результатов в АПК: Сб. научн.-практ. мат-лов Международ. научн.-практ. конф., Казань, 26–27 мая 2021 г. Вып. XV. Ч. 2. Казань: Татар. ин-т переподготовки кадров агробизнеса, 2021. Р. 77–85.
  98. Селихова Н.Ю., Кургачев Д.А., Понарин Н.В. Пат. № 2806370 С1 РФ, МПК G01N 33/483, G01N 30/04. Способ одновременного количественного определения стойких хлорорганических пестицидов в шерсти животных методом газовой хромато-масс-спектрометрии: № 2022133128. Заявл. 16.12.2022; опубл. 31.10.2023.
  99. Куш И.В., Удавдиев Д.И., Баиров А.Л. Пестициды в пчелином меде и продуктах пчеловодства // Вет. врач. 2023. № 2. С. 17–22.
  100. Оскотская Э.Р., Грибанов Е.Н., Саунина И.В. Очистка экстрактов проб зерновых культур алюмосиликатом при определении пестицидов методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием // Журн. аналит. хим. 2017. Т. 72. № 2. С. 170–176.
  101. Губин А.Р., Суханов П.Т., Кушнир А.А. Применение магнитных молекулярно импринтированных полимеров для онлайн динамического концентрирования 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и ее последующего определения в почве // Хим. безопасность. 2023. Т. 7. № 1. С. 128–147.
  102. ПНД Ф 16.1:2.2:23:3.61-09 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых долей хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах почв, донных отложений, осадков сточных вод, отходов производства и потребления газохроматографическим методом с масс-селективным детектированием: природоохранный нормативный документ федеративный: изд. офиц.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия от 20 октября 2015 г. Дата введения 2015-11-13. М., 2015. 32 с.
  103. СТБ EN 15662-2017. Продукция пищевая растительного происхождения. Определение остатков пестицидов с применением ГХ-МС и/или ЖХ-МС/МС после экстракции/разделения ацетонитрилом и очистки с применением дисперсионной ТФЭ. Метод QuEChERS. М., 2017. 94 с.
  104. ПНД Ф 14.1:2:4.212-05 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) газохроматографическим методом в пробах питьевых, природных и сточных водах: природоохранный нормативный документ федеративный: ФБУ “ФЦАО” от 1 августа 2014 г. Дата введения 2018-04-18. М., 2014. 35 с.
  105. del Castillo M.L.R. Evaluation of pesticide residue contents in fruit juice by solid-phase microextraction and multidimensional gas chromatography coupled with mass spectrometry // Talanta. 2012. V. 89. P. 77–83.
  106. Nguyen T.D., Lee M.H., Lee G.H. Rapid determination of 95 pesticides in soybean oil using liquid-liquid extraction followed by centrifugation, freezing and dispersive solid phase extraction as cleanup steps and gas chromatography with mass spectrometric detection // Microchem. J. 2010. V. 95. № 1. P. 113–119.
  107. Hassan J. Rapid and simple low density miniaturized homogeneous liquid-liquid extraction and gas chromatography/mass spectrometric determination of pesticide residues in sediment // J. Hazard. Mater. 2010. V. 184. № 1–3. P. 869–871.
  108. Machado I. Determination of pesticide residues in globe artichoke leaves and fruits by GC-MS and LC-MS/MS using the same QuEChERS procedure // Food Chem. 2017. V. 227. P. 227–236.
  109. Silva M.G.D. Simultaneous determination of eight pesticide residues in coconut using MSPD and GC/MS // Talanta. 2008. V. 76. № 3. P. 680–684.
  110. Pico Y., Alfarhan A.H., Barcelo D. How recent innovations in gas chromatography-mass spectrometry have improved pesticide residue determination: An alternative technique to be in your radar // TrAC Trend. Anal. Chem. 2020. V. 122. P. 115–120.
  111. Castanheiro A. Leaf-deposited semi-volatile organic compounds (SVOCs): An exploratory study using GCxGC-TOFMS on leaf washing solutions // Chemosphere. 2019. V. 214. P. 103–110.
  112. Dunkle M.N. Quantification of the composition of liquid hydrocarbon streams: Comparing the GC-VUV to DHA and GCxGC // J. Chromatograph. 2019. V. 1587. P. 239–246.
  113. Deore P. Non-target impact of imidacloprid residues on wine aroma characteristics assessed by GCxGC-TOF/MS analysis and its residual transformation in vinification by UHPLC-Orbitrap-MS analysis // Microchem. J. 2024. V. 197. P. 109–134.

114. *Özel M., Göğüş F., Lewis A.C.* Comparison of direct thermal desorption with water distillation and superheated water extraction for the analysis of volatile components of *Rosa damascena* Mill. using GCxGC-TOF/MS // *Analyt. Chim. Acta*. 2006. V. 566. № 2. P. 172–177.
115. *Patel D.* Headspace analysis of E-cigarette fluids using comprehensive two dimensional GCxGC-TOF-MS reveals the presence of volatile and toxic compounds // *J. Pharma. Biomed. Anal.* 2021. V. 196. P. 113–130.
116. *Deore P.* Non-target impact of imidacloprid residues on wine aroma characteristics assessed by GCxGC-TOF/MS analysis and its residual transformation in vinification by UHPLC-Orbitrap-MS analysis // *Microchem. J.* 2023. P. 109–134.
117. *Dunkle M.N.* Quantification of the composition of liquid hydrocarbon streams: Comparing the GC-VUV to DHA and GCxGC // *J. Chromatogr.* 2019. V. 1587. P. 239–246.
118. *Castanheiro A.* Leaf-deposited semi-volatile organic compounds (SVOCs): An exploratory study using GCxGC-TOFMS on leaf washing solutions // *Chemosphere*. 2019. V. 214. P. 103–110.
119. *Уколов А.И., Сорокоумов П.Н., Уколова Е.Р.* Определение дихлофоса, диметоата, хлорпирифоса, фозалона, диазинона и метилпаратиона в крови и моче методом газовой хроматографии с tandemным масс-селективным детектированием // *Аналит. и контроль*. 2014. Т. 18. № 3. С. 280–286.
120. *Li Y.F.* Determination of multiple pesticides in fruits and vegetables using a modified quick, easy, cheap, effective, rugged and safe method with magnetic nanoparticles and gas chromatography tandem mass spectrometry // *J. Chromatogr.* 2014. V. 1361. P. 77–87.
121. *Chou Y.C.* High-efficient screening of pesticide residues in vegetables using gas chromatography/quadrupole time-of-flight (GC/Q-TOF) // *J. Food Compos. Anal.* 2023. P. 105914.
122. *Pang X.* Wide-scope multi-residue analysis of pesticides in beef by gas chromatography coupled with quadrupole Orbitrap mass spectrometry // *Food Chem.* 2023. V. 407. P. 135–171.
123. *Belarbi S.* Comparison of new approach of GC-HRMS (Q-Orbitrap) to GC-MS/MS (triple-quadrupole) in analyzing the pesticide residues and contaminants in complex food matrices // *Food Chem.* 2021. V. 359. P. 129–132.
124. *Ракитский В.Н., Федорова Н.Е.* Безопасность пищевой продукции: современные приемы многокомпонентного определения пестицидов // *Здравоохранение РФ*. 2021. Т. 65. № 4. С. 388–393.
125. *Плешак Е.М., Полянских Е.И., Бельшева Л.Л., Батуревич А.И.* Валидация способа определения хлорорганических пестицидов в зерне и муке методом хромато-масс-спектрометрии с использованием пробоподготовки QuEChERS // *Хим. безопасность*. 2022. Т. 6. № 2. С. 243–257.
126. *Донец М.М., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д.* Хлорорганические соединения в камбалах рода *Hippoglossoides gotsche*, 1835 из дальневосточных морей России // *Морск. биол. журн.* 2020. Т. 5. № 1. С. 29–42.
127. *Амелин В.Г., Никешина Т.Б., Третьяков А.В.* Идентификация стойких органических загрязнителей в поверхностной, грунтовой и питьевой воде методом хромато-масс-спектрометрии // *Вода: хим. и экол.* 2012. № 2(44). С. 68–75.
128. *Maski D., Durairaj D.* Effects of charging voltage, application speed, target height, and orientation upon charged spray deposition on leaf abaxial and adaxial surfaces // *Crop Protect.* 2010. V. 29. № 2. P. 134–141.
129. *Soto D.* Droplet fragmentation using a mesh // *Physic. Rev. Fluids*. 2018. V. 3. № 8. P. 63–82.
130. *Bergeron V.* Controlling droplet deposition with polymer additives // *Nature*. 2000. V. 405. № 6788. P. 772–775.
131. *Song M.* Controlling liquid splash on superhydrophobic surfaces by a vesicle surfactant // *Sci. Adv.* 2017. V. 3. № 3. P. e1602188.
132. *Yuan W.* Natural green-peel orange essential oil enhanced the deposition, absorption and permeation of prochloraz in cucumber // *RSC Adv.* 2019. V. 9. № 35. P. 20395–20401.
133. *Damak M., Hyder M.N., Varanasi K.K.* Enhancing droplet deposition through *in situ* precipitation // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. № 1. P. 12560.
134. *Li Y.* Whole contact line pinning for droplets impacting on a hydrophobic surface due to hydrophilic TiO<sub>2</sub> nanoparticle addition // *Langmuir*. 2021. V. 37. № 22. P. 6673–6680.
135. *Wibowo D.* Sustained release of fipronil insecticide in vitro and *in vivo* from biocompatible silica nanocapsules // *J. Agricult. Food Chem.* 2014. V. 62. № 52. P. 12504–12511.
136. *Zhu H.* Avermectin loaded carboxymethyl cellulose nanoparticles with stimuli-responsive and controlled release properties // *Industr. Crops Prod.* 2020. V. 152. P. 112–117.
137. *Luo J.* Self-assembled degradable nanogels provide foliar affinity and pinning for pesticide delivery by flexibility and adhesiveness adjustment // *ACS nano*. 2021. V. 15. № 9. P. 14598–14609.



## Modern Trends in the Use of Pesticides and Methods for Their Determination in Agricultural Products

A. A. Bragin<sup>a, #</sup>, A. D. Bazyk<sup>b</sup>, N. A. Pavlova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Laboratory of Physico-chemical Analysis, Department for the Implementation of the Project "Innovative feed and feed additives", Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia*

<sup>b</sup>*Department of Biochemistry, Biophysics and Biotechnology, Faculty of Animal Science, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,*

*ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: Bunss16@yandex.ru*

Many active substances of pesticides are dangerous toxicants that can disrupt the stability of natural and agricultural ecosystems and cause irreversible harm to human health when ingested. In addition, from several units to several dozens of new active substances of pesticides and products based on them are developed annually. This determines the critical need to control their use and content in environmental objects, especially in agricultural products. The development of modern chemical analytical methods helps to increase the effectiveness of such control. Improving the methods of extracting pesticides from extremely complex matrices of soils and agricultural products can significantly speed up and reduce the cost of conducting a single analysis, and improving analytical equipment allows to determine the picogram contents of target pesticides or conduct monitoring studies of samples to identify pollutants.

**Keywords:** pesticides, agricultural products, insecticides, herbicides, fungicides, organochlorine pesticides, organophosphorus pesticides, gas chromatography, liquid chromatography, mass spectrometry, QuEChERS sample preparation, solid-phase extraction, dispersive liquid-liquid microextraction.