

ISSN 0136–1694 (Print)  
ISSN 2312-4202 (Online)

**ФГБНУ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА»**

---

# **БЮЛЛЕТЕНЬ**

## **ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА**

### **имени В.В. ДОКУЧАЕВА**

**Выпуск 115**

**Москва**  
**2023**

<https://bulletin.esoil.ru>

ISSN 0136–1694 (Print)  
ISSN 2312-4202 (Online)

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

---

# **Dokuchaev Soil Bulletin**

**(Byulleten Pochvennogo instituta  
imeni V.V. Dokuchaeva)**

**Volume 115**

**Moscow  
2023**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03  
Б 98  
УДК 631.4

**Главный редактор:**  
**Иванов А. Л., академик РАН**

**Заместитель главного редактора:**  
**Савин И. Ю., академик РАН**

**Редакционная коллегия:**

**А-Ксин Джу** (университет Висконсина, США)  
**Когут Б. М.** (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)  
**Монтанарелла Л.** (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, Италия)  
**Розанов А. Б.** (Университет Стелленбош, ЮАР)  
**Тихонович И. А., академик РАН** (Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург)  
**Тот Г.** (Университет Паннонии, Венгрия)  
**Хитров Н. Б.** (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)  
**Чендев Ю. Г.** (Белгородский государственный университет, Белгород)  
**Швиденко А. З.** (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)  
**Шишков Т. А.** (Институт почвоведения им. Н. Пушкирова, Болгария)

**Chief Editor:**  
**A. L. Ivanov, Academician of RAS**

**Deputy Chief Editor:**  
**I. Yu. Savin, Academician of RAS**

**Editorial board:**

**A-Xing Zhu** (University of Wisconsin-Madison, USA)  
**B. M. Kogut** (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)  
**L. Montanarella** (Institute for Environment and Sustainability – European Commission’s Joint Research Centre (IES JRC), Italy)  
**A. B. Rozanov** (Stellenbosh University, Republic of South Africa)  
**I. A. Tikhonovich**, Academician of RAS (Saint Petersburg State University, Russia)  
**G. Toth** (University of Pannonia, Hungary)  
**N. B. Khitrov** (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)  
**Yu. G. Chendev** (Belgorod State University, Russia)  
**A. Z. Shvidenko** (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria)  
**T. A. Shishkov** (Pushkarov Soil Science Institute, Bulgaria)

© ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, 2023 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Структура почвенного покрова и трансформация морфометрических параметров типичных черноземов в технологии прямого посева<br><i>Белобров В.П., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Айдиев А.Я.</i> .....           | 5   |
| Особенности почв природного парка “Щербаковский” Волгоградской области<br><i>Гордиенко О.А., Онистратенко Н.В., Андреева Д.А.</i> .....                                                                 | 32  |
| Несиликатное железо минерально-ассоциированного органического вещества агрочерноземов разной локализации на склоне<br><i>Цомаева Е.В., Артемьева З.С., Засухина Е.С., Варламов Е.Б.</i> ..              | 54  |
| Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука<br><i>Юдина А.В., Фомин Д.С.</i> .....                                                                      | 87  |
| Динамика физических свойств почв и запасов гумуса в засоленных почвах в условиях опустынивания<br><i>Федотова А.В., Умарова А.Б., Шваров А.П., Яковлева Л.В.</i> ..                                     | 107 |
| Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности<br><i>Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г.</i> .....                                               | 129 |
| Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор)<br><i>Семенов М.В., Железова А.Д., Ксенофонтова Н.А., Иванова Е.А., Никитин Д.А.</i> ..... | 160 |
| Продуктивность кукурузы Росс 140 в зависимости от уровня химизации зональных почв республики Татарстан<br><i>Сафиоллин Ф.Н., Хисматуллин М.М., Лукманов А.А., Габитов Р.Х., Яхин И.Ф.</i> .....         | 199 |

## CONTENTS

Soil cover structure and transformation of morphometric parameters of Haplic Chernozems under no-tillage

*Belobrov V.P., Yudin S.A., Ermolaev N.R., Aidiev A.Ya. .... 5*

Features of soils of the natural park “Scherbakovsky” Volgograd region

*Gordienko O.A., Onistratenko N.V., Andreeva D.A. .... 32*

Non-silicate iron in mineral-associated organic matter of agro-chernozems located on different positions on the slope

*Tsomaeva E.V., Artemyeva Z.S., Zasukhina E.S., Varlamov E.B. . 54*

Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound

*Yudina A.V., Fomin D.S. .... 87*

Dynamics of physical properties of soils and humus reserves in salted soils under desertification

*Fedotova A.V., Umarova A.B., Shvarov A.P., Yakovleva L.V. .... 107*

Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state

*Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Grubina P.G. .... 129*

Chicken manure as an organic fertilizer: composting technologies and impact on soil properties (a review),

*Semenov M.V., Zhelezova A.D., Ksenofontova N.A.,  
 Ivanova E.A., Nikitin D.A. .... 160*

Productivity of corn Ross 140 depending on the level of the chemicalization of zonal soils of the republic of Tatarstan,

*Safiollin F.N., Khismatullin M.M., Lukmanov A.A.,  
 Gabitov R.H., Yakhin I.F. .... 199*

УДК 631.472

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-5-31



**Ссылки для цитирования:**

Белобров В.П., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Айдиев А.Я. Структура почвенного покрова и трансформация морфометрических параметров типичных черноземов в технологии прямого посева // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 5-31. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-5-31

**Cite this article as:**

Belobrov V.P., Yudin S.A., Ermolaev N.R., Aidiev A.Ya., Soil cover structure and transformation of morphometric parameters of Haplic Chernozems under no-tillage, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 5-31, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-5-31

## **Структура почвенного покрова и трансформация морфометрических параметров типичных черноземов в технологии прямого посева**

© 2023 г. В. П. Белобров<sup>1\*</sup>, С. А. Юдин<sup>1</sup>, Н. Р. Ермолаев<sup>1</sup>,  
А. Я. Айдиев<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,  
\*e-mail: [belobrovvp@mail.ru](mailto:belobrovvp@mail.ru).

<sup>2</sup>ФГБНУ “Курский ФАНЦ”, “Научно-исследовательский институт  
агропромышленного производства”, Россия,  
305526, Курская обл., Курский р-он, п. Черемушки, д.10  
\*\*e-mail: [kniiapp@mail.ru](mailto:kniiapp@mail.ru).

Поступила в редакцию 10.01.2023, после доработки 19.05.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Анализируются результаты полевого опыта на двух опытных полях (каждое площадью 2,4 га) по использованию в земледелии традиционной технологии и прямого посева (no-till). Диагностические морфометрические параметры типичных черноземов: мощность горизонта А<sub>1</sub>, горизонтов А<sub>1</sub> + АВ и глубина вскипания от 10%-ной НСІ, – показали, что за 8 лет на полях произошли изменения в почвах и

почвенном покрове. Интегральный показатель продуктивности почв – мощность гумусового горизонта – отразил тренд уменьшения и увеличения параметра в структурах почвенного покрова полей с разным составом черноземов на уровне вида почв. Тренд связан как с изменением климата и периодическими, не характерными для региона, засушливыми периодами, так и со сменой традиционной технологии на прямой посев. Выщелоченность профиля черноземов от карбонатов во всех вариантах опыта снизилась, что коррелирует с меняющимися по сезонам года климатическими показателями. Маломощные, высококовскипающие черноземы не требуют известкования. Выявленные изменения статистически не значимы и отражают устойчивость черноземов к вариабельности природных и антропогенных факторов почвообразования. Растительные остатки на поверхности почв при прямом посеве снижают физическое испарение, что способствует аккумуляции влаги в почве. Применение покровных культур в зиму также увеличивает влагозапасы, которые расходуются растениями в летний вегетационный период. Данные о трансформации морфометрических параметров дают возможность вносить временную и пространственную коррекцию в применяемые агротехнические приемы (севооборот, внесение удобрений, применение покровных культур, гербицидов и пестицидов).

**Ключевые слова:** изменчивость типичных черноземов, показатели почв, продуктивность, выщелоченность, карбонатность, классификация почв.

## **Soil cover structure and transformation of morphometric parameters of Haplic Chernozems under no-tillage**

© 2023 V. P. Belobrov<sup>1\*</sup>, S. A. Yudin<sup>1</sup>, N. R. Ermolaev<sup>1</sup>,  
A. Ya. Aidiev<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*e-mail: [belobrovvp@mail.ru](mailto:belobrovvp@mail.ru).*

<sup>2</sup>*Kursk Federal Agrarian Research Center,  
“Research Institute of Agroindustrial Production”,  
10 Cheremushki village, Kursk district 305526, Kursk Oblast,  
Russian Federation,  
\*\*e-mail: [kniiapp@mail.ru](mailto:kniiapp@mail.ru).*

Received 10.01.2023, Revised 19.05.2023, Accepted 27.06.2023

**Abstract:** The results of the field experiment have been analyzed, it was set up on two experimental fields (with an area of 2.4 hectares each), where two different agricultural techniques – traditional and no-till – were applied. Diagnostics of morphometric parameters of typical chernozems such as: the thickness of the A<sub>1</sub> horizon, A<sub>1</sub> + AB horizons and the depth of carbonates reaction with 10% HCl, has shown that some changes in soils and soil cover had occurred in the fields over 8 years. The integral indicator of soil productivity is the thickness of the humus horizon, it demonstrated trends to decrease and increase in the soil cover structure of the experimental fields with different compositions of chernozem subtypes. The trends result from both climate change and periodic dry periods, which are not typical of the region, and from the change of traditional technology to no-till. The carbonates leaching from chernozem profiles in all variants of the experiment decreased, which correlates well with climatic indicators, changing with the seasons of the year. Chernozems with thin humus layer and reacting with HCl close to the surface do not require liming. The revealed changes are not statistically significant, they reflect the resistance of chernozems to the variability of natural and anthropogenic factors of soil formation. Crop residues on the soil surface under no-tillage reduce physical evaporation, which contributes to moisture accumulation in the soil. The use of cover crops in winter also increases the moisture reserves, which are consumed by the plants during the summer growing season. Information on the transformation of morphometric parameters allows making temporal and spatial corrections in the applied agricultural practices (crop rotation, fertilization, the use of cover crops, herbicides and pesticides).

**Keywords:** variability of typical chernozems, soil indicators, soil productivity, leaching, carbonate content, classification of soils.

## ВВЕДЕНИЕ

Трансформация почв остается важным фактором деградации черноземов при их сельскохозяйственном использовании ([Иванов и др., 2013](#); [Лебедева, 2013](#); [Савин и др., 2018](#)). Большинство исследований в этом направлении посвящено изменениям физических, физико-химических и агрохимических свойств черноземов ([Воронин, 2014](#); [Петрова и др., 2015](#); [Власенко, 2016](#); [Иванов и др., 2021](#)), и мало работ по проблемам пространственно-временной трансформации в земледелии морфологических свойств, которые лежат в основе описания профиля, таксономии и качественной оценки почв для возделывания сельскохозяйственных культур

([Лебедева, 2011](#); [Gerasimova, Khitrov, 2016](#)). Научно-производственный опыт по оценке влияния технологий на свойства черноземов указывает на определенную трансформацию основных морфометрических параметров при использовании прямого посева, в котором не применяются обработки, а почва в течение всего года находится под покровом растительных остатков ([Дридигер и др. 2020, 2021](#); [Белобров и др., 2021](#)).

Морфологические свойства черноземов представляют собой в самом простейшем виде совокупность нескольких основных морфометрических параметров: мощность гумусовых и переходных горизонтов, карбонатность по глубине вскипания от 10%-ной HCl, засоленность и оглеение по глубине солевого горизонта и оглеенного профиля ([Классификация, 1977](#); [Хитров и др., 2013](#); [Gerasimova et al., 2016](#); [Левченко и др., 2017](#)), дающих качественно-количественную оценку их продуктивности. Это первая и важнейшая информация, получаемая при описании морфологического профиля чернозема.

Сформулированная многогранным интеллектом и гением В.В. Докучаева наука почвоведение базируется на этих сформированных природой показателях, которые используются при картографировании черноземов в любом масштабе, проведении опытов или отборе проб для лабораторных исследований, и отражают наиболее важные особенности изучаемых почв.

В отечественных классификациях морфометрические параметры разделяют черноземы на видовом уровне ([Классификация..., 1977](#)), агрочерноземы – на уровне типов, подтипов и видов ([Классификация..., 2004](#)). В прикладном земледелии мощность гумусового горизонта, например, входит составной частью во многие индексы, характеризующие почвы с позиций продуктивности, бонитета и кадастра: почвенно-экологический индекс для пахотных почв – ПЭИ и почвенно-агроклиматический – ПАКИ ([Карманов, Булгаков, 2012](#)), в нормативную урожайность – Ун ([Методические..., 2003](#); [ЕГРПР, 2014](#); [Столбовой и др., 2021](#)).

Мощность гумусового горизонта служит интегральным показателем и отражает эффективное и потенциальное плодородие почв ([Столбовой, Гребенников, 2020](#)), а степень карбонатности

выступает в качестве лимитирующего фактора, определяя необходимость известкования северных подтипов черноземов или, напротив, снижения щелочности южных черноземов с помощью ирригации, а также формирование водоустойчивых к эрозии агрегатов и т. д. Мощность почвенного профиля черноземов, его мелкоземистой части до плотных коренных пород, выступает как лимитирующий фактор при выращивании садовых древесных культур и кустарников. В полной мере это относится к засолению, солонцеватости и другим морфологическим свойствам.

Морфометрические параметры целинных почв устойчивы во времени, а если и меняются, то в связи со сменой региональных и глобальных климатических условий, т. е. их трансформация происходит под влиянием внешних факторов почвообразования. Поэтому они не требуют многократных мониторинговых исследований и служат контролем для пахотных аналогов черноземов ([Авдеева, Маркина, 2017](#)).

Пахотные черноземы, по сравнению с целинными, подвержены антропогенной трансформации. Последствия выражаются в различных формах, как прямых, приводящих к деградации свойств почв, так и опосредованных, провоцирующих, например, развитие процессов водной эрозии там, где ее до распашки почв не было. В пахотном фонде страны черноземы составляют по разным данным от 53% ([Иванов и др., 2013](#)) до 66% ([Столбовой, Гребенников, 2020](#)), что делает их не только самым важным объектом в земледелии в России, но и самым охраняемым, поддержание потенциального плодородия которого является приоритетным для всех времен и сменяющихся поколений.

Деградация черноземов усиливается как при применении интенсивных технологий возделывания культур и высоких доз минеральных удобрений для повышения урожайности, так и в результате снижения экологических функций почв в агроландшафте и общего усиления агронагрузки ([Иванов и др., 2013](#)). Трудно ожидать при таких условиях улучшения свойств агрочерноземов, когда продуктивность приближается к биологическому пределу.

Вызванная обработками плоскостная и ручейковая эрозия на плакорных поверхностях рельефа практически не учитывается, считается, что она ежегодно запахивается и ее не существует в

поверхностном гомогенизированном гумусовом горизонте почв. Учет воздействия эрозии фактически начинается при формировании постоянных водотоков и снижении мощности гумусового горизонта, что требует регулярных мониторинговых исследований почвенного покрова, отсутствие которых снижает качество показателей эродированности почв.

В то же время внутрисочвенный микро- и мезорельеф, не выраженный визуально, дренирует поверхность почв, трансформирует агрегатный состав и формирует тальвеги водотоков на уплотненной поверхности плужной подошвы, продолжая разрушительный процесс эрозии. Шлейф пыли за трактором, производящим обработку почв, предельно ярко демонстрирует дефляционные процессы в условиях дефицита атмосферных осадков и засух.

Обработки почв во всех вариантах использования почвообрабатывающих орудий приводят к усилению эрозии. В мире можно найти ряд классических примеров, когда смена технологии земледелия и монокультуры привела к быстрому развитию эрозии. По экономическим соображениям в разное время посевные площади под сахарным тростником сменились на Кубе на овощные культуры, а в Бразилии – на сою. На плантациях сахарного тростника почвы подвержены обработке один раз в пять лет перед посевом, т. е. обработка почв имеет периодический характер. В результате ежегодных обработок под овощные культуры и сою водная эрозия на Кубе и в Бразилии резко усилилась и вынудила вернуться к возделыванию сахарного тростника или смене землепользования на залежь и/или пастбище для сохранения почв от полного уничтожения ([Белобров, 1989](#); [Каллегари, 2021](#)).

Проблема экологизации земледелия ставит задачу снижения деградации почв. Использование системы прямого посева на практике показывает ее эффективность в этом направлении, приводит к восстановлению свойств черноземов ([Борисов и др. 2018](#); [Дри-дигер и др. 2020](#); [Белобров и др. 2020](#); [Дридигер и др., 2021](#)). Морфометрические параметры в опытах практически не учитываются, одним разрезом (типичным) характеризуется в разной степени неоднородный почвенный покров опытных и производственных полей. Во-первых, считается, что профиль черноземов

наиболее консервативный по морфологическим свойствам и устойчив во времени, несмотря на антропогенное воздействие ([Лебедева, 1992](#); [Иванов и др., 2013](#)); а во-вторых, отсутствует система охраны и мониторинга почвенного покрова. Вопрос о трансформации морфометрических параметров в технологии прямого посева и роли этих изменений в продуктивности черноземов остается открытым.

Цель работы состоит в оценке влияния прямого посева на трансформацию во времени и пространстве морфометрических параметров типичных черноземов, структур почвенного покрова, и последствий этих изменений в системе экологизации земледелия и глобального изменения климата.

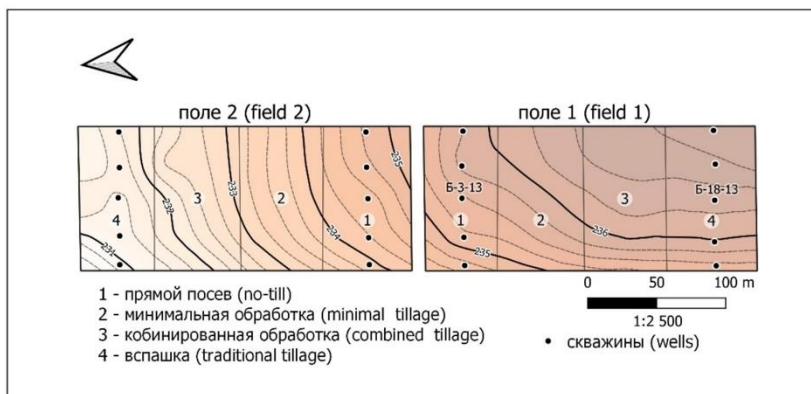
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований являются типичные черноземы (Haplic Chernozems) (IUSS, 2014) водораздельной поверхности стационара Курского ФАНЦ (Курский район, п. Черемушки) с координатами 51°37',71 с. ш. и 36°15',73 в. д. На базе стационара с 2013 г. ведется научно-производственный опыт по оценке влияния прямого посева на продуктивные свойства типичных черноземов, в том числе впервые на морфометрические параметры (мощность гумусовых горизонтов  $A_1$  и  $A_1 + AB$  и глубина вскипания от 10%-ной HCl) в четырех вариантах (отвальная вспашка, комбинированная обработка – чизель + дискование, минимальная обработка – дискование и прямой посев – без обработок почвы). Использовался зерновой севооборот: озимая пшеница – кукуруза – ячмень – горох. Опытные поля имели прямоугольную форму, размером 240 × 100 м с защитными полосами между ними в 3 м и делянками-вариантами 100 × 60 м, развернутыми в пространстве в один ярус.

Рекогносцировочное обследование территории показало соответствие морфометрических данных и морфологических свойств типичным черноземам и структуре почвенного покрова (СПП), характерной для данного региона ([Дайнеко, 1968](#)).

На всех полях до начала эксперимента проведена топографическая съемка (рис. 1) и почвенное картографирование в масштабе 1 : 2 500. Картографирование черноземов велось методом

ручного бурения скважин. На каждом поле заложено по 45 буровых скважин в точках, расположенных по углам прямоугольников размером  $25 \times 30$  м. Из них 10 скважин на каждом поле, которые обозначены на рисунке 1 точками, характеризуют вспашку и прямой посев. Во всех скважинах описаны морфометрические параметры и особенности морфологических свойств профиля (перерывность землероями, характер вскипания, наличие кротовин в гумусовых горизонтах и  $V_{sa}$  и др.).



**Рис 1.** Рельеф полей 1 и 2. Масштаб 1 : 2 500; сплошные горизонталы проведены через 1 м, полугоризонталы – через 25 см.

**Fig 1.** Relief of fields 1 and 2. Scale 1 : 2 500; continuous contour lines (horizontal) are drawn every 1 m, semi-horizontal (dotted lines) – every 25 cm.

Особенность опыта состоит в повторном измерении морфометрических параметров после первой и второй ротаций в тех же точках, что и до начала опыта, в одно и тоже время после сбора урожая очередной культуры до вспашки и посева озимых. Расположение буровых скважин фиксировалось по разметке делянок на прямоугольники с контролем по GPS марки Garmin rino 120. В качестве примера на рисунке 1 точками обозначены скважины на поле 1 с координатами, характеризующие прямой посев и вспашку: Б-3-13 в прямом посеве –  $51^{\circ}37',757$  с. ш. и  $36^{\circ}15',731$  в. д.; Б-18-13 при вспашке –  $51^{\circ}37',663$  с. ш. и  $36^{\circ}15',723$  в. д. Для точ-

ности полученных данных (совместимости по годам измерений) морфометрические параметры на всех полях фиксировались одним и тем же лицом. Погрешность заложения скважин после первой и второй ротации относительно начала опыта составляла не более 25 см. Статистическая обработка данных проведена с помощью непараметрического серийного критерия  $S_{05}$  при уровне значимости 0.05 ([Урбах, 1964](#)) и программы Excel 2016.

В результате данной методики морфометрические параметры были измерены в одних и тех же точках до начала опыта и после второй ротации. По этим данным составлены почвенные карты до начала опыта и спустя 8 лет. Карты характеризуют СПП, что дает основу для оценки влияния разных технологий земледелия на трансформацию морфометрических параметров в пространстве.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт на типичных черноземах имеет свои особенности. Он крупноделяночный ( $60 \times 100$  м), что позволило охватить все разнообразие почв стационарной территории и СПП полей, соблюдая элементы агротехнологии в системе прямого посева ([Кирюшин и др., 2019](#); [Юдин и др., 2019](#)).

Измерения морфометрических параметров типичных черноземов на полях 1 и 2 после второй ротации при сравнении с данными до начала эксперимента дали близкие результаты (табл. 1). Только на поле 1 отмечено уменьшение мощности горизонтов  $A_1 + AB$  на 13 см.

При равном воздействии внешних природных факторов (климат и агротехнологии) трансформация типичных черноземов на полях не однозначна. Наибольшие изменения произошли на поле 1, где снизилась мощность  $A_1 + AB$  на 13 см (табл. 1). На поле 2 изменения минимальны. Вероятно, черноземы полей обладают разной устойчивостью к меняющимся условиям среды, а морфометрические параметры фиксируют связанную с ней трансформацию почв.

Иная картина наблюдается при сравнении традиционной технологии (вспашки) и прямого посева (табл. 2). На поле 1 мощность гумусового горизонта при вспашке и при прямом посеве практически не изменилась, а мощность горизонтов  $A_1 + AB$  сни-

зилась соответственно на 22 и 10 см. Наибольшая трансформация в параметрах выявлена по глубине вскипания. Выщелоченность карбонатного профиля черноземов на поле 1 уменьшилась за 8 лет на 23 см при вспашке и на 14 см при прямом посеве. В обеих технологиях сохранилась общая тенденция снижения выщелоченности, которая в черноземах при прямом посеве выражена слабее.

**Таблица 1.** Морфометрические параметры типичных черноземов полей 1 и 2 до и после второй ротации севооборота

**Table 1.** Morphometric parameters of Haplic Chernozems of fields 1 and 2 before and after the second crop rotation

| Поля<br>n = 45 | Годы,<br>статистические<br>функции* | Мощность (см)  |                     | Вскипание<br>(см) |
|----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
|                |                                     | A <sub>1</sub> | A <sub>1</sub> + AB |                   |
| 1              | Ca (2013/2021)                      | 62/59          | 91/78               | 72/67             |
|                | медиана                             | 65/58          | 90/78               | 68/62             |
|                | максимум                            | 100/88         | 145/110             | 145/125           |
|                | минимум                             | 35/35          | 48/44               | 35/37             |
|                | Со                                  | 17/13          | 21/16               | 28/23             |
|                | Кв                                  | 27/22          | 23/20               | 39/34             |
| 2              | Ca(2014/2022)                       | 51/55          | 106/103             | 70/72             |
|                | медиана                             | 55/57          | 105/105             | 67/63             |
|                | максимум                            | 75/80          | 130/148             | 130/145           |
|                | минимум                             | 27/30          | 70/52               | 27/24             |
|                | Со                                  | 13/11          | 16/19               | 32/37             |
|                | Кв                                  | 25/20          | 15/19               | 46/51             |

**Примечание.** \*здесь и далее в таблицах: Ca – средняя арифметическая; Со – стандартное отклонение; Кв – коэффициент вариации.

**Note.** \*here and below in the tables: Ca – arithmetic mean; Co – standard deviation; Kв – coefficient of variation.

**Таблица 2.** Морфометрические параметры типичных черноземов опытных полей 1 и 2 при использовании технологий “вспашка” и “прямой посев” до и после второй ротации севооборота

**Table 2.** Morphometric parameters of typical chernozems of experimental fields 1 and 2 using the technologies “plowing” and “no-till” before and after the second crop rotation

| Статистические<br>параметры*<br>n = 5 | 2013 г.        |                     |                  | 2021 г.        |                     |                  |
|---------------------------------------|----------------|---------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------|
|                                       | Мощность, см   |                     | Вскипание,<br>см | Мощность, см   |                     | Вскипание,<br>см |
|                                       | A <sub>I</sub> | A <sub>I</sub> + AB |                  | A <sub>I</sub> | A <sub>I</sub> + AB |                  |
| Поле 1 (вспашка/прямой посев)         |                |                     |                  |                |                     |                  |
| Ca                                    | 66/59          | 111/80              | 96/78            | 67/57          | 89/70               | 73/64            |
| медиана                               | 65/58          | 118/81              | 98/75            | 67/57          | 93/70               | 80/59            |
| максимум                              | 78/73          | 125/92              | 118/92           | 80/68          | 96/82               | 105/73           |
| минимум                               | 55/45          | 95/68               | 45/68            | 55/43          | 83/54               | 41/45            |
| Co                                    | 9/11           | 14/9                | 38/9             | 12/7           | 9/24                | 28/18            |
| Kв                                    | 14/19          | 13/11               | 40/12            | 18/12          | 10/34               | 38/28            |
| СК S <sub>0,5</sub>                   | нет            | да                  | нет              | нет            | нет                 | нет              |

**Продолжение Таблицы 2**  
**Table 2 continued**

| Статистические<br>параметры*<br>n = 5 | 2014 г.        |                     |                  | 2022 г.        |                     |                  |
|---------------------------------------|----------------|---------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------|
|                                       | Мощность, см   |                     | Вскипание,<br>см | Мощность, см   |                     | Вскипание,<br>см |
|                                       | A <sub>I</sub> | A <sub>I</sub> + AB |                  | A <sub>I</sub> | A <sub>I</sub> + AB |                  |
| Поле 2 (вспашка/прямой посев)         |                |                     |                  |                |                     |                  |
| Ca                                    | 67/47          | 96/114              | 75/80            | 52/61          | 94/110              | 64/61            |
| медиана                               | 65/40          | 100/125             | 80/65            | 47/52          | 93/117              | 53/50            |
| максимум                              | 75/60          | 125/130             | 120/125          | 73/56          | 118/123             | 112/97           |
| минимум                               | 60/35          | 70/70               | 45/55            | 37/40          | 62/85               | 28/40            |
| Co                                    | 6/11           | 20/25               | 30/28            | 15/7           | 23/15               | 36/24            |
| Kв                                    | 9/23           | 21/22               | 40/35            | 28/13          | 24/14               | 55/39            |
| СК S <sub>0,5</sub>                   | да             | нет                 | нет              | нет            | нет                 | нет              |

**Примечание.** \*СК – серийный критерий S<sub>0.5</sub>; *нет* – означает, что выборки по вспашке и прямому посеву достоверно не различаются, *да* – выборки значимо различаются.

**Note.** \*СК – serial criterion S<sub>0.5</sub>; *нет* – means that the samples from variants “plowing” and “no-till” do not differ significantly, *да* – the samples differ significantly.

Таким образом, морфометрические параметры черноземов поля 1 при сравнении технологий после ротаций достоверно не различаются, но вместе с тем отражают общий для них тренд, указывающий на уменьшение мощности гумусового горизонта  $A_1$  и гумусированного профиля  $A_1 + AB$ . Различия по выщелоченности профиля черноземов между применяемыми технологиями также не значимы, что связано с высокой вариабельностью глубины вскипания, которая при вспашке существенно выше, чем при прямом посеве.

Общий для типичных черноземов тренд снижения выщелоченности почв может быть следствием природных явлений (летних засух в период вегетации), а разница – смены технологий. С 2014 по 2020 гг. на территории стационара было 3 засушливых периода (2014, 2019, 2020 гг.) с годовыми осадками в диапазоне 400–500 мм при среднем количестве в 572.8 мм. По месяцам и годам количество осадков варьирует, причем осадки, выпадающие в виде снега, имеют тенденцию к снижению. Длительность сезонов также меняется, зима стала короче, а лето и осень – длиннее. В 2020 г. лето задержалось на 1.5–2.0 недели, а средняя температура за сезон превысила норму на 2–3° ([Доклад..., 2021](#)).

На пашне глубина промачивания и влагозарядки во все периоды измерений была, по мнению Г.З. Базыкиной и С.В. Овечкина ([2012](#)), меньше, чем в целинной степи. Это результат отсутствия дополнительного накопления снега, глубокого промерзания почв, а также ухудшения структуры, влагоемкости и влагопроницаемости черноземов в результате систематических обработок. В черноземах при прямом посеве наблюдается накопление влаги, по сравнению с почвами при вспашке ([Белобров и др., 2021](#)).

Мощность горизонта  $A_1$  изменяется на поле 2, уменьшается при вспашке и увеличивается при прямом посеве, в то время как мощность горизонтов  $A_1 + AB$  при вспашке и прямом посеве практически осталась без изменений на обоих полях (табл. 2). Это можно связать с большим уклоном поверхности поля 2 (см. рис. 1) и водной эрозией в периоды ливневых осадков. Растительные остатки на поверхности почв при прямом посеве защищают их от эрозии, способствуя глубокому проникновению влаги вниз по профилю.

Таким образом, за две ротации севооборота на опытных полях наблюдается трансформация морфометрических параметров типичных черноземов. Характер изменчивости параметров по полям различается и обусловлен в основном исходным разнообразием морфометрических параметров компонентов СПП. Состав компонентов СПП на полях существенно различается на родовом и видовом уровне классификации ([Классификация..., 1977](#)), оставаясь в рамках подтипа типичных черноземов.

Доминирует на полях род обычных типичных черноземов. На поле 1 их 95.5%, а на поле 2 существенно меньше – 70.2%. Эту разницу на поле 2 покрывает род карбонатных перерытых (23.0%) и род глубоко вскипающих типичных черноземов (6.8%). Степень зоогенной перерытости и выщелоченности почвенного профиля на поле 2 определяют компонентный состав в СПП и разное воздействие на морфометрические параметры почв природных и антропогенных факторов.

СПП полей в целом имеет топогенно-зоогенный генезис, обусловленный мезо- и микрорельефом, а также деятельностью мезо-, макро- и мегафауны, преимущественно землероев (слепышей). В вытянутых ложбинообразных контурах и депрессионных воронках характерно формирование глубококарбонатных и мощных черноземов, создающих дополнительную сложность и контрастность СПП.

Отдельные, округлой формы и небольшие по площади ареалы почв характерны для запаханных микроповышений сурчинно-слепышового микрорельефа с типичной зоогенной перерытостью, маломощным и высококарбонатным профилем черноземов. Зоогенное перераспределение карбонатов и органического вещества в вертикальном профиле черноземов отражается на водно-тепловом режиме почв, изменчивости морфометрических параметров, формировании СПП с более неоднородным почвенным покровом.

Длительное воздействие однотипной традиционной технологии земледелия, включающей обработки почв, стабилизировало морфометрические показатели черноземов на относительно постоянном уровне. Прямой посев изменил эти параметры и в целом состав почвенного покрова, на поле 1 увеличилась, а на поле 2 уменьшилась доля маломощных почв (табл. 3).

Причина таких изменений может быть связана с деятельностью роющих животных, для которых прекращение обработок один из позитивных факторов существования и возобновления жизнедеятельности типичной для целинных зональных почв ([Целищева, Дайнеко, 1967](#)). Такого рода явления мы наблюдали в Ставрополье, где территория бывшего полевого аэродрома после войны была переведена сначала в пашню, затем в 30-летнюю залежь, и на территории одного из аэропортов в черноземной зоне юга России, где никакие земляные работы и вспашка не осуществлялись. На обеих территориях визуально была хорошо заметна деятельность роющих животных особенно по характеру формирования зоогенного микрорельефа.

В структуре карбонатного профиля черноземов за прошедшее время также произошли изменения. На поле 1 увеличилась доля высоко карбонатных почв, и снизился процент встречаемости средне карбонатных почв (табл. 3). В черноземах на поле 2 увеличилась доля карбонатных почв, вскипающих на глубине до 30 см.

Традиционные (бумажные) почвенные карты с изображением изначальных и измененных контуров демонстрируют пространственную трансформацию компонентов СПП под воздействием природных и антропогенных факторов (рис. 2 и 3).

По мощности  $A_1$  и глубине вскипания наибольшие изменения в почвенном покрове произошли на делянке полей, где применялся прямой посев. Трансформация отдельных компонентов СПП обусловила ее внутреннюю изменчивость, связанную со сменой технологии возделывания культур.

Так снижение мощности гумусового горизонта  $A_1$  связано с усадкой почвы в результате отсутствия обработок, переупаковки агрегатов и уплотнения пахотного слоя ([Дридигер и др., 2020](#)). Разуплотнение и стабилизация плотности при прямом посеве зависит от применяемых в севообороте культур, их корневых систем ([Дридигер, 2016](#)). Трансформация отдельных компонентов СПП обусловлена также зоогенным фактором, роль которого после прекращения обработок возрастает.

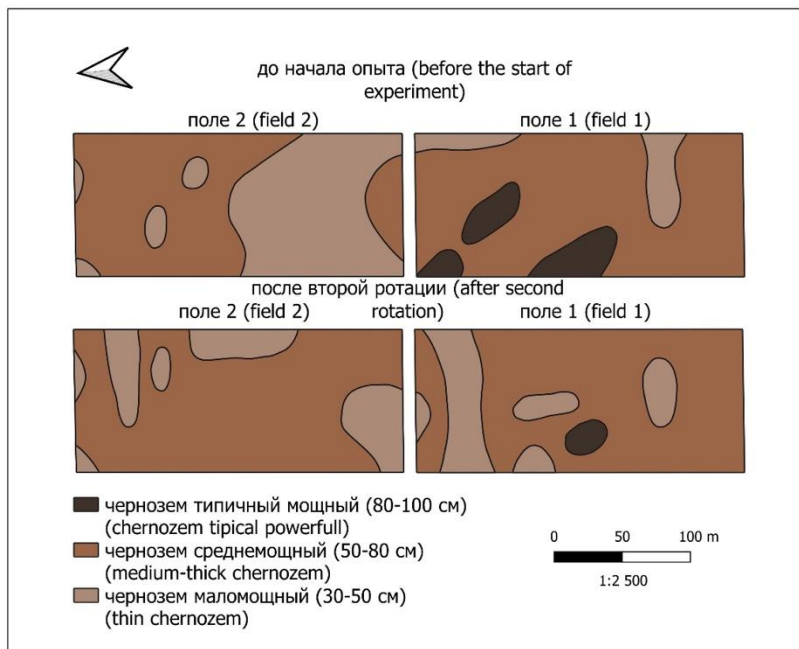
**Таблица 3.** Распределение черноземов (%) по видовым признакам (мощность гумусового горизонта и карбонатность) до начала опыта и после 2-ой ротации на полях 1 и 2

**Table 3.** Distribution of chernozems (%) by species characteristics (thickness of the humus horizon and carbonate content) before the start of the experiment and after the 2nd rotation in fields 1 and 2

| Поля | Год измерений | Черноземы – Ч*                |       |       |                                        |       |       |      |
|------|---------------|-------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------|-------|------|
|      |               | Мощность гумусового горизонта |       |       | Карбонатность (степень выщелоченности) |       |       |      |
|      |               | Чмм                           | Чсм   | Чм    | Чк                                     | Чвк   | Чск   | Чгк  |
| 1    | 2013          | 9.3                           | 78.0  | 12.7  | -                                      | 6.2   | 62.5  | 31.3 |
|      | 2021          | 24.4                          | 73.4  | 2.2   | -                                      | 28.8  | 42.4  | 28.8 |
| +/-  |               | +15.1                         | -4.6  | -10.5 | -                                      | +22.6 | -20.1 | -2.5 |
| 2    | 2014          | 40.0                          | 60.0  | -     | 1.0                                    | 25.3  | 43.3  | 30.4 |
|      | 2022          | 28.8                          | 71.2  | -     | 6.6                                    | 22.2  | 40.1  | 31.1 |
| +/-  |               | -11.2                         | +11.2 | -     | +5.6                                   | -3.1  | -3.2  | +0.7 |

**Примечание.** \*мм – маломощные, см – среднемощные, м – мощные, к – карбонатные, вк – высоко карбонатные, ск – средне карбонатные, гк – глубоко карбонатные ([Классификация..., 2004](#)).

**Note.** \*мм – thin, см – medium thickness, м – thick, к – carbonate, вк – high carbonate, ск – medium carbonate, гк – deep carbonate ([Soil classification..., 2004](#)).



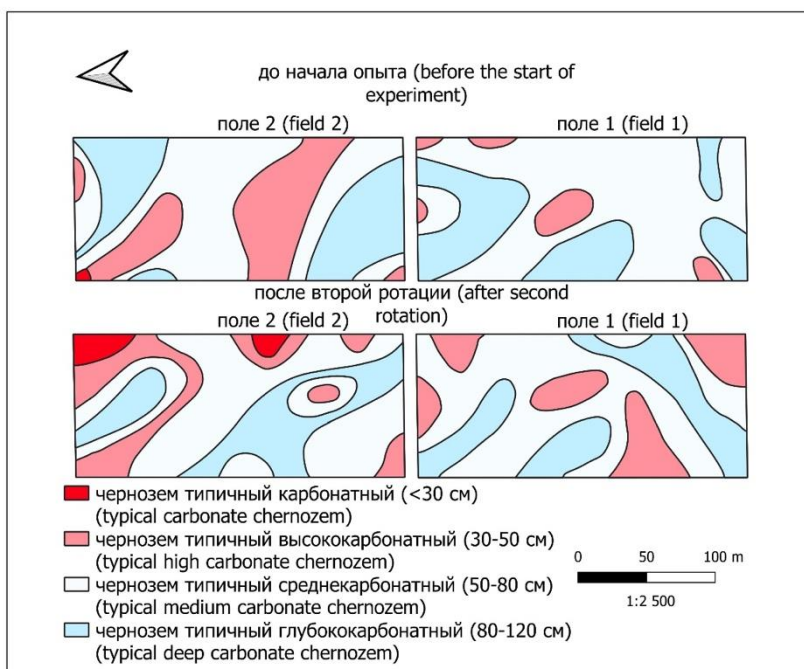
**Рис. 2.** Мощность гумусового горизонта типичных черноземов полей 1 и 2 до начала опыта и после 2-ой ротации.

**Fig. 2.** The thickness of the humus horizon of typical chernozems on fields 1 and 2 before the start of the experiment and after the 2<sup>nd</sup> rotation.

Границы по мощности  $A_1$  между видами почв в классификациях достаточно условны и формализованы (Лебедева, 1992; 2011). В силу этих причин пограничные различия в несколько см определяют разный таксономический ранг черноземов, который фиксируется на почвенной карте определенным ареалом и должен отражать ее качественно-продуктивное состояние в определенный отрезок времени. В этом вопросе мониторинг почвенного покрова наиболее доступными методами (ДЗЗ, БПЛА, георадар, электропроводность и др.) просто необходим для оценки качества почв и их изменений.

По глубине вскипания трансформация СПП по полям после второй ротации хорошо выражена. На фоне увеличения доли вы-

соко карбонатных черноземов изменилась конфигурация контуров как при вспашке, так и при прямом посеве. Это связано с суммарным воздействием внешних природных факторов (летние засухи, рост зимних температур), снижающих выщелоченность почв от карбонатов, и внутренних антропогенных – смена технологии, которая тормозит этот процесс за счет лучшей обеспеченности растений влагой при прямом посеве, отмеченной на этих полях после первой ротации ([Белобров и др., 2021](#)).



**Рис. 3.** Карбонатность типичных черноземов полей 1 и 2 до начала опыта и после 2-ой ротации.

**Fig. 3.** Carbonate content of typical chernozems of fields 1 and 2 before the start of the experiment and after the 2<sup>nd</sup> rotation.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере научно-производственного опыта выявлена

трансформация типичных черноземов разных видов как компонентов СПП, обусловленная воздействием внешних (климатических) и внутренних (смена технологий земледелия) факторов почвообразования. В течение восьми лет почвенный покров на опытных полях изменился за счет трансформации диагностических параметров типичных черноземов, определяющих таксономический уровень почв, их качество и мелиорацию. Эти изменения статистически не значимы и отражают лишь определенный тренд в вариабельности факторов. Тем не менее такой вектор, как показали исследования, определяет направленность процессов почвообразования и необходимость их учета в модернизируемой системе земледелия.

Интегральный показатель продуктивности почв – мощность гумусового горизонта – продемонстрировал тренды уменьшения и увеличения данного параметра в разных СПП, связанные как с изменением климата, периодическими и не характерными для региона засушливыми периодами ([Базыкина, Овечкин, 2012](#)), так и со сменой технологии обработки почв на прямой посев.

Выщелоченность профиля черноземов во всех вариантах опыта снизилась, что коррелирует с меняющимися по сезонам года климатическими показателями. При этом создаются более благоприятные условия для микро- и мезофауны и деятельности роющих животных, что также приводит к вариабельности морфометрических параметров.

Выявленные тенденции в изменении морфометрии типичных черноземов, интенсивно используемых в земледелии, должны приниматься во внимание, учитывая современные риски, связанные с изменением глобального климата. Ряд компонентов СПП не требует известкования. Растительные остатки на поверхности почв снижают физическое испарение, что способствует аккумуляции влаги, и данные по выщелоченности типичных черноземов при прямом посеве и вспашке это подтверждают. Применение покровных культур в зиму тоже увеличивает влагозапасы, которые расходуются растениями в летний вегетационный период.

Необходимость мониторинга морфометрических параметров типичных черноземов в современном земледелии неоднозначна. С одной стороны, необходим контроль за качеством почв на класси-

фикационном уровне для реестра почвенных ресурсов страны разных рангов и масштабов, с другой – достижения селекции и агрохимии могут перекрывать изменения в морфометрии почв.

С точки зрения сохранения продуктивных свойств типичных черноземов, данные о трансформации морфометрических параметров дают возможность вносить временную и пространственную коррекцию в агроприемы (севооборот, внесение удобрений, применение покровных культур, гербицидов и пестицидов). При прямом посеве улучшается экологическое состояние агроландшафтов, обеспечивается защита почв от водной эрозии, восстанавливаются деградированные свойства почв, расширяются социально-экономические функции типичных черноземов. Все эти изменения фиксируют морфологические свойства почв, мониторинг трансформации которых предпочтителен с применением современных дистанционных методов оценки качества почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г. Эволюция пахотных черноземов Курской области / Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Воронеж: “Научная книга”, 2017. С. 72–76.
2. Базыкина Г.С., Овечкин С.В. Миграционно-мицелярные черноземы Курской области в климатических и биосферных циклах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012. Вып. 70. С. 3–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-3-18).
3. Белобров В.П. Структура почвенного покрова гумидных и аридных областей субтропиков и тропиков: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 1989. 48 с.
4. Белобров В.П., Юдин С.А., Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Юдина А.В., Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Клюев Н.Н., Замотаев И.В., Ермолаев Н.Р., Иванов А.Л., Холодов В.А. Изменение физических свойств черноземов при прямом посеве // Почвоведение. 2020. № 7. С. 880–890.
5. Белобров В.П., Дридигер В.К., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р. К вопросу о диагностике и защите почв от дефляции в Ставропольском крае // Аграрный вестник Урала. 2021. № 02(205). С. 12–23.
6. Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Ю., Ермолаев Н.Р., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Борисочкина Т.И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный. Прямой посев, Курская область. Опыт, ротация 1.1. / Гл. ред. Иванов А.Л. М.: ГЕОС, 2021. 127 с.

7. *Борисов Б.А., Байбеков Р.Ф., Рогожин Д.О., Ефимов О.Е.* Изменение показателей состояния органического вещества и физических свойств чернозема южного при переходе от традиционной к нулевой обработке // Земледелие. 2018. № 8. С. 14–116.
8. *Власенко А.Н., Власенко Н.Г.* Влияние технологии No-till на содержание питательных элементов в черноземе выщелоченном лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2016. № 3. С. 17–19.
9. *Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Кудашкин П.И.* Изменение показателей плодородия выщелоченного чернозема лесостепи Приобья при использовании технологии No-till // Агрохимия. 2019. № 12. С. 16–21.
10. *Воронин А.Н.* Влияние различных систем обработки почвы на динамику содержания подвижного фосфора в черноземе типичном // Агрохимия. 2014. № 5. С. 32–37.
11. *Дайнеко Е.К.* Структура почвенного покрова Центрально-Черноземного заповедника имени В.В. Алехина и его окрестностей // Химия, генезис и картография почв. М.: Наука, 1968. С. 165–170.
12. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Курской области в 2020 году. Курск, 2021. 214 с.
13. *Дридигер В.К.* Практические рекомендации по освоению технологии возделывания сельскохозяйственных культур без обработки почвы в засушливой зоне Ставропольского края. Ставрополь: СНИИСХ, 2016. 80 с.
14. *Дридигер В.К., Иванов А.Л., Белобров В. П., Кутовая О.Л.* Восстановление свойств почв в технологии прямого посева // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1111–1120.
15. *Дридигер В.К., Белобров В.П., Антонов С.А., Юдин С.А., Гаджумаров Р.Г., Лиходиевская С.А., Ермолаев Н.Р.* No-till: эффективная защита почв от эрозии / Ресурсосберегающее земледелие. 2021. № 49(01). С. 39–45.
16. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
17. *Иванов А.Л., Лебедева И.И., Гребенников А.М.* Факторы и условия антропогенной трансформации черноземов, методология изучения эволюции почвообразования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. № 72. С. 26–46. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-26-46](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46).
18. *Иванов А. Л., Кулинцев В. В., Дридигер В. К., Белобров В.П.* О целесообразности освоения системы прямого посева на черноземах России / Достижения науки и техники АПК. 2021. № 4. Т. 35. С. 8–16.

19. *Каллегары А.* Устойчивое сельское хозяйство базируется на технологии no-till / Ресурсосберегающее земледелие. 2021. № 1(49) С. 29–32.
20. *Карманов И.И., Булгаков Д.С.* Методика почвенно-агроклиматической оценки пахотных земель для кадастра. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, АПР. 2012. 122 с.
21. *Кирюшин В.И., Дридигер В.К., Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Козлов Д.Н., Кирюшин С.В., Конищев А.А.* Методические рекомендации по разработке минимальных систем обработки почвы и прямого посева. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 136 с.
22. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
23. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
24. *Лебедева И.И.* Черноземы Восточной Европы: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 1992. 49 с.
25. *Лебедева И.И.* Гумусовые и карбонатные аккумуляции как диагностические критерии в черноземах Восточной Европы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 3–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2011-68-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-3-18).
26. *Лебедева И.И., Королёва И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 16–26. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-71-16-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-16-26).
27. *Левченко Е.А., Козлов Д.Н., Смирнова М.А., Авдеева Т.Н.* Диагностические свойства и классификация почв лесостепи Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 3–26. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-88-3-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-3-26).
28. *Оглезнев А.К., Куприян Т.А., Норкина Т.Е. и др.* Методические рекомендации по оценке качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. М.: Русская оценка, 2003. 169 с.
29. *Петрова Л.Н., Дридигер В.К., Кацаев Е.А.* Влияние технологий возделывания сельскохозяйственных культур на содержание продуктивной влаги и плотность почвы в севообороте // Земледелие. 2015. № 5. С. 16–18.
30. *Плотникова О.О.* Роль транспортирующей способности водных потоков в изменении некоторых свойств поверхностных горизонтов эродированных черноземов типичных (на примере Курской области): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2021. 20 с.

31. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Аветян С.А., Шишконокова Е.А. Карта распаханности почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94. С. 38–56. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-38-56](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-38-56).
32. Столбовой В.С., Гребенников А.М. Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 31–67. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).
33. Столбовой В.С., Шилов П.М., Петросян Р.Д. Реестр особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий Российской Федерации // Достижения науки и техники. 2021. Т. 35. № 1. С. 4–11.
34. Урбах В.Ю. Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.
35. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Чижикова Н.П., Роговнева Л.В. Почвы Каменной Степи, имеющие признаки Слитогенеза (вертигенеза) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 3–25. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-3-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-3-25).
36. Целищева Л.К., Дайнеко Е.К. Очерк почв Стрелецкого участка Центрально-Черноземного заповедника // Труды ЦЧГЗ им. В.В. Алехина. Вып. X. М.: Изд-во Лесная промышленность, 1967. С. 154–186.
37. Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гребенников А.М., Айдиев А.Я., Ильин Б.С., Ермолаев Н.Р. К вопросу о методике проведения многолетних опытов по изучению влияния технологии прямого посева на свойства почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2019. Вып. 98. С. 132–152. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-132-152](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-132-152).
38. Gerasimova M.I., Khitrov N.B. Morphological soil description for classifying soils and interpreting their genesis // Dokuchaev Soil Bulletin. 2016. Vol. 86. P. 8–16. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-8-16](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-8-16).
39. Gerasimova M.I., Bronnikova M.A., Khitrov N.B., Shorkunov I.G. Hierarchical morphogenetic analysis of Kursk chernozem // Dokuchaev Soil Bulletin. 2016. Vol. 86. P. 64–76. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-64-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-64-76).
40. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO. World Soil Resources Reports. 2014. No. 106. 203 p.

## REFERENCES

1. Avdeyeva T.N., Markina L.G., Evolyutsiya pakhotnykh chernozemov Kurskoy oblasti (Evolution of arable chernozems of the Kursk region), In: *Chernozemy Tsentral'noy Rossii: genezis, evolyutsiya i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya* (Chernozems of Central Russia: genesis,

evolution and problems of rational use), Voronezh: “Nauchnaya kniga”, 2017, pp. 72–76.

2. Bazykina G.S., Ovechkin S.V., Migration-mycelial chernozems in biospheric cycles within the Kursk region, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2012, Vol. 70, pp. 3–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-3-18).

3. Belobrov V.P., *Struktura pochvennogo pokrova gumidnykh i aridnykh oblastey subtropikov i tropikov: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (The structure of the soil cover of the humid and arid regions of the subtropics and tropics, Extended abstract of Dr. agric. sci. thesis), Moscow, 1989, 48 p.

4. Belobrov V.P., Yudin S.A., Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yudina A.V., Dridiger V.K., Stukalov R.S., Klyuyev N.N., Zamotayev I.V., Yermolayev N.R., Ivanov A.L., Kholodov V.A., *Izmeneniye fizicheskikh svoystv chernozemov pri pryamom poseve* (Changes in the physical properties of chernozems during no-till), *Pochvovedenie*, 2020, No. 7, pp. 880–890.

5. Belobrov V.P., Dridiger V.K., Yudin S.A., Yermolayev N.R., *K voprosu o diagnostike i zashchite pochv ot deflyatsii v Stavropol'skom kraye* (On the issue of diagnostics and protection of soils from deflation in the Stavropol Territory), *Agrarniy vestnik Urala*, 2021, No. 2, pp. 12–23.

6. Belobrov V.P., Yudin S.A., Aydiyev A.Yu., Ermolayev N.R., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Borisochkina T.I., Voronin A.Y., Plotnikova O.O., *Chernozem tipichnyy. Pryamoy posev, Kurskaya oblast'. Opyt, rotatsiya 1.1.* (Chernozem typical. Direct sowing, Kursk region. Experience, rotation 1.1.), Ivanov A.L. (Ch. Ed.), Moscow: “GEOS”, 2021, 127 p.

7. Borisov B.A., Baybekov R.F., Rogozhin D.O., Yefimov O.E., *Izmeneniye pokazateley sostoyaniya organicheskogo veshchestva i fizicheskikh svoystv chernozema yuzhnogo pri perekhode ot traditsionnoy k nulevoy obrabotke* (Changes in indicators of the state of organic matter and the physical properties of southern chernozem during the transition from traditional to no-till processing), *Zemledeliye*, 2018, No. 8, pp. 14–116.

8. Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., *Vliyaniye tekhnologii No-till na sodержaniye pitatel'nykh elementov v chernozeme vyshchelochennom lesostepi Zapadnoy Sibiri* (Influence of No-till technology on the content of nutrients in the leached chernozem of the forest-steppe of Western Siberia), *Zemledeliye*, 2016, No. 3, pp. 17–19.

9. Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Kudashkin P.I., *Izmeneniye pokazateley plodorodiya vyshchelochennogo chernozema lesostepi Priob'ya pri ispol'zovanii tekhnologii No-till* (Change in fertility indicators of the leached chernozem of the forest-steppe of the Ob region using the No-till technology), *Agrokhiimiya*, 2019, No. 12, pp. 16–21.

10. Voronin A.N., *Vliyaniye razlichnykh sistem obrabotki pochvy na dinamiku sodержaniya podvizhnogo fosfora v chernozeme tipichnom*

(Influence of various tillage systems on the dynamics of mobile phosphorus content in typical chernozem), *Agrokhimiya*, 2014, No. 5, pp. 32–37.

11. Dayneko E.K., *Struktura pochvennogo pokrova Tsentral'no-Chernozemnogo zapovednika imeni V.V. Alekhina i ego okrestnostey* (The structure of the soil cover of the Central Chernozem Reserve named after V.V. Alekhin and its environs), In: *Khimiya, genezis i kartografiya pochv* (Soil chemistry, genesis and mapping), 1968, pp. 165–170.

12. Report on the state and protection of the environment of the Kursk region in 2020, Kursk, 2021, 214 p.

13. Dridiger V.K., *Prakticheskiye rekomendatsii po osvoyeniyu tekhnologii vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur bez obrabotki pochvy v zasushlivoy zone Stavropol'skogo kraya* (Practical recommendations for mastering the technology of cultivating agricultural crops without tillage in the arid zone of the Stavropol' Krai), Stavropol': SNIISKH, 2016, 80 p.

14. Dridiger V.K., Ivanov A.L., Belobrov V.P., Kutovaya O.L., *Vosstanovleniye svoystv pochv v tekhnologii pryamogo poseva* (Restoration of soil properties in no-till), *Pochvovedenie*, 2020, No. 9, pp. 1111–1120.

15. Dridiger V.K., Belobrov V.P., Antonov S.A., Yudin S.A., Gadzhumarov R.G., Likhodiyevskaya S.A., Yermolayev N.R., *No-till: effektivnaya zashchita pochv ot erozii* (No-till: effective protection of soils from erosion), *Resursoberegayushcheye zemledeliye*, 2021, No. 49(01), pp. 39–45.

16. Edinyy gosudarstvennyy reyestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0. (*Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0.*), Moscow, Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 2014, 768 p.

17. Ivanov A.L., Lebedeva I.I., Grebennikov A.M., Factors for anthropogenic transformation of chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, No. 72, pp. 26–46, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-26-46](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46).

18. Ivanov A.L., Kulintsev V.V., Dridiger V.K., Belobrov V.P., *O tselesoobraznosti osvoiniya sistemy pryamogo poseva na chernozemakh Rossii* (On the feasibility of developing a system of direct sowing on the chernozems of Russia), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2021, No. 4, Vol. 35, pp. 8–16.

19. Kallegari A., *Ustoychivoye sel'skoye khozyaystvo baziruyetsya na tekhnologii no-till* (Sustainable agriculture based on no-till technology), *Resursoberegayushcheye zemledeliye*, 2021, Vol. 1(49).

20. Karmanov I.I., Bulgakov D.S., *Metodika pochvenno-agroklimaticheskoy otsenki pakhotnykh zemel' dlya kadastra* (Methods of soil-agro-climatic assessment of arable land for the cadastre), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchayeva, 2012, 122 p.

21. Kiryushin V.I., *Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke minimal'nykh sistem obrabotki pochvy i pryamogo poseva* (Guidelines for the development

of minimal systems for tillage and no-till), Moscow: "Izdatel'stvo MBA", 2019, 136 p.

22. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.

23. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.

24. Lebedeva I.I., *Chernozemy Vostochnoy Evropy: Avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk* (Chernozems of Eastern Europe, Extended abstract of Dr. geogr. sci. thesis), Moscow, 1992, 49 p.

25. Lebedeva I.I., Humus and carbonate accumulations as diagnostic criteria in the chernozems of Eastern Europe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2011, Vol. 68, pp. 3–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2011-68-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-3-18).

26. Lebedeva I.I., Koroleva I.E., Grebennikov A.M., The concept of evolution of chernozems in agroecosystems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 71, pp. 16–26, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-71-16-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-16-26).

27. Levchenko E.A., Kozlov D.N., Smirnova M.A., Avdeeva T.N., Diagnostic properties and classification of forest steppe soil the Vorona-Tsna interfluvium of the Provolzhskaya upland, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 88, pp. 3–26, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-88-3-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-3-26).

28. Ogleznev A.K., Kupriyan T.A., Norkina T.E., *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke kachestva i klassifikatsii zemel' po ikh prigodnosti dlya ispol'zovaniya v sel'skom khozyaystve* (Methodological recommendations for assessing the quality and classification of land according to their suitability for use in agriculture), Moscow: Russkaya otsenka, 2003, 169 p.

29. Petrova L.N., Dridiger V.K., Kashchayev E.A., Vliyaniye tekhnologiy vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na soderzhaniye produktivnoy vlagi i plotnost' pochvy v sevooborote (Influence of crop cultivation technologies on the content of productive moisture and soil density in crop rotation), *Zemledeliye*, 2015, No. 5, pp. 16–18.

30. Plotnikova O.O., *Rol' transportiruyushchey sposobnosti vodnykh potokov v izmenenii nekotorykh svoystv poverkhnostnykh gorizontov erodirovannykh chernozemov tipichnykh (na primere Kurskoy oblasti): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (The role of the transporting capacity of water flows in changing some properties of the surface horizons of typical eroded chernozems (on the example of the Kursk region), Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2021, 20 p.

31. Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Avetyan S.A., Shishkonakova E.A., Map of plowed soils of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 94, pp. 38–56, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-38-56](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-38-56).

32. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 31–

67, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).

33. Stolbovoy V.S., Shilov P.M., Petrosyan R.D., Reyster osobo tsennykh produktivnykh sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossiyskoy Federatsii (Register of especially valuable productive agricultural lands of the Russian Federation), *Dostizheniya nauki i tekhniki*, 2021, Vol. 35, No. 1, pp. 4–11.

34. Urbakh V.Yu., *Biometricheskie metody* (Biometric techniques), Moscow: Nauka, 1964, 415 p.

35. Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I., Chizhikova N.P., Rogovneva L.V., Soils with vertic properties in Kamennaya Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 3–25, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-3-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-3-25).

36. Tselishcheva L.K., Dayneko E.K., Ocherk pochv Streletskogo uchastka Tsentral'no-Chernozemnogo zapovednika (Essay on the soils of the Streltsy area of the Central Chernozem Reserve), In: *Trudy TSCHGZ im. V.V. Alekhina* (Selected works of the Central Black Earth State Natural Biosphere Reserve named after Professor V.V. Alekhin), Iss. X, Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1967, pp. 154–186.

37. Yudin S.A., Belobrov V.P., Drediger V.K., Grebenikov A.M., Aydiev A.J., Ilyin B.S., Ermolaev N.R., To the question of the methodology of conducting long-term experiments on the no-till technology influence on soil properties, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 132–152, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-132-152](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-132-152).

38. Gerasimova M.I., Khitrov N.B., Morphological soil description for classifying soils and interpreting their genesis, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 8–16, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-8-16](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-8-16).

39. Gerasimova M.I., Bronnikova M.A., Khitrov N.B., Shorkunov I.G., Hierarchical morphogenetic analysis of Kursk chernozem, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 64–76, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-64-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-64-76).

40. *IUSS Working Group WRB*. World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, World Soil Resources Reports, 2014, No. 106, 203 p.

УДК 632.111.7:632\*232.33

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-32-53



### **Ссылки для цитирования:**

Гордиенко О.А., Онистратенко Н.В., Андреева Д.А. Особенности почв природного парка “Щербаковский” Волгоградской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 32-53.  
DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-32-53

### **Cite this article as:**

Gordienko O.A., Onistratenko N.V., Andreeva D.A., Features of soils of the natural park “Scherbakovsky” Volgograd region, Dokuchaev Soil Bulletin, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 32-53, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-32-53

### **Благодарность:**

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № FNFE-2022-0012.

### **Acknowledgments:**

The studies were carried out within the framework of State assignment (Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences) No. FNFE-2022-0012.

## **Особенности почв природного парка “Щербаковский” Волгоградской области**

© 2023 г. О. А. Гордиенко<sup>1,2\*</sup>, Н. В. Онистратенко<sup>2</sup>,  
Д. А. Андреева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ “Федеральный научный центр агроэкологии,  
комплексных мелиораций и защитного лесоразведения  
Российской академии наук”, Россия,  
400062, Волгоград, пр-т Университетский, 97,

\*<https://orcid.org/0000-0001-5381-9114>, e-mail: [oleg.gordienko.95@bk.ru](mailto:oleg.gordienko.95@bk.ru).

<sup>2</sup>Волгоградский государственный университет, Россия,  
400062, Волгоград, пр-т Университетский, 100.

Поступила в редакцию 23.11.2022, после доработки 27.03.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** В работе изложены результаты исследования почвенного покрова природного парка “Щербаковский” Камышинского района Волгоградской области. Для достижения результатов было заложено 12 почвенных разрезов вдоль исследуемой почвенной катены (1.5 км), в результате чего установлены морфологические и химические особенности почв исследуемой территории. Пестрота и многообразие обусловлены вертикальной зональностью и геолого-гидрологическими особенностями. Так в балках, а также в массивных лесных насаждениях, распространение получили различные темногумусовые и глеевые почвы. На остепненных, склоновых и водораздельных участках сформировались стратоземы светлогумусовые скелетные, а также литоземы светлогумусовые. В зонах с открытым выходом песков распространение получили псаммоземы гумусовые с протогумусовыми горизонтами W, светлогумусовые (AJ-C) и гумусовые почвы (A-C). Установлено разнообразие почвообразующих пород природного парка. В пониженных участках рельефа они представлены преимущественно оглееными песчаными, а также пролювиально-делювиальными отложениями с включениями крупных обломков опок. На степных и крутосклоновых участках почвообразующими породами выступают мощные слои опоковых отложений. Верхняя граница их варьирует от 20 до 60 см в зависимости от микро- и мезорельефа. На водораздельных участках почвообразующие породы представлены песчаными ожелезненными отложениями с новообразованиями глино- и псевдофибр. Материнская порода фиксируется, начиная от 100 см, и представляет собой крупные блоки ожелезненного песчаника. Химические свойства исследуемых почв характеризуются нейтральной или слабокислой реакцией среды ( $\text{Med} = 6.95$ ). Все почвенные горизонты выщелочены от легкорастворимых солей. Также отмечен максимум значений  $\text{C}_{\text{орг}}$  в гумусовых и переходных горизонтах. Проведенные исследования в природном парке “Щербаковский” являются важными с точки зрения мониторинга состояния почв, а также позволили выявить особенности генезиса слаборазвитых, скелетных почв сухостепной природной зоны.

**Ключевые слова:** почвы, особо охраняемые природные территории, литоземы, Leptosols.

## Features of soils of the natural park “Scherbakovsky” Volgograd region

© 2023 O. A. Gordienko<sup>1,2\*</sup>, N. V. Onistratenko<sup>2</sup>,  
D. A. Andreeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration, and  
Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, ,  
97 Prospect Universitetsky, Volgograd 400062, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0001-5381-9114>, e-mail: [oleg.gordienko.95@bk.ru](mailto:oleg.gordienko.95@bk.ru).*

<sup>2</sup>*Volgograd State University,  
100 Prospect Universitetsky, Volgograd 400062, Russian Federation.*

*Received 23.11.2023, Revised 27.03.2023, Accepted 27.06.2023*

**Abstract:** The paper presents the results of a study of the soil cover of the Shcherbakovsky Nature Park in the Kamyshinsky district of the Volgograd region. To achieve the results 12 soil sections were laid along the studied soil catena (1.5 km), so that morphological and chemical features of the soils of the study area were investigated. Variety and diversity are due to vertical zonality and geological and hydrological peculiarities. So, in the gullies and in massive forest plantations various dark humus and gley soils have become widespread. On steppe, slope and watershed areas lithosolic light humus luvisols and light humus lithozems were formed. On areas with open sand surface, humus psammozems with protohumus horizons W, as well as light humus (AJ-C) and humus soils (A-C), and a variety of soil-forming rocks of the natural park were found. In relief depressions they are represented mainly by gleyed sandy, as well as proluvial-deluvial deposits with inclusions of large fragments of opokas. On steppe and steep-slope areas, the soil-forming rocks are thick layers of opoka deposits. Their upper boundary varies from 20 to 60 cm depth depending on the meso- and microrelief. On the watersheds, the soil-forming rocks are represented by sandy, ferruginous deposits with new formations of clay and pseudofibres. The parent rock is registered starting from 100 cm depth and consists of large blocks of hardened sandstone. The chemical properties of the studied soils are characterized by a neutral or slightly acidic pH. Easily soluble salts are leached from all soil horizons. The maximum values of  $C_{org}$  are typical of humus and transitional horizons. The studies conducted in the Shcherbakovsky Nature Park are of greatest importance for monitoring the state of soils, and also allowed us to identify the features of the genesis of underdeveloped soils and luvisols of the dry-steppe natural zone.

**Keywords:** soils, Protected areas of Russia, lithozem, Leptosols.

## ВВЕДЕНИЕ

В Волгоградской области в настоящее время система особо охраняемых природных территорий (ООПТ) представлена 7 природными парками, несколькими заказниками, памятниками при-

роды и другими охраняемыми природными территориями ([Брылев и др., 2006](#)).

Одной из важнейших задач ООПТ является сохранение почв. С развитием систем охраняемых территорий в СССР и России в большинстве случаев основной интерес представляли объекты живой природы – позвоночные и высшие растения. Исследования флоры и фауны отражены во множестве публикаций, регулярно ведутся систематические списки растений и животных ([Красная книга Волгоградской области, 2017](#); [Фирсов и др., 2021](#)). Также обращается внимание на геологические особенности ландшафтов, тогда как почвенный покров, как правило, рассматривается только как пространственный объект для размещения биомов ([Ярыгин, 2010](#); [Судаков, Моников, 2014](#)).

В России, как и зарубежом, основное внимание уделено состоянию, мониторингу и свойствам почв заповедников и национальных парков как объектов с наивысшей категорией охраны, тогда как почвы природных парков незаслуженно игнорируются и представлены малочисленными научными публикациями ([Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации, 2012](#)). Изучение почв природных парков носит несистемный характер и в ряде случаев ограничивается определенной областью исследования, например, определением содержания тяжелых металлов (ТМ), как в случае с природными парками Кумысная поляна ([Морозова и др., 2015](#)), Кара-Бууринский ([Гуткучбаева, 2019](#)) и Беш-Таш ([Кулданбаев и др., 2013](#); [Койчуманов, 2018](#)). Мониторинг химического и физического состояния почв произведен в парках Максимова дача ([Косовская и др., 2019](#)), Вепсский лес ([Бахматова и др., 2017](#)), Нижнехоперский ([Ярыгин, 2010](#)), а также в болгарском парке Витоша ([Malinova et al., 2020](#); [Karatoteva, 2016](#)) и Торфено бранище ([Malinova et al., 2019](#)). Часто встречаются результаты исследований микробиологической активности почв “Кондинские острова” ([Агафонова, 2019](#)). Исследования структуры почвенного покрова и классификационного положения почв проведено в таких природных парках как Ергаки, Нумто ([Аветов, 2017](#); [Крылов и др., 2016](#)).

Таким образом, информация о почвах особо охраняемых природных территорий необходима в первую очередь для их за-

щиты, выбора эталонных участков при создании региональных красных книг почв, а также для почвенного мониторинга.

Целью данного исследования является изучение морфологических и химических особенностей почв природного парка “Щербаковский” Камышинского района Волгоградской области.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выступают почвы и ландшафты природного парка “Щербаковский”. Щербаковская излучина входит в состав Приволжской возвышенности. Рельеф местности долгое время формировался в процессе взаимодействия тектоники и внешних факторов, таких как эрозия и дефляция. Грунтовые воды залегают на глубине 10 м и более в палеогеновых и меловых отложениях.

Климат Щербаковской излучины описывается как засушливый и континентальный. Наблюдается сильный контраст между холодной зимой и жарким летом. Среднемесячная температура января равна  $-11^{\circ}\text{C}$ , февраля –  $-10.5^{\circ}\text{C}$ , марта –  $-4.5^{\circ}\text{C}$ , апреля –  $+7.0^{\circ}\text{C}$ , мая –  $+15.5^{\circ}\text{C}$ , июня –  $+20.0^{\circ}\text{C}$ , июля –  $+23.0^{\circ}\text{C}$ , августа –  $+21.0^{\circ}\text{C}$ , сентября –  $+14.0^{\circ}\text{C}$ , октября –  $+6.0^{\circ}\text{C}$ , ноября –  $-1.5^{\circ}\text{C}$ , декабря –  $-7.5^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура года на территории равна  $6^{\circ}\text{C}$ . Осадки распределяются неравномерно по сезонам, их годовое количество достигает 350–380 мм. Значительно большее количество осадков выпадает в теплые периоды в виде сильных ливней, из-за которых впоследствии смывается верхний слой почв, что непосредственно приводит как к развитию оврагов и эрозии, так и к оползням на крутых склонах. При развитии оврагов формируются конусы выноса.

На территории Щербаковской излучины насчитывается больше сотни различных видов травянистых и древесных растений. На водоразделах произрастают дуб черешчатый (*Quercus robur*), береза повислая (*Betula pendula*), дикая яблоня (*Malus sylvestris*), груша (*Pyrus communis*), а также осина (*Populus tremula*). В подлеске встречаются заросли спиреи зверобоелистной (*Spiraea hypericifolia*), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosa*), а также боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea*) и ракитник русский (*Cytisus ruthenicus*). Травянистые

ассоциации представлены степными злаками – пырей ползучий (*Elytrigia repens*), мятлик узколистный (*Poa angustifolia*), костер безостый (*Bromopsis inermis*), а также полынь горькая (*Artemisia absinthium*) и обыкновенная (*Artemisia vulgaris*). Растительность верхних частей склона представлена псаммофитами.

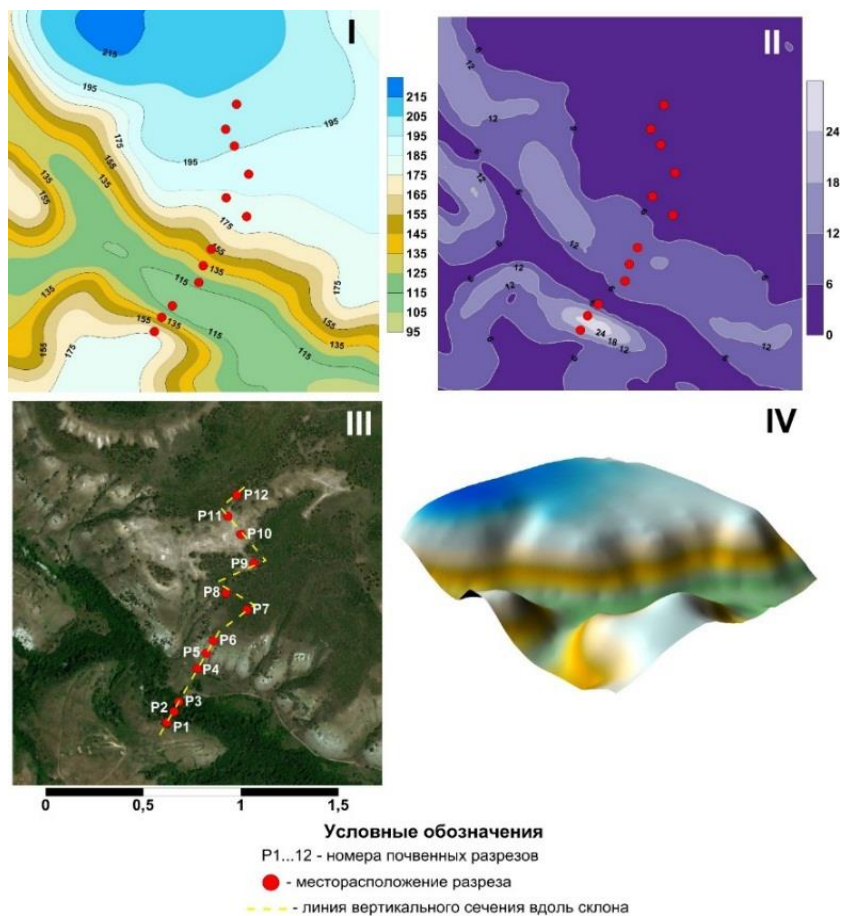
Полевые исследования проведены в июле 2022 г. в рамках полевой практики студентов 2-го курса кафедры экологии и природопользования Волгоградского государственного университета. В ходе работ на территории исследуемого участка была заложена почвенная катена протяженностью 1.5 км. Почвенные разрезы закладывались с учетом мезорельефа (повышение–понижение–повышение) (рис. 1, 2).

Морфологическое исследование почв проводилось по общепринятым методикам, а названия присвоены в соответствии с полевым определителем почв России 2008 г. с дополнениями 2021–2022 гг. ([Полевой определитель..., 2008](#)) и международной классификацией почв WRB-2014 (update-2022) ([IUSS, 2022](#)). Гранулометрический состав почв определялся по горизонтам в полевых условиях методом шнура. Химические анализы почв были выполнены в соответствии с отечественным руководством по химическому анализу почв ([Аринушкина, 1970](#)).

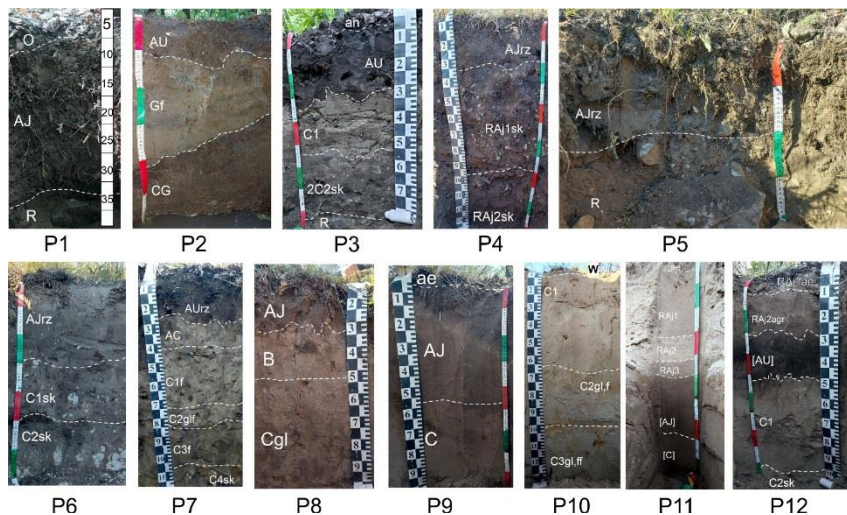
Составление карт-схем, а также рисунков осуществлялось с использованием программы CorelDRAW Graphics Suite 19.0, а также Surfer 11. В качестве растровой основы был взят космический снимок спутника Bing.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические особенности исследуемых почвенных разрезов, как и мезорельеф территории парка отличаются значительной пестротой. Влияние абсолютной высоты местности на образование почв, интенсивность и скорость протекания почвообразовательных процессов обусловлено разными водным и воздушным режимами, неоднородностью почвообразующих и подстилающих пород. Как итог, на разных высотах преобладают свои растительные ассоциации, а также протекают разные почвообразовательные процессы (рис. 3.).

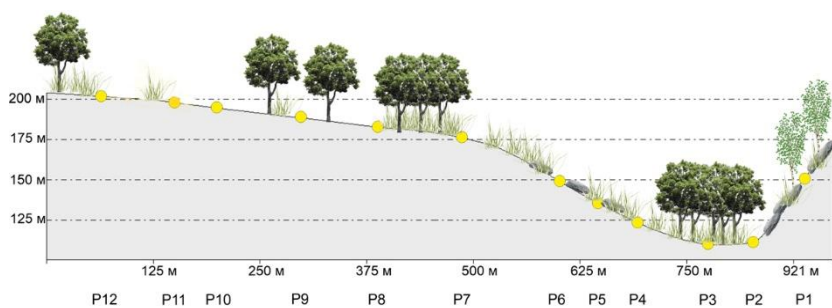


**Рис. 1.** Карты-схемы объекта исследования: I – карта рельефа территории; II – карта уклонов территории; III – Местоположение почвенных разрезов; IV – 3D модель рельефа территории.  
**Fig. 1.** Schematic map of the research object: I – relief map of the territory; II – slope map of the territory; III – location of soil pits; IV – 3D relief model of the territory.



**Рис. 2.** Почвенные разрезы в природном парке “Щербаковский” (июль 2022 г.).

**Fig. 2.** Soil pits in Scherbakovsky Nature Park (July 2022).



**Рис. 3.** Почвенная catena исследуемой территории.

**Fig. 3.** Soil catena of the study area.

Заложенная с юга на север почвенная catena в долине р. Щербаковка дает наглядное представление о разнообразии морфологических свойств почв. С точки зрения ландшафтно-рельефных особенностей территорию природного парка можно разделить на следующие участки: северный коренной склон (крутосклон), днище балки, остепненный склон, южный коренной склон (крутосклон), водораздельная часть. Для каждой ландшафтной части характерно свое сочетание типов и подтипов почв.

**Северный коренной склон (крутосклон).** На северных крутых склонах с выходами плотных пород (опок) распространение получили светлогумусовые скелетные почвы с очень коротким профилем. Для разреза (P1) характерно наличие подстилочного материала мощностью 5 см, состоящего из различного по степени разложения листо-веточного опада и отмершей травянистой растительности. Мертвая подстилка представлена в основном листовым опадом березы повислой (*Betula pendula*), листовым и веточным опадом тополя черного (*Populus nigra*), отмершей травянистой растительностью: хвощем луговым (*Equisetum palustre*), будрой плющевидной (*Glechoma hederacea*), подмаренником настоящим (*Galium verum*), мятликом луковичным (*Poa bulbosa*). Скудость видового состава склонового сообщества и разреженность растительного покрова обуславливают фрагментарность мертвой подстилки, приуроченной в основном к проекции кроны деревьев и к плотным зарослям подмаренника. Профиль почвы состоит из одного горизонта – AJ. Горизонт очень рыхлый имеет комковатую структуру, цвет 7.5YR 4/3. Поскольку с глубины 30 см горизонт подстилается плотной породой данная почва относится к отделу литоземов, к типу литоземов светлогумусовых, к типичному подтипу. По международной классификации почв WRB-2015 почва соответствует реферативно-почвенной группе (ППГ) Leptosols (Eutric Follic Hyperskeletal Leptosols (Loamic, Humic, Raptic)).

**Днище балки р. Щербаковка.** Почвы, развитые в днище балки, характеризуются наличием глеевых горизонтов. Разрез P2, заложенный в 5 м от уреза воды реки имеет следующую формулу профиля: AU-Gf-CG. Верхний темnogумусовый горизонт AU (10YR 2/1) характеризуется комковатой структурой, наличием ко-

пролитов на структурных отдельностях, а также большим числом ходов насекомых и животных. Ниже него расположен окислоглеевый горизонт (GLEY 1 4/5) с охристо-ржавыми пятнами (5YR 4/6) и разводами на вертикальных гранях. Граница между глеевым горизонтом и почвообразующей породой имеет ярко выраженный наклонный характер. Переходный к почвообразующей породе песчаный горизонт CG имеет сложный цвет (7.5YR 3/4) из-за оглеения (GLEY 1 3/10). Название почвы по ПО-2008 – темногумусово-глеевая окисленно-глеевая ожелезненная; по WRB-2015 – Eutric Oxygleyic Chernic Gleysols (Arenic, Humic).

У подножия северного склона балки развитие получили темногумусовые почвы. Для них характерно наличие темногумусового горизонта AU и далее слоя почвообразующей породы. Разрез (P3), заложенный у подножия склона балки, имеет следующее строение: an-AU-Cf-2C2sk-R. Верхние 10 см характеризуются черногумусовым (10YR 2/1) признаком an, зернисто-творожистой структурой, этот слой заметно отличается от нижележащего темногумусового горизонта, который имеет непрочно-комковатую структуру, а также более светлую окраску (10YR 2/2). Горизонт AU мощностью 20 см имеет на гранях комковатых отдельностей отмытые кварцевые зерна, а также корневые бусы в верхней части горизонта. С 30 до 56 см расположен горизонт почвообразующей породы C1 в виде рыхлого, бесструктурного песка. До глубины 80 см выделен делювиально-пролювиальный горизонт (2C2sk), состоящий из опоки и песка. Ниже расположен горизонт сплошной плотной породы (R). Название почвы по ПО-2008 – темногумусовая поверхностно-черногумусированная; по WRB-2015 – Greyzemic Folic Leptic Phaeozems (Arenic, Humic, Tonguic).

**Остепненный склон.** На выходе из балки на небольшом по крутизне (0–2°) остепненном склоне, почти лишенном древесной растительности, сформировались стратоземы светлогумусовые скелетные (P4) (AJrz-RAj1sk-RAj2sk). Верхний гумусово-аккумулятивный горизонт AJ (10YR 2/1) мощностью 23 см имеет непрочно-комковатую структуру, пылевато-супесчаный гранулометрический состав, а также густо пронизан корнями травянистых растений в верхней части, образуя сплошную дернину (признак rz). Далее до глубины 130 см последовательно сменяют друг друга

горизонты RAj1sk и RAj2sk (10YR 2/2), которые представлены преимущественно почвенным материалом, принесенным сверху вниз по склону вперемешку с плотной опоковой породой. Горизонты очень рыхлые, густо пронизаны корнями растений, супесчано-пылевой текстуры. Название почвы по ПО-2008 – стратозем светлогумусовый скелетный; по WRB-2015 – Eutric Hyperskeletal Leptosols (Arenic, Colluvic, Humic).

**Южный коренной склон (крутосклон).** Южные склоны с уклоном до 18° характеризуются локальными участками без какой-либо растительности, на которых распространение получили Nudilithic Leptosols. На задернованных склонах встречаются маломощные литоземы светлогумусовые (P5). Для них характерно наличие небольшого по мощности гумусового горизонта AJrz (до 20 см) (10YR 5/2) с мощной дерниной, а ниже – слоя плотной массивной породы. Название почвы по ПО-2008 – литозем светлогумусовый типичный; по WRB-2015 – Nudilithic Eutric Hyperskeletal Leptosols (Arenic, Humic).

В верхней части склона (P6) мощность гумусовых горизонтов (AJrz) (10YR 3/1) увеличивается до 30 см, имеет комковатую структуру, а также локальное ожелезнение в правой части горизонта и пылевато-легкосуглинистый гранулометрический состав. Далее горизонт сменяется почвообразующей породой C1sk (10YR 4/2) с крупной опокой. С 50 см выделен слой плотной породы C2sk. Название почвы по ПО-2008 – светлогумусовая скелетная; по WRB-2015 – Eutric Leptosols (Loamic, Humic).

**Водораздельная часть** представляет собой участок со смешанной древесной растительностью. В дубраве было заложено 2 разреза (P7 и P8), расстояние между которыми 150 м. Разрезы очень сильно отличаются морфологически. Так, разрез 7 представлен темnogумусовой почвой с хорошо оструктуренным супесчаным горизонтом AU (10YR 2/1), мощностью 15 см. Под ним (15–35) расположен переходный горизонт AC (10YR 5/6) песчаной текстуры, мелко-глыбисто-бесструктурный. Начиная с 35 см происходит последовательная смена почвообразующих песчаных горизонтов с разными морфологическими особенностями. Горизонт C1f (2.5Y 5/6) отличается наличием железистых пятен и примазок, в C2gl,f (2.5Y 5/6) фиксируются глинофибры (признак gl). С глы-

бины 100 см пески подстилаются плотным слоем (2.5Y 5/6) ожелезненного песчаника. Название почвы по ПО-2008 – темногомусовая глубокоглинофибровая ожелезненная; по WRB-2015 – Follic Lamellic Bathyleptic Someric Phaeozems (Arenic, Humic).

Несмотря на большую лесистость участка, локально встречаются места без древесных насаждений. В отсутствие древесной растительности и, соответственно, при большей испаряемости на подобных участках встречаются светлогумусовые почвы (P8) со следующим строением профиля: AJ-B-Cgl. Верхний гумусово-аккумулятивный горизонт AJ (10YR 5/3) мощностью 17 см очень рыхлый, супесчаный, с очень непрочной-комковатой структурой. Ниже, с 17 до 40 см, выделен недиагностический горизонт B (2.5Y 6/4), в средней части которого фиксируется округлый морфон верхнего горизонта AJ, что свидетельствует о зоопереработке горизонта и об активности землеройных животных. С 40 до 85 см расположена почвообразующая порода Cgl (10YR 7/4) с тонкими глинофибрами в нижней части горизонта. Название почвы по ПО-2008 – светлогумусовая глубокоглинофибровая; по WRB-2015 – Eutric Cambisols (Arenic, Humic)/

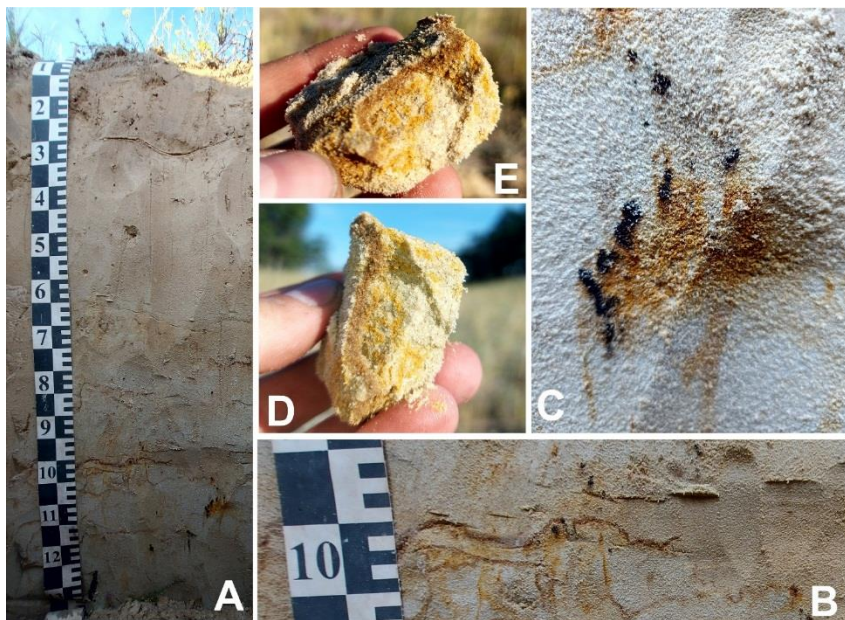
С постепенным подъемом на отметках 205–215 м над уровнем моря древесная растительность сокращается, и на смену ей приходят ландшафты с характерными блюдцевыми формами микрорельефа, так называемыми эоловыми депрессиями, в которых пески или полностью открытые, или слабо задернованы. На задернованных песках встречаются гумусовые эолово-аккумулятивные почвы (P9). Верхние 7 см представлены наносами песка (ae), ниже с 7 до 47 см выделен горизонт A (2.5Y 5/6). Поскольку горизонт характеризуется отсутствием структуры, а также слабыми цветовыми различиями с почвообразующей породой (5Y 7/4), отнести его к светло-, серо- или темногомусовым горизонтам нельзя. С 47 см фиксируется песчаная почвообразующая порода без каких-либо морфологических особенностей. Название почвы по ПО-2008 – гумусовая типичная; по WRB-2015 – Eutric Arenosols (Ochric, Areninovic).

С продвижением на север вглубь песчаного массива на задернованных участках встречаются псаммоземы гумусовые (P10).

Их отличительной особенностью является наличие сверху очень маломощного протогумусового горизонта (W) (2.5Y 6/3) мощностью не более 5–7 см очень непрочной комковатой структуры. Под ним сменяют друг друга различные по морфологии горизонты песчаной почвообразующей породы. Горизонт C1 (2.5Y 5/4) (5–60 см) бесструктурный, содержащий наибольшее количество корней травянистых растений. Ниже него, с 60 до 100 см, выделен горизонт C2gl,f (2.5Y 8/3; 7.5Y 4/6; 7.5Y 6/8), характеризующийся наличием глинофибр, а также ожеженных пятен и примазок. Интересным с точки зрения морфологии оказался горизонт C3gl,ff (10YR 8/2), в котором зафиксированы псевдофибры, а также ожеженные древние корни древесных растений (рис. 4). Название почвы по ПО-2008 – псаммозем гумусовый; по WRB-2015 – Eutric Arenosols (Ochric, Areninovic).

На верховьях песчаных барханов распространение получили стратоземы светлогумусовые с погребенными светлогумусовыми почвами (P11) (по WRB – Eutric Lamellic Arenosols (Ochric, Areninovic)).

В крайней северной части исследуемой катены расположен смешанный лес, почвенный покров которого представлен в опушечной зоне темnogумусовыми эолово-аккумулятивными почвами (P12). Под действием ветра в опушечных зонах постоянно происходит аккумуляция песчаных частиц, в результате чего наблюдается погребение гумусовых горизонтов. Мощность современных наносов составляет 9 см (RAj,ae), под ними находится турбированный горизонт [RAj+AU] (9–34 см), состоящий из морфонов горизонта RAj,ae и нижележащего темnogумусового горизонта AU. Образование такого горизонта связано с проведением противопожарной вспашки, в результате которой были перемешаны почвенные горизонты. Погребенный гумусовый горизонт AU (34–56 см) (10YR 3/2) имеет комковатую структуру, а также максимальную аккумуляцию травянистых корней. Под ним расположена песчаная почвообразующая порода (C), которая с глубины 105 см подстилается плотным слоем ожеженного песчаника. Название почвы по ПО-2008 – темnogумусовая эолово-аккумулятивная; по WRB-2015 – Someric Phaeozems (Arenic, Aric, Areninovic).



**Рис. 4.** Морфологические особенности разреза P10. А – профиль почвы; В, Е – глинофибры; D – новообразования железа; С – ожелезненные древние корни древесных растений.

**Fig. 4.** Morphological features of section P10. A – soil profile; B, E – clayfibers; D – soil new formations of iron; C – ironed ancient roots of woody plants.

Таким образом, установлено, что в почвах исследуемой катены изменяется скорость и интенсивность протекания почвообразовательных процессов, а также происходят закономерные последовательные изменения растительности и почв в связи с изменением абсолютной высоты местности. Это отчетливо проявляется на разных элементах микро- и мезорельефа в пределах структуры почвенного покрова.

Химические свойства исследуемых почв также варьируют в зависимости от высоты над уровнем моря, уровня залегания почвенно-грунтовых вод, а также от ландшафтных особенностей (табл. 1).

**Таблица 1.** Химические свойства почв природного парка “Щербаковский”

**Table 1.** Chemical properties of soils in Scherbakovsky Nature Park

| Горизонт | pH    | Общее солесодержание, % | C <sub>орг</sub> , % |
|----------|-------|-------------------------|----------------------|
| Разрез 1 |       |                         |                      |
| O        | н. о. | н. о.                   | н. о.                |
| AJ       | 7.2   | 0.003                   | 0.46                 |
| R        | н. о. | н. о.                   | н. о.                |
| Разрез 2 |       |                         |                      |
| AU       | 7.6   | 0.01                    | 0.31                 |
| Gf       | 7.5   | 0.01                    | 0.17                 |
| CG       | 7.3   | 0.004                   | 0.07                 |
| Разрез 3 |       |                         |                      |
| an       | 7.2   | 0.01                    | 0.58                 |
| AU       | 7.3   | 0.01                    | 0.45                 |
| C1       | 6.95  | 0.03                    | 0.05                 |
| 2C2sk    | 6.8   | 0.01                    | 0.11                 |
| Разрез 4 |       |                         |                      |
| AJrz     | 7.3   | 0.01                    | 0.2                  |
| RAj1sk   | 6.95  | 0.03                    | 0.3                  |
| RAj2sk   | 6.8   | 0.01                    | 0.1                  |
| Разрез 5 |       |                         |                      |
| AJrz     | 6.5   | 0.02                    | 0.3                  |
| R        | н. о. | н. о.                   | н. о.                |
| Разрез 6 |       |                         |                      |
| AJrz     | 6.7   | 0.01                    | 0.15                 |
| C1sk     | 6.8   | 0.01                    | 0.1                  |
| C2sk     | н. о. | н. о.                   | н. о.                |
| Разрез 7 |       |                         |                      |
| AU       | 6.4   | 0.02                    | 0.45                 |
| AC       | 6.97  | 0.002                   | 0.28                 |
| C1f      | 7.38  | 0.01                    | 0.04                 |
| C2gl,f   | 7.65  | 0.095                   | 0.01                 |
| C3f      | 7.4   | 0.01                    | 0.01                 |
| C4sk     | 6.29  | 0.007                   | 0.1                  |

**Продолжение таблицы 1**

**Table 1 continued**

| Горизонт  | pH    | Общее солесодержание, % | C <sub>орг</sub> , % |
|-----------|-------|-------------------------|----------------------|
| Разрез 8  |       |                         |                      |
| AJ        | 6.5   | 0.003                   | 0.25                 |
| B         | 6.9   | 0.002                   | 0.01                 |
| Cgl       | 6.8   | 0.001                   | 0.01                 |
| Разрез 9  |       |                         |                      |
| Ae        | 6.6   | 0.003                   | 0.1                  |
| AJ        | 6.6   | 0.01                    | 0.02                 |
| C         | 6.3   | 0.01                    | 0.01                 |
| Разрез 10 |       |                         |                      |
| W         | 6.7   | 0.01                    | 0.19                 |
| C1        | 6.4   | 0.01                    | 0.01                 |
| C2        | 7.2   | 0.003                   | 0.01                 |
| C3fgl     | 7.14  | 0.002                   | 0.02                 |
| Разрез 11 |       |                         |                      |
| ae        | 7.1   | 0.01                    | 0.14                 |
| RAj1      | 7.0   | 0.01                    | 0.1                  |
| RAj2      | 7.15  | 0.003                   | 0.1                  |
| RAj3      | 7.1   | 0.002                   | 0.15                 |
| [A]       | 7.25  | 0.01                    | 0.25                 |
| C         | 6.9   | 0.002                   | 0.01                 |
| Разрез 12 |       |                         |                      |
| RAj1,ae   | 7.0   | 0.003                   | 0.15                 |
| RAj2agr   | 7.1   | 0.004                   | 0.19                 |
| [AU]      | 7.25  | 0.01                    | 0.29                 |
| C         | 6.4   | 0.01                    | 0.01                 |
| R         | н. о. | н. о.                   | н. о.                |

**Примечание.** н. о. – не определялось.

**Note.** н. о. – was not measured.

Кислотно-щелочные свойства всех почвенных разрезов характеризуются слабокислой и нейтральной реакцией среды. Гумусовые, а также переходные и срединные горизонты в днище балки отличаются высоким pH (от 7.2 до 7.6) в сравнении со степными и водораздельными частями, в которых преимущественно

нейтральная или слабокислая реакции (от 6.4 до 7.2). Такое различие обусловлено прежде всего близким залеганием почвенно-грунтовых вод (менее 2 м), которые, по литературным данным, относятся преимущественно к гидрокарбонатному типу, за счет чего происходит подщелачивание почвенной толщи. Отличительной особенностью данной территории является полное выщелачивание горизонтов от легкорастворимых солей. Во всех исследуемых почвах общее солесодержание не превышало 0.01%.

Что касается содержания органического углерода, то во всех почвах отмечены максимальные значения  $C_{\text{орг}}$  в гумусовых и переходных горизонтах. Также установлена зависимость содержания органического углерода от высоты над уровнем моря. Так, наибольшие значения углерода выявлены в гумусовых и срединных горизонтах балочных ландшафтов, что объясняется наилучшими водным и воздушным режимами, а также наличием густой древесной и травянистой растительности. Гумусовые горизонты остепненных склонов и водоразделов практически не содержат органического углерода. Исключением являются темно- и светло-гумусовые горизонты дубрав.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведения почвенных исследований методом закладки катены установлено многообразие и пестрота почвенного покрова природного парка “Щербаковский”. Пестрота и многообразие почв обусловлена вертикальной зональностью, а также геолого-гидрологическими особенностями.

2. В балочных системах, а также в массивных лесных насаждениях гумусовые горизонты отличаются более темной окраской (AU), а также наилучшей структурой. На остепненных, а также склоновых и водораздельных участках сформировались светлогумусовые горизонты (AJ) с пылевой непрочной комковатой структурой. В зонах с открытым выходом песков развитые гумусовые горизонты отсутствуют и на их месте на слобозадернованных песках формируются протогумусовые горизонты W.

3. Выявлено разнообразие почвообразующих пород. Так, в балках они представлены преимущественно оглееными песчаны-

ми отложениями, а также пролювиально-делювиальными отложениями с включениями крупных обломков опок. На степных и крутосклоновых участках почвообразующими породами выступают мощные слои опоковых отложений. Верхняя граница их варьирует от 20 до 60 см в зависимости от микро- и мезорельефа. На водораздельных участках почвообразующие породы представлены песчаными ожелезненными отложениями с новообразованиями глино- и псевдофибр. Подстилающая порода фиксируется начиная от 100 см и представляет собой крупные блоки ожелезненного песчаника.

4. Химические свойства исследуемых почв характеризуются нейтральной или слабокислой реакцией среды. Все почвенные горизонты выщелочены от легкорастворимых солей. Максимальные значения  $C_{орг}$  приурочены к гумусовым и переходным горизонтам.

5. Проведенные исследования в природном парке “Щербаковский” являются важными с точки зрения мониторинга состояния почв, а также позволили выявить особенности генезиса слабо-развитых, скелетных почв сухостепной природной зоны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А.* Почвенный покров южной части природного парка Нумто (Западная Сибирь // Социально-экологические технологии. 2017. № 4. С. 58–77.
2. *Агафонова Р.Ю.* Оценка биологической активности почв на разных этапах послерубочной сукцессии на примере природного парка “Кондинские озера” // Образовательная система: структурные преобразования и перспективные направления развития научной мысли: сборник научных трудов. Казань: ООО “СитИвент”. 2019. С. 388–392.
3. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 489 с.
4. *Бахматова К.А., Беляева К.А., Левков С.Н.* Почвы холмисто-моренных ландшафтов таежной зоны (на примере природного парка “Вепсский лес”) // Социально-экологические технологии. 2017. № 1. С. 41–51.
5. *Брылев В.В., Рябинина Н.О., Комиссарова Е.В., Материкин А.В., Сергиенко Н.В., Трофимова И.С.* Особо охраняемые природные территории Волгоградской области. Волгоград: Альянс, 2006. 256 с.

6. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
7. Койчуманов З.Т. Анализ современного состояния плодородия почв природного парка “Беш-Таш” в Таласской области // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2018. №. 4. С. 14–17.
8. Косовская М.А., Лямина Н.В., Хренова Т.К., Раджабов В.Н. Оценка экологического состояния почвы природного парка регионального значения “Максимова дача” // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2019. С. 846–851.
9. Красная книга Волгоградской области / О.Г. Баранова, В.М. Васюков, А.М. Веденеев [и др.]. Комитет природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области. Волгоград: Издат-Принт, 2017. 268 с.
10. Крылова А.А., Зелепукина Е.С, Милицина С.В. Ландшафтная структура природного парка Ергаки (Западный Саян) // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. № 5. С. 12–23.
11. Кулданбаев Н.К., Фогт Р.Д., Арнолдуссен А., Сыдыкбаев Т.Н., Окланд Т.И., Эйлертсен О. Эколого-гигиеническая оценка территории национального парка “Беш-Таш” // Медицина Кыргызстана. 2013. № 2. С. 83–87.
12. Морозова Е.Е., Буланый Ю.И., Малинина Ю.А., Буланая М.В. Экологическое состояние биocenозов периферийной части природного парка “Кумысная поляна” // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2015. Т. 24. № 4. С. 137–141.
13. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
14. Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации / гл. ред. Г.В. Добровольский, отв. ред. О.В. Чернова, В.В. Снакин, Е.В. Достовалова, А.А. Присяжная. М.: НИИ-Природа. 2012. 478 с.
15. Судаков А.В., Моников С.Н. История исследования природы Камышинского района Волгоградской области // Псковский регионологический журнал. 2014. № 17. С. 78–90.
16. Туткучбаева К.А. Экологическое состояние почвы природного парка “Кара-Буура” в Таласской области // Известия ВУЗов Кыргызстана. 2019. № 5. С. 40–42.
17. Фирсов Г.А., Бялт В.В., Сагалаев В.А. Дендрофлора Нижнехоперского природного парка (Волгоградская область, Россия). М.: Изд-во РОСА, 2021. 264 с.
18. Ярыгин А.Н., Князев Ю.П., Князев А.П. Морфологическая структура ландшафтов Нижнехоперского природного парка // Известия

Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2010. № 3. С. 111–116.

19. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

20. Karatoteva D.I. Analysis of the landscape structure of “Vitosha” nature park // International Scientific and Practical Conference World science. 2016. No. 12. P. 10–12.

21. Malinova L., Pavlov P., Hristov B. Content and stock of organic carbon in soils on the territory of Vitosha Nature Park // Forestry ideas. 2019. No. 25. P. 264–274.

22. Malinova L., Pavlov P., Hristov B. Organic carbon stock in Nature Reserve Torfeno Branishte // Bulgarian Journal of Soil Science, Agrochemistry and Ecology. 2019. No. 2. P. 13–21.

23. Malinova L., Pavlov P., Hristov B. Assessment of Acidity of Cambisol Soil in Vitosha Nature Park, Bulgaria // Journal of Balkan Ecology. 2020. No. 2. P. 171–184.

## REFERENCES

1. Avetov N.A., Pochvennyj pokrov yuzhnoj chasti prirodnogo parka Numto (Zapadnaya Sibir') (Soil cover of Numto nature park (southern part), west Siberia), *Social'no-ekologicheskie tekhnologii*, 2017, No. 4, pp. 58–77.

2. Agafonova R.Yu., Ocenka biologicheskoy aktivnosti pochv na raznyh etapah posleru-bochnoj sukcesii na primere prirodnogo parka “Kondinskie ozera” (Assessment of the biological activity of soils at different stages of post-slaughter succession by the example of the Kondinskie Lakes Nature Park), In: *Obrazovatel'naya sistema: strukturnye preobrazovaniya i perspektivnye napravleniya razvitiya nauchnoj mysli* (The education system: Structural changes and future directions for scientific thought), Kazan': OOO “SitIvent”, 2019, pp. 388–392.

3. Arinushkina E.V., Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv (A manual on chemical analysis of soils), Moscow: Moscow State University, 1970, 489 p.

4. Bahmatova K.A., Belyaeva K.A., Levkov S.N., Pochvy holmisto-morenykh landshaftov taezhnoj zony (na primere prirodnogo parka “Vepsskij les”) (soils of hilly moraine landscapes of taiga zone (“Vepssky les”), *Social'no-ekologicheskie tekhnologii*, 2017, No. 1, pp. 41–51.

5. Brylev V.V., Ryabinina N.O., Komissarova E.V., Materikin A.V., Sergienko N.V., Trofimova I.S., *Osobo ohranyaemye prirodnye territorii*

*Volgogradskoj oblasti* (Specially Protected Natural Areas of Volgograd Region), Volgograd: Al'yans, 2006, 256 p.

6. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Pochvy Volgogradskoj oblasti* (Soils of Volgograd region), Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izd-vo, 1970, 319 p.

7. Kojchumanov Z.T., Analiz sovremennogo sostoyaniya plodorodiya pochv prirodnogo parka "Besh-Tash" v Talasskoj oblasti (Analysis of the status of soil fertility of natural park "Besh-Tash" of the Talas region), *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*, 2018, No. 4, pp. 14–17.

8. Kosovskaya M.A., Lyamina N.V., Hrenova T.K., Radzhabov V.N., Ocenka ekologicheskogo sostoyaniya pochvy prirodnogo parka regional'nogo znacheniya "Maksimova dacha" (Assessment of environmental condition soils of natural park of the regional value "Maximova dacha"), *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. "Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'"* (Ecological, industrial and energy safety), 2019, p. 846–851.

9. Baranova O.G., Vasyukov V.M., Vedeneev A.M. (Eds) et al., *Krasnaya kniga Volgogradskoj oblasti* (Red Book of the Volgograd Region), Volgograd: Izdat-Print, 2017, 268 p.

10. Krylova A.A., Zelepukina E.S., Milicina S.V., Landshaftnaya struktura prirodno-go parka Ergaki (Zapadnyj Sayan) (Landscape structure of the Yergaki Nature Park (Western Sayan), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2016, No. 5, pp. 12–23.

11. Kuldanbaev N.K., Fogt R.D., Arnoldussen A., Sydykbaev T.N., Okland T.I., Ejlersen O., Ekologo-gigienicheskaya ocenka territorii nacional'nogo parka "Besh-Tash" (The ecological-hygienic assessment of the territory of the national park "Besh-Tash"), *Medicina Kyrgyzstana*, 2013, No. 2, pp. 83–87.

12. Morozova E.E., Bulanyj Yu.I., Malinina Yu.A., Bulanaya M.V., Ekologicheskoe sostoyanie biocenozov periferijnoj chasti prirodnogo parka "Kumysnaya polyana" (Ecological condition of biocenoses of the peripheral part of the natural park "Kumysnaya polyana"), *Samarskaya Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii*, 2015, No. 4, pp. 137–141.

13. *Polevoy opredelitel pochv Rossii* (Field determinant of soils of Russia), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.

14. Dobrovol'skij G.V. (Chief Ed.), Chernova O.V., Snakin V.V., Dostovalova E.V., Prisyazhnaya A.A., *Pochvy zapovednikov i nacional'nyh parkov Rossijskoj Federacii* (Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation), Moscow: NIA-Priroda, 2012, 478 p.

15. Sudakov A.V., Monikov S.N., Istoriya issledovaniya prirody Kamyshinskogo rajona Volgogradskoj oblasti (Nature research history of

Kamyshinsky district of Volgograd region), *Pskovskij regionologicheskij zhurnal*, 2014, No. 17, pp. 78–90.

16. Tutkuchbaeva K.A. Ecological state of the soil natural park “Kara-Buura” in Talas region, *Izvestiya VUZov Kyrgyzstana*, 2019, No. 5, pp. 40–42.

17. Firsov G.A., Byalt V.V., Sagalaev V.A., *Dendroflora Nizhnekhoperskogo prirodnogo parka (Volgogradskaya oblast', Rossiya)* (Dendroflora of the Nizhnekhopersky Nature Park (Volgograd Region, Russia), Moscow: Izd-vo ROSA, 2021, 264 p.

18. Yarygin AN., Knyazev Yu.P., Knyazev A.P., *Morfologicheskaya struktura landshaftov Nizhnekhoperskogo prirodnogo parka* (Morphological structure of the landscapes of the Nizhnekhepersky nature park), *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2010, No. 3, p. 111–116.

19. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

20. Karatoteva D.I., Analysis of the landscape structure of “Vitosha” nature park, *International Scientific and Practical Conference World science*, 2016, No. 12, pp. 10–12.

21. Malinova L., Pavlov P., Hristov B., Content and stock of organic carbon in soils on the territory of Vitosha Nature Park, *Forestry ideas*, 2019, No. 25, pp. 264–274.

22. Malinova L., Pavlov P., Hristov B., Organic carbon stock in Nature Reserve Torfeno Branishte, *Bulgarian Journal of Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, 2019, No. 2, pp. 13–21.

23. Malinova L., Pavlov P., Hristov B., Assessment of Acidity of Cambisol Soil in Vitosha Nature Park, Bulgaria, *Journal of Balkan Ecology*, 2020, No. 2, pp. 171–184.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-54-86



**Ссылки для цитирования:**

Цомаева Е.В., Артемьева З.С., Засухина Е.С., Варламов Е.Б. Несиликатное железо минерально-ассоциированного органического вещества агрочерноземов разной локализации на склоне // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 54-86. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-54-86

**Cite this article as:**

Tsomaeva E.V., Artemyeva Z.S., Zasukhina E.S., Varlamov E.B., Non-silicate iron in mineral-associated organic matter of agro-chnozems located on different positions on the slope, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 54-86, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-54-86

**Благодарность:**

Авторы выражают признательность проф. Фриду А.С. за конструктивные замечания. Исследования проведены с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

**Acknowledgments:**

The authors are grateful to Prof. Frid A.S. for his constructive comments. The research was carried out with the use of equipment of the Collaborative Use Centre “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

**Несиликатное железо минерально-  
ассоциированного органического вещества  
агрочерноземов разной локализации на склоне**

© 2023 г. Е. В. Цомаева<sup>1</sup>, З. С. Артемьева<sup>1\*</sup>, Е. С. Засухина<sup>2</sup>,  
Е. Б. Варламов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,  
\*e-mail: [artemyevazs@mail.ru](mailto:artemyevazs@mail.ru).

<sup>2</sup>ФИЦ “Информатика и управление” РАН, Россия,  
119333, Москва, Вавилова, 44, кор. 2.

Поступила в редакцию 20.03.2023, после доработки 02.05.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Представлены данные по содержанию валового несиликатного железа ( $\text{Fe}_d$ ) в минерально-ассоциированном органическом веществе (МАОМ) агрочерноземов разной локализации на склоне. Распределение валового несиликатного железа в профиле следует таковому органического углерода: максимальные величины приурочены к поверхностным горизонтам и снижаются вниз по профилю. Выявлено, что изменение содержания несиликатного железа в МАОМ илистой фракции в пахотных горизонтах смытых агрочерноземов является следствием эрозионных процессов, включая их интенсивность, зависящей, в том числе, от крутизны склона. Меньшая крутизна склона ( $4^\circ$ ) способствует увеличению нагрузки органического углерода (ОС) на оксиды железа, результатом чего является увеличение десорбируемости железа, тогда как в условиях большей крутизны ( $6^\circ$ ) наблюдается снижение десорбируемости железа. Мольное отношение  $\text{ОС}/\text{Fe}_d$  предлагается в качестве дополнительного индикационного параметра степени смытости почв. В илистых фракциях, вне зависимости от их локализации в профиле, а также вне зависимости от положения исследованных агрочерноземов на склоне, преобладающим механизмом стабилизации ОВ было образование органо-железосодержащих комплексов ( $\text{ОС}/\text{Fe}_d > 10$ ). В гумусовых горизонтах во фракции Остаток несиликатное железо, по-видимому, присутствует, преимущественно, в виде карбонатов железа ( $\text{FeCO}_3$ ), а доля собственно устойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов, ОВ которых представлено, преимущественно, гумином, относительно невелика на фоне абсолютного доминирования в составе данной фракции первичных минералов (вес. %). Большая часть несиликатного железа минерально-ассоциированного ОВ, извлекаемого дитионит-цитрат-бикарбонатной вытяжкой локализуется в илистой фракции – 2/3 и более.

**Ключевые слова:** эрозия почв, органическое вещество, ассоциированное с минеральной матрицей, несиликатное железо, ил, остаток.

## **Non-silicate iron in mineral-associated organic matter of agro-chernozems located on different positions on the slope**

© 2023 E. V. Tsomaeva<sup>1</sup>, Z. S. Artemyeva<sup>1\*</sup>, E. S. Zasukhina<sup>2</sup>,  
E. B. Varlamov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*e-mail: [artemyevazs@mail.ru](mailto:artemyevazs@mail.ru).*

<sup>2</sup>*Federal Research Centre “Informatics and Management”,  
Russian Academy of Sciences,  
44 Bld. 2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation.  
Received 20.03.2023, Revised 02.05.2023, Accepted 27.06.2023*

**Abstract:** Data on total non-silicate iron ( $\text{Fe}_d$ ) content in mineral-associated organic matter (MAOM) of agro-chnozems of different localization on the slope are presented. The distribution of total non-silicate iron in soil profile follows that of organic carbon (OC): the maximum values are confined to the surface horizons, and decrease down the profile. It has been revealed that the change in the content of non-silicate iron in the MAOM of the clay fraction in arable horizons of eroded agro-chnozems is a result of erosion processes, including their intensity, which also depends, among other things, on the slope steepness. A lower slope steepness ( $4^\circ$ ) contributes to an increase in the organic carbon loading on iron oxides, resulting in an increased iron desorption capacity, while a higher slope steepness ( $6^\circ$ ) results in lower iron desorption capacity. The OC/ $\text{Fe}_d$  molar ratio is suggested as an additional indicator of the degree of soil erosion. In clay fractions, of both their position in the soil profile and their position on the slope, the predominant mechanism of organic matter stabilization was the formation of organic-iron complexes ( $\text{OC}/\text{Fe}_d > 10$ ). In the Residue fraction of humus horizons, non-silicate iron seems to be presented mainly as iron carbonates ( $\text{FeCO}_3$ ), while the proportion of microaggregates (stable under the sonication), where OM is mainly humin, is relatively low against the background of the absolute dominance of primary minerals in this fraction (weight %). Most of the non-silicate iron of mineral-associated OM extracted by dithionite-citrate-hydrocarbonate is localized in the clay fraction – 2/3 or more.

**Keywords:** soil erosion, organic matter, associated with mineral matrix, non-silicate iron, silt, residue.

## ВВЕДЕНИЕ

Железо, и в первую очередь, так называемое “свободное” (несиликатное) железо, играет немаловажную роль в формировании почвенного профиля благодаря высокой дисперсности и способности к смене валентности, комплексообразованию.

Несиликатное железо в почве выполняет несколько важных

функций: 1) структурную, когда Fe (как  $\text{Fe}^{\text{III}}$ ) образует цементы, которые связывают минералы и ОВ вместе в нано-, микро- и макроагрегаты ([Totsche et al., 2018](#); [Barral et al., 1998](#)); 2) сорбирующую, при которой питательные вещества и ОВ адсорбируются минералами  $\text{Fe}^{\text{III}}$  или поверхностными пленками  $\text{Fe}^{\text{III}}$  ([Kleber et al., 2015](#)); 3) передачу электронов, при которой  $\text{Fe}^{\text{III}}$  принимает электроны от микробов или электронных челноков, или  $\text{Fe}^{\text{II}}$  отдает электроны различным окислителям, таким как  $\text{O}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}_2$  ([Melton et al., 2014](#)).

Сорбирующая и структурная функции железа являются определяющими для стабилизации и сохранения ОВ почвы за счет снижения его доступности для внеклеточных ферментов и гетеротрофных микробов ([Kleber et al., 2015](#); [Totsche et al., 2018](#)). Несиликатное железо связывает отдельные минеральные частицы, что приводит к образованию агрегатов пылеватого и илистого размера ([Muneer, Oades, 1989](#); [Lehmann et al., 2007](#); [Solomon et al., 2012](#)). Соответственно, несиликатное железо концентрируется преимущественно в илистой и пылеватой фракциях ([Водяницкий, 1989](#); [Eusterhues et al., 2005](#); [Chenu, Plante, 2006](#); [Pronk et al., 2011](#)).

Эрозия является наиболее распространенной формой деградации почв ([Lal, 2003](#)). Эрозия – это главный процесс, ведущий к истощению почвенного покрова на обрабатываемых землях. Ранее была показана перспективность исследования агроземов разного генезиса на склонах с применением фракционирования по размеру и плотности (грануло-денсиметрическое фракционирование) ([Артемяева, Травникова, 2006](#); [Артемяева, 2008, 2009](#); [Травникова и др., 2010](#); [Артемяева и др., 2021](#); [2023](#)). Установлено, что в пределах различных зон денудации и аккумуляции на склоне, приуроченных к определенным формам рельефа, формируются специфические элементарные почвенные структуры. Для них характерны совершенно определенные параметры глинисто-минералогического и гумусового состояния, в том числе химической структуры разных пулов ОВ.

Эрозия почвы представляет собой четырехэтапный процесс, включающий отрыв, разрушение, транспортировку / перераспределение и осаждение отложений, при этом ОВ почвы оказывает влияние на протекание всех четырех этапов. Учитывая предпола-

гаемую сильную корреляционную связь ОВ и несиликатного железа, исследование роли свободных несиликатных соединений железа, извлекаемых дитионит-цитрат-бикарбонатной вытяжкой ([Мера-Джексон, 1960](#)), в стабилизации и сохранении ОВ представляет интерес.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили типичные черноземы ([Классификация и диагностика почв СССР, 1977](#)), согласно международной классификации – *Typlic Chernozems* ([WRB, 2014](#)), территории “Курского Федерального Аграрного Научного Центра” (ФГБНУ “Курский ФАНЦ”). Черноземы данного подтипа достаточно широко распространены в Центрально-Черноземном районе и, в частности, в Курской области. Климат умеренный. Среднегодовая температура воздуха – +5 °С, сумма активных температур (температур > 10 °С) – 2 425 °С. Годовая сумма осадков – 590 мм, включая сумму осадков за теплый период (при температуре > 10 °С) – 285 мм.

Выбранные объекты представляют собой два полных склона одной (северной) экспозиции, имеют принципиальное сходство по глубине и характеру подстилания почвообразующих пород; характеризуются близкой исходной мощностью почвенного профиля и набором основных горизонтов (табл. 1).

Зоны денудации-аккумуляции на исследованных склонах выделялись в соответствии с классификацией О.П. Ермолаева (1992). Были выделены зоны: 1) отсутствия эрозии; 2) эрозионная (эрозионно-активная); 3) равновесная (денудации-аккумуляции) и 4) преобладающей аккумуляции.

Для разделения почвы на фракции по размеру и плотности был использован модифицированный вариант грануло-денсиметрического фракционирования (рис. 1) ([Artemyeva et al., 2021](#)). Прежде всего с помощью бромформ-этанольной смеси выделяли свободное ОВ (ЛФСВ – легкие фракции (плотность < 1.8 г/см<sup>3</sup>)). Далее для разрушения агрегатов использовали ультразвуковой диспергатор зондового типа ЛУЗД-0.5К-02-00000 ПС (Криамид, Россия). Озвучивание (71 Дж/мл) образца почвы (10 г + 50 мл деионизированной воды) осуществляли в течение 1 мин с последу-

ющим центрифугированием. Процедуру повторяли 15 раз. После удаления илистых частиц с помощью бромформ-этанольной смеси выделяли агрегированное ОВ (ЛФ<sub>АГР</sub> – легкие фракции (плотность  $< 1.8 \text{ г/см}^3$ )). Соответственно, были выделены 4 пула ОВ: неагрегированное, свободное (ЛФ<sub>СВ</sub>); агрегированное (ЛФ<sub>АГР</sub>); ОВ илистой фракции (Ил); и ОВ фракции Остаток. Для исследования были взяты лишь фракции, содержащие минерально-ассоциированное ОВ (Ил и Остаток).

Содержание органического углерода (ОС) и  $C_{\text{н/орг}}$  (карбонатов) определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Япония). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Валовое содержание несиликатного железа в образцах (Ил и Остаток) определяли модифицированным вариантом метода Мера–Джексона ([1960](#)) с СФ-окончанием (фотоколориметр “ЭКОТЕСТ 2020 - РС”, ЭКОНИКС, Россия).

Рентген-дифрактометрический анализ илистых фракций проводили на анализаторе HZG-4A X-ray (Carl Zeiss Jena, Германия). Сметиты диагностировали по широким отражениям с пиками 1.45 нм на дифрактограммах воздушно-сухих образцов и 1.7–1.8 нм на дифрактограммах образцов, сольватированных этиленгликолем. Иллит (гидрослюдистый компонент) был диагностирован по наличию рефлексов в области 1.0 нм, 0.5 нм и 0.334 нм. Каолинит диагностировали по наличию рефлексов в области 0.715 нм и 0.357 нм, не изменяющих своих параметров при сольватации образцов этиленгликолем и исчезающих при прокаливании при 550 °C в течение двух часов. В образцах каолинит представлен совершенной формой. Хлорит диагностирован по наличию рефлексов в области 1.4 нм, 0.474 нм и 0.354 нм.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием статистического пакета Microsoft Excel 2010. Выбранный уровень значимости  $p = 0.05$ .

**Таблица 1.** Характеристика объектов ключевых участков

**Таблица 1.** Characteristics of research objects at key sites

| Разрез                | Угодье | Положение на склоне       | Крутизна склона, ° | Степень эродированности | Профиль                                                                         | Глубина вскипания, см |
|-----------------------|--------|---------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1-ый ключевой участок |        |                           |                    |                         |                                                                                 |                       |
| 4                     | пашня  | приводораздельный участок | 0-1                | несмытый                | Апах (0-30) – А1 (30-70) – АВ (70-130) – В (130-140)                            | 90                    |
| 12                    |        | средняя часть склона      | 6                  | среднесмытый            | Апах (0-30) – А1 (30-40) – АВ (40-70) – В (70-120)                              | 25                    |
| 2                     |        | нижняя часть склона       | 5                  | смыто-намытый           | Апах (0-30) – А1 (30-40) – АВ (40-100) – В (100-120)                            | 74                    |
| 3                     |        |                           | 3                  | намытый                 | Апах (0-30) – А1 (30-40) – А1' (40-100) – А1'' (100-170)                        | не вскип.             |
| 2-ой ключевой участок |        |                           |                    |                         |                                                                                 |                       |
| 35                    | пашня  | приводораздельный участок | 0-1                | несмытый                | Апах (0-30) – А1 (30-90) – АВ (90-130) – В (130-170) – ВС (170-200)             | 60–70                 |
| 102                   |        | средняя часть склона      | 4                  | среднесмытый            | Апах (0-20) – А1 (20-30) – АВ (30-70) – В (70-100) – ВС (100-120) – С (120-130) | 20–30                 |
| 34                    |        |                           | 3                  | смыто-намытый           | Апах (0-20) – А1 (20-50) – АВ (50-70) – В (70-130) – ВС (130-150)               | 30–40                 |
| 101                   |        | нижняя часть склона       | 3                  | намытый                 | Апах (0-20) – А1 (20-80) – АВ (80-140) – В (140-210)                            | не вскип.             |

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### **Глинисто-минералогический состав исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне**

Характер распределения глинистых минералов в составе илистой фракции исследованных почв позволяет сделать вывод об активном участии денудационных процессов в формировании профилей разрезов 12 и 102 (рис. 1). Следует отметить резкое увеличении доли смектитов в пахотном горизонте смытых почв по сравнению с таковой несмытых вариантов (44–50 против 31–33% соответственно) при практически одинаковом количестве илистой фракции (~25%).

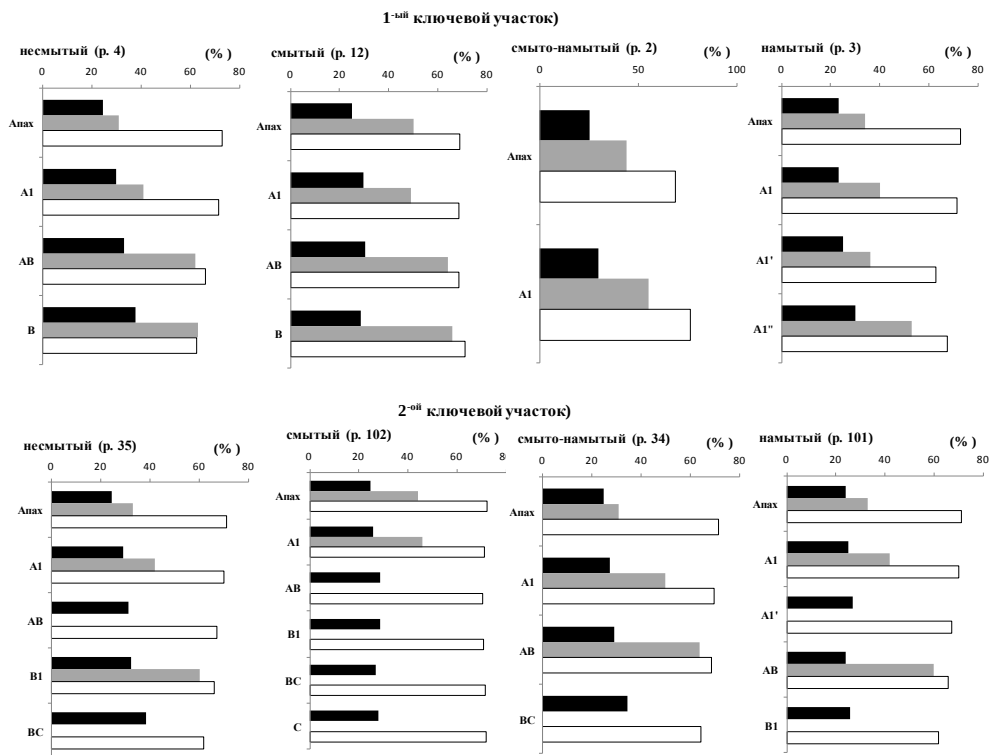
Доля смектитов в составе глинистых минералов в пахотных горизонтах смытых почв очень близка к таковой подпахотного горизонта и даже ниже (например, р. 12). Следовательно, анализ глинисто-минералогического профиля смытых почв обоих ключевых участков четко демонстрирует обнажение в результате эрозийных процессов почвенного материала, обогащенного смектитами.

Распределение фракции Остаток носит, как правило, обратный таковому илистой фракции порядок (рис. 1).

### **Распределение углерода в минерально-ассоциированном органическом веществе**

*Илистая фракция.* Распределение величины концентрации органического углерода (ОС) илистой фракции во всех исследованных почвенных профилях носит аккумулятивный характер: она максимальна в верхних горизонтах и снижается вниз по профилю. Исключения отмечены лишь в намытых агрочерноземах, где чередуются горизонты с повышенными и пониженными величинами концентрации ОС, что соответствует характеру распределения массы илистой фракции (рис. 2).

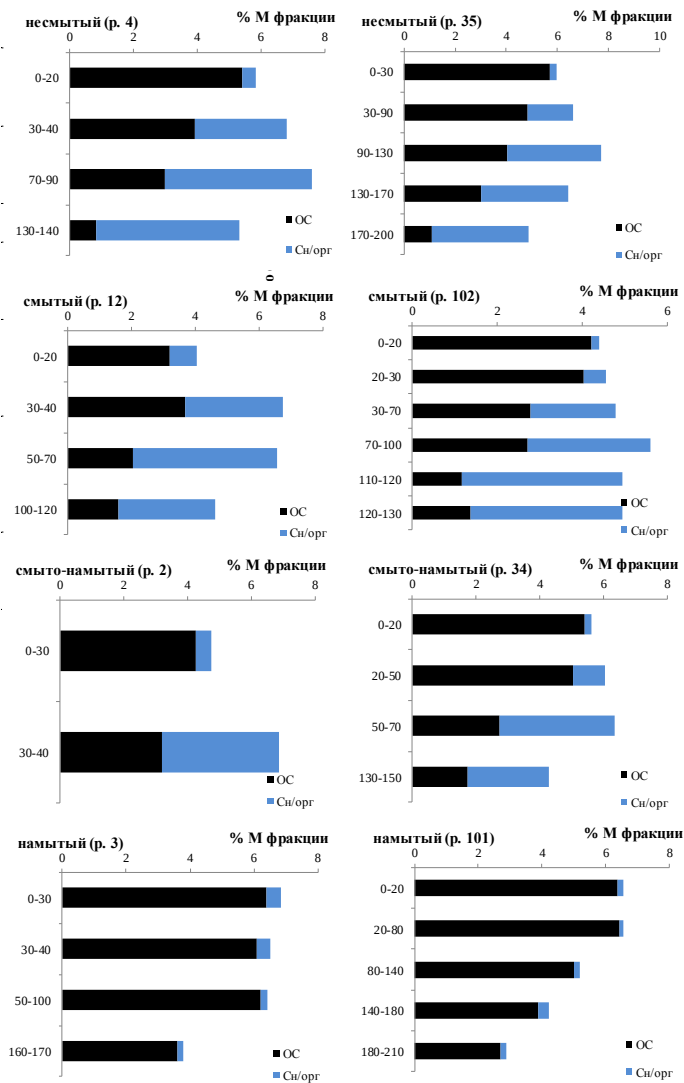
Минимальные наблюдаемые величины концентрации ОС в пахотных горизонтах обоих ключевых участков отмечены в смытых агрочерноземах.



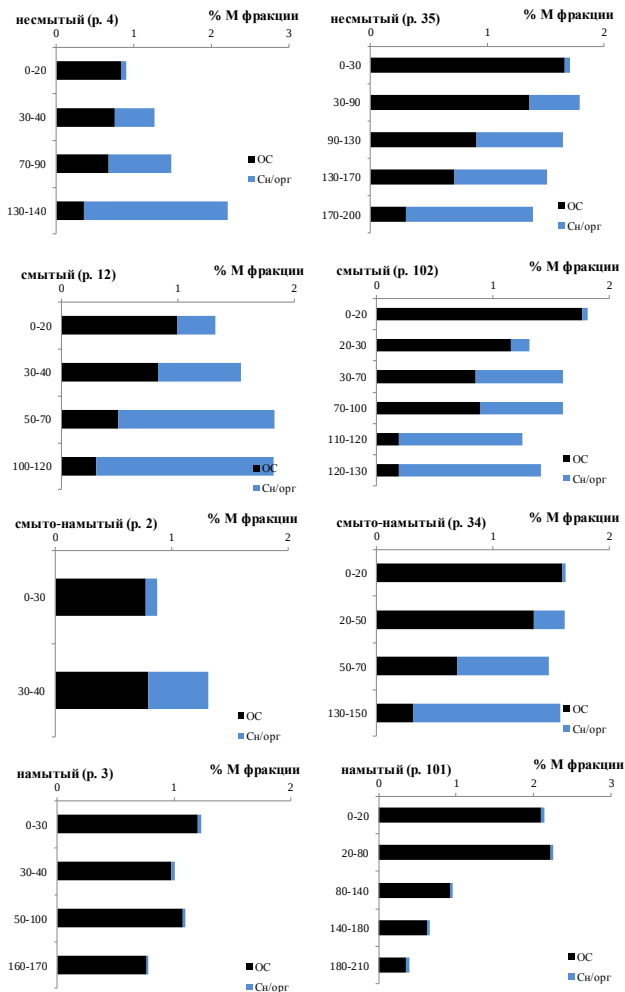
**Рис. 1.** Распределение фракций в исследованных агрочерноземах разной локализации на склоне (черный цвет – Ил (%); серый – смектиты (% от  $\Sigma$  минералов ила; белый – Остаток (%)).

**Fig. 1.** Distribution of fractions in the studied agrocherozems of different position on the slope (black – clay (%); gray – smectites (% of  $\Sigma$  silt minerals; white – Residue (%)).

## Ил



## Остаток



**Рис. 2.** Распределение величины концентрации С (органического (OC) и карбонатов ( $C_{\text{non-org}}$ )) во фракциях (Ил и Остаток) исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне.

**Fig. 2.** Distribution of the C concentration (organic (OC) and carbonates ( $C_{\text{non-org}}$ )) in the fractions (Clay and Residue) of the studied agrochernozems of different positions on the slope.

При этом величины концентрации ОС в них очень близки таковым подповерхностных горизонтов полнопрофильных вариантов, что предполагает эрозионный вынос почвенной массы верхнего ~30-сантиметрового слоя смытых агрочерноземов (рис. 2). Обнажающиеся при эрозии (частично/полностью) подповерхностные слои почвы обычно содержат меньше С по сравнению с поверхностными, их глинистые минералы недонасыщены сорбированными соединениями С и, соответственно, имеют больше реакционноспособных участков по сравнению с несмытыми вариантами. Как отмечали Harden с соавторами, значительная часть смытого С замещается в местах разрушения за счет сорбции С на недавно обнаженных минеральных поверхностях, что приводит к значительному поглощению С ([Harden et al., 1999](#)). Выявлено, что в изменившихся экологических условиях, на фоне поступления свежего ОБ растительных остатков культурных растений, формируются новые органо-глинистые комплексы, тем самым способствуя стабилизации ОБ в смытых почвах (динамическое замещение ОБ) ([Harden et al., 1999](#)).

Это хорошо согласуется с нашими данными об активизации процессов динамического замещения ОБ илистой фракции эродирующих почв разного генезиса и достижении ими уровня насыщенности углеродом, обусловленным составом глинистых минералов и уровнем конкретной агроэкологической обстановки ([Артемяева, Травникова, 2006](#); [Артемяева, 2008](#); [2009](#); 2010; [Травникова и др., 2010](#); [Артемяева и др., 2023](#)).

Пахотные горизонты смыто-намытых вариантов демонстрируют промежуточные (между несмытыми и смытыми почвами) величины концентрации ОС (рис. 2).

Пахотные горизонты намытых агрочерноземов аккумулятивной зоны характеризуются максимальными величинами концентрации ОС (рис. 2).

*Фракция Остаток.* Распределение величины концентрации ОС во фракции Остаток, аналогично илистой фракции, во всех исследованных почвенных профилях носит аккумулятивный характер: она максимальна в верхних горизонтах и снижается вниз по профилю. Исключение отмечено лишь в намытых агрочерноземах, где чередуются горизонты с повышенными и пониженными

величинами концентрации ОС (рис. 2).

Следует отметить отсутствие единой тенденции в динамике величины концентрации ОС в пахотных горизонтах в результате эрозионных процессов на разных ключевых участках. Если на 2-ом участке (р. 102) наблюдается незначительное снижение таковой относительно несмытого варианта (1.7 против 1.8 соответственно), то на 1-ом участке (р. 12) отмечено увеличение величины концентрации ОС (в 1.5 раза) (рис. 2). Это, по-видимому, является следствием в том числе большей интенсивности динамического замещения ОБ на эродирующей позиции 2-го склона, по сравнению с 1-ым склоном, в том числе за счет большей крутизны (6° против 4° соответственно), что способствует более интенсивному обновлению устойчивых (в УЗ-поле) микроагрегатов за счет разрушенных неустойчивых (в УЗ-поле) микроагрегатов на 2-ом склоне, что согласуется с литературными данными ([Артемова и др., 2023](#)).

### **Распределение несиликатного железа в минерально-ассоциированном органическом веществе**

*Илистая фракция.* Согласно классификации Розанова ([1975](#)) на 1-ом ключевом участке характер распределения  $Fe_d$  в почвенном профиле (% в почве) можно условно отнести к слабо аккумулятивному (полнопрофильный и несмытый агрочерноземы) и сильно аккумулятивному (намытый агрочернозем) (рис. 3а). На 2-ом ключевом участке отмечен сильно аккумулятивный характер распределения  $Fe_d$  (полнопрофильный, несмытый и намытый агрочерноземы) и слабо аккумулятивный (смыто-намытый агрочернозем) (рис. 3а).

Следует отметить, что наиболее глубокие горизонты часто бывают обогащены несиликатным  $Fe_d$  по сравнению с вышележащими (рис. 3б). Это может быть обусловлено: 1) снижением степени стабильности железоорганических комплексов с глубиной и, соответственно, увеличением десорбируемости железа ([Dai, Johnson, 1999](#); [Eusterhues et al., 2003](#)); 2) увеличением количества карбонатов внизу профиля ([Weng et al., 2005](#)).

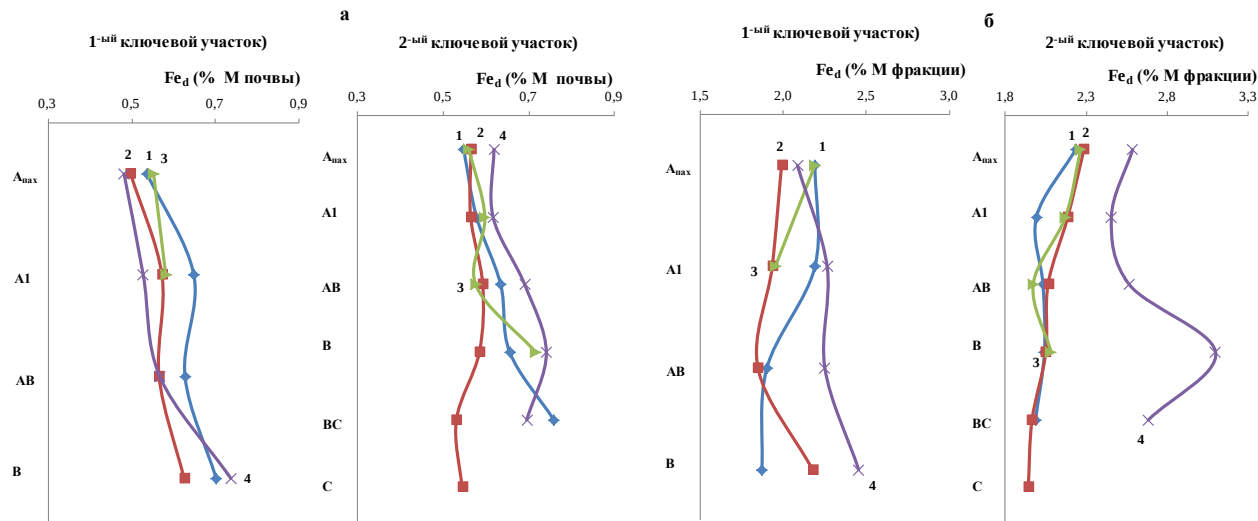
Пахотные горизонты смытых агрочерноземов не всегда обеднены несиликатным железом относительно таковых несмы-

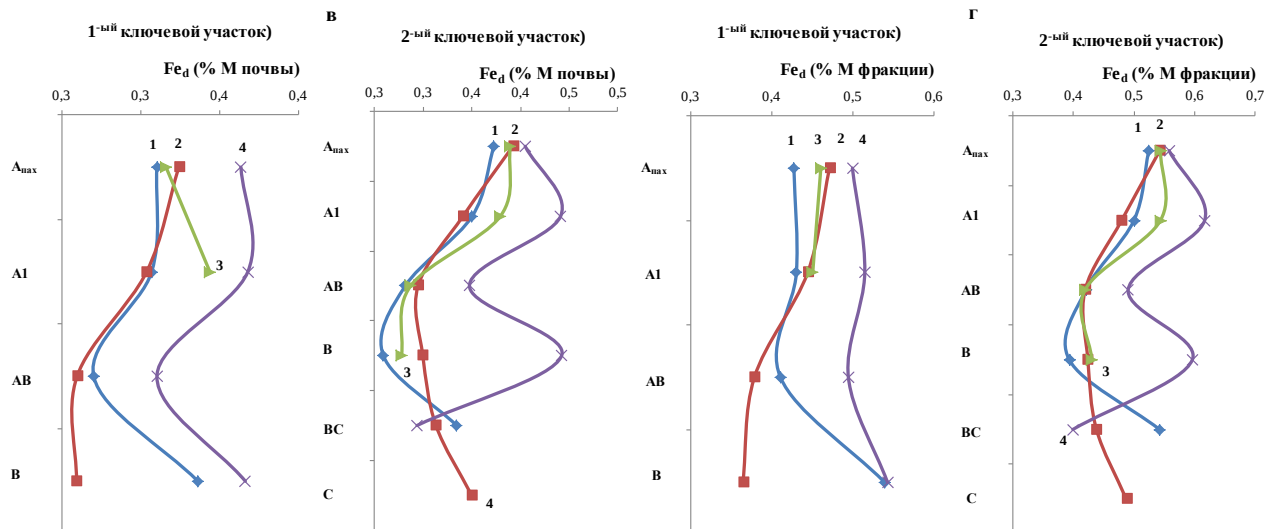
тых вариантов. Если в смытом агрочерноземе 1-го ключевого участка (р. 12) наблюдается снижение величины концентрации  $Fe_d$  в пахотном горизонте по сравнению с таковой несмытого агрочернозема (2.0 против 2.2% во фракции соответственно), то на 2-ом ключевом участке (р. 102) пахотный горизонт характеризуется повышенной величиной концентрации  $Fe_d$  по сравнению с таковой несмытой почвы: 2.3 против 2.2% во фракции (рис. 3б). Изменения величины концентрации несиликатного железа в пахотных горизонтах смытых агрочерноземов по сравнению с таковыми несмытых вариантов могут быть следствием постоянного обнажения почвенной массы ранее нижележащего горизонта, провоцирующего разложение ОВ ранее нижележащего горизонта, что способствует высвобождению железа из железоорганических комплексов в результате их окислительной деструкции железобактериями ([Водяницкий, 1989](#); [Melton et al., 2014](#)).

Большее количество десорбируемого железа в смытом варианте 2-го ключевого участка, по сравнению с таковым 1-го участка, может быть связано с большей загрузкой ОС на оксиды Fe (молярное отношение ОС/Fe), что свидетельствует о менее прочном связывании ОВ на более загруженных поверхностях ([Kaiser, Guggenberger, 2000](#); [Eusterhues et al., 2005](#)).

Максимальные величины концентрации  $Fe_d$ , как правило, отмечаются в намытых агрочерноземах обоих ключевых участков (рис. 3б). Поскольку горизонты намытых агрочерноземов в наибольшей степени обогащены ОВ, загрузка ОС на оксиды Fe здесь весьма высока, что облегчает десорбируемость  $Fe_d$ .

*Фракция Остаток.* Для распределения величины концентрации несиликатного железа ( $Fe_d$  – валовое) во фракции Остаток отмечены аналогичные его содержанию в почве в целом тенденции: максимальные величины концентрации  $Fe_d$ , как правило, приурочены к поверхностным горизонтам, снижаются в середине профиля и увеличиваются в наиболее глубоких горизонтах, что, по-видимому, является следствием их обогащения карбонатами. Исключения отмечаются в намытых вариантах, где наблюдаются чередования горизонтов с повышенными и пониженными величинами концентрации  $Fe_d$  (рис. 3в).





**Рис. 3.** Распределение  $Fe_d$  в илистой фракции (% в почве (а) и во фракции (б)) и фракции Остаток (% в почве (в) и во фракции (г)) в исследованных агрочерноземах разной локализации на склоне. Здесь и далее: 1 – несмытый, 2 – смытый, 3 – смыто-намытый, 4 – намытый.

**Fig. 3.** Distribution of  $Fe_d$  in Clay (% in soil (а) and fraction (б)), as well as in Residue (% in soil (в) and fraction (г)) in the studied agrochernozems of different position on the slope. Hereinafter: 1 – non-eroded, 2 – eroded, 3 – eroded-depositional, 4 – depositional.

Фракция Остаток пахотных горизонтов смытых агрочерноземов обогащена несиликатным железом относительно таковой несмытых вариантов.

Максимальные величины концентрации  $Fe_d$  во фракции Остаток, как правило, наблюдаются в намытых агрочерноземах обоих ключевых участков (рис. 3г).

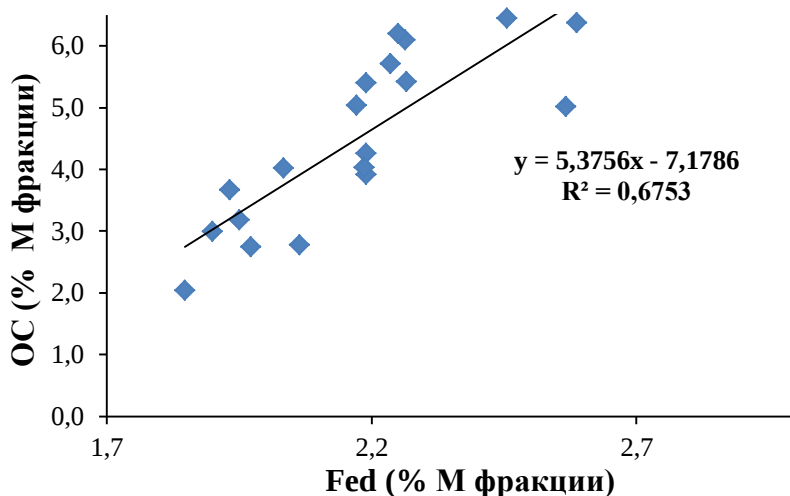
Таким образом, большая часть несиликатного железа фракций, содержащих минерально-ассоциированное ОВ, извлекаемого дитионит-цитрат-бикарбонатной вытяжкой, локализуется в илистой фракции – 2/3 и более, что согласуется с литературными данными ([Водяницкий, 1989](#); [Соколова и др., 2005](#)).

### **Роль несиликатного железа в стабилизации минерально-ассоциированного органического вещества**

*Илистая фракция.* Анализ экспериментальных данных по концентрации ОС и  $Fe_d$  показал тесную корреляционную связь между данными показателями в гумусовых горизонтах исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне: величина концентрации ОС в илистой фракции довольно тесно связана с (во многом определяется) количеством  $Fe_d$  во фракции ( $R^2 = 0.68$ ,  $n = 25$ ,  $P < 0.05$ ) (рис. 4). Это согласуется с литературными данными, согласно которым сильная корреляция между несиликатным железом и ОВ в почвах предполагает важность первого для стабилизации последнего ([Водяницкий, 1989](#); [Baldock, Skjemstad, 2000](#); [Eusterhues et al., 2003](#); [Kleber et al., 2015](#); [von Lützow et al., 2006](#); [Wagai, Mayer, 2007](#); [Pronk et al., 2011](#); [Zhao et al., 2016](#); [Totsche et al., 2018](#); [Heckman et al., 2018](#); [Chen et al., 2020](#)).

Стабилизацию ОВ оксидами железа обычно объясняют комплексообразованием ОВ на поверхностях оксидов железа посредством реакции лигандного обмена и связыванием ОВ с отрицательно заряженными минеральными поверхностями через поливалентные катионы (т. е. ОВ–катион–минерал) ([Kögel-Knabner et al., 2008](#)), а также катион-опосредованным “сшиванием” ОВ (т. е. –ОВ–катион–ОВ–) и образованием металлоорганических комплексов (т. е. хелатов, ОВ–катион) ([Senesi, Loffredo, 2005](#); [Kunhi Mouvenchery et al., 2012](#)). Преимущественный механизм стабилизации ОВ оксидами железа зависит от многих факторов (напри-

мер, окислительно-восстановительных условий, pH, ионной силы и пр.).

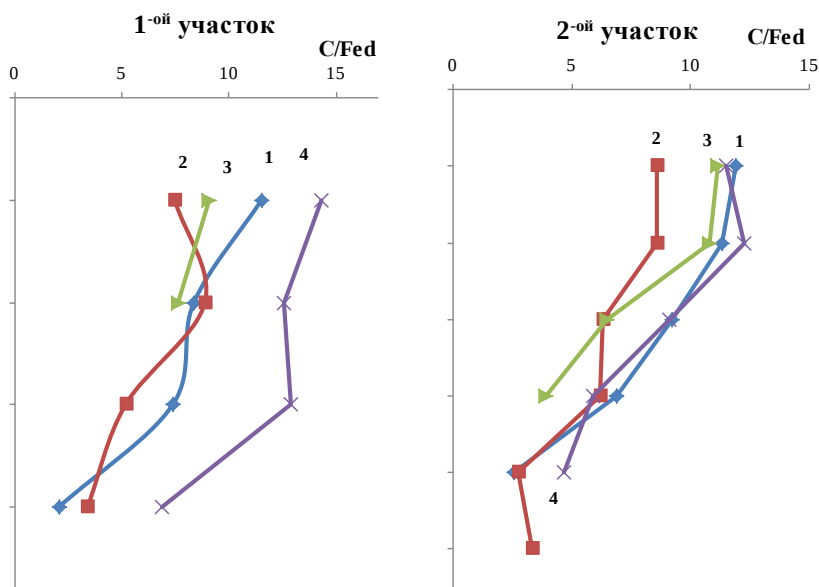


**Рис. 4.** Зависимость величины концентрации ОС от величины концентрации  $Fe_d$  в илистых фракциях гумусовых горизонтов исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне.

**Fig. 4.** Dependence between the OC and Fed concentrations in the clay fractions of the humus horizons of the studied agrochernozems of different position on the slope.

Ранее было показано, что мольное соотношение ОС/Fe можно использовать в качестве индикатора типа ассоциации между оксидами Fe и ОС, при этом более низкие значения указывают на физическую сорбцию (например, за счет Ван-дер-Ваальсовых сил), а более высокие – на комплексообразование ([Kaiser et al., 1997](#); [Wagai et al., 2007](#); [Guggenberger, Kaiser, 2003](#)). Известно, что максимальная сорбционная емкость, измеренная для С на оксиде Fe, соответствует мольному соотношению ОС/Fe = 1,0 ([Kaiser, Guggenberger, 2007](#)), однако за счет комплексообразования мольное соотношение ОС/Fe может достигать существенно более вы-

соких значений (Титова, 1962; Guggenberger, Kaiser, 2003). Соответственно, повышенная ( $> 1.0$ ) величина соотношения  $OC/Fe$  (4–18) (рис. 5) в гумусовых горизонтах исследованных нами агрочерноземов может указывать на: 1) многослойное покрытие оксидов железа органическим веществом; 2) разнообразие механизмов стабилизации С (Ван-дер-Ваальсовы, ионные и прочие) с преобладанием, по-видимому, процессов комплексообразования; 3) “сшивание” ОВ посредством ионов железа.



**Рис. 5.** Распределение величины мольного отношения  $C/Fe_d$  в илстых фракциях исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне.  
**Fig. 5.** Distribution of the  $C/Fe_d$  molar ratio in clay fractions of the studied agrochernozems of different position on the slope.

Очевидно, комплексообразование играет важную роль в накоплении С, связанного с железом (Wagai, Mayer, 2007; Lalonde, 2012; Zhao et al., 2016). Более того, значения величины мольного отношения  $OC/Fe$  выше 10 (11–14) (рис. 5) дает основание пред-

полагать, что в данном случае преобладало внутрисферное комплексообразование (“лигандный обмен”) ([Zhao et al., 2016](#)).

По мере продвижения вниз по профилю величина отношения  $OC/Fe_d$  понижается и достигает минимальных наблюдаемых величин внизу профиля. Это, вероятно, свидетельствует о снижении “загрузки” ОВ на оксиды железа, прежде всего, в силу уменьшения количества ОВ вниз по профилю. Единственное исключение наблюдается в намытом варианте 1-го ключевого участка (р. 3), где величина отношения  $OC/Fe_d$  наибольшая и слабее меняется по мере продвижения вниз по профилю, что обусловлено максимальной наблюдаемой глубиной гумусового профиля с чередованием горизонтов с пониженной и повышенной величиной отношения  $OC/Fe_d$ , следующей характеру распределения ОС.

Илистые фракции пахотных горизонтов несмытых агрочерноземов обоих ключевых участков характеризуются одинаковой величиной отношения  $OC/Fe_d$  (12), которая понижается в пахотных горизонтах смытых вариантов до 7 (1-ый ключевой участок) и 9 (2-ой ключевой участок). Это, по-видимому, является следствием постоянного выноса части пахотного горизонта агрочернозема на эрозионном участке склона. Величины мольного отношения  $OC/Fe$  ниже 10 (7–9) в пахотных горизонтах смытых агрочерноземов обоих ключевых участков дают основание предполагать, что в условиях регулярных эрозионных событий происходит постоянное обнажение почвенной массы нижележащего горизонта с недонасыщенными ОВ илистыми частицами, которые при выходе на поверхность почвы активно взаимодействуют с ОВ, но достаточно быстро выносятся вниз по склону. Поэтому меньшая величина отношения  $OC/Fe_d$  в пахотном горизонте смытого агрочернозема 1-го ключевого участка (р. 12), по сравнению с таковой 2-го ключевого участка (р. 102) (7 против 9 соответственно), может быть связана именно с интенсивностью эрозионных событий, поскольку крутизна 1-го склона выше таковой 2-го – 6° против 4° соответственно (табл. 1). Это согласуется с большей величиной потери ОС (концентрация в % на массу фракции) в пахотном горизонте 1-го ключевого участка по сравнению с таковой 2-го участка: 41% (в 1.7 раза) против 26% (в 1.4 раза) соответственно (рис. 2).

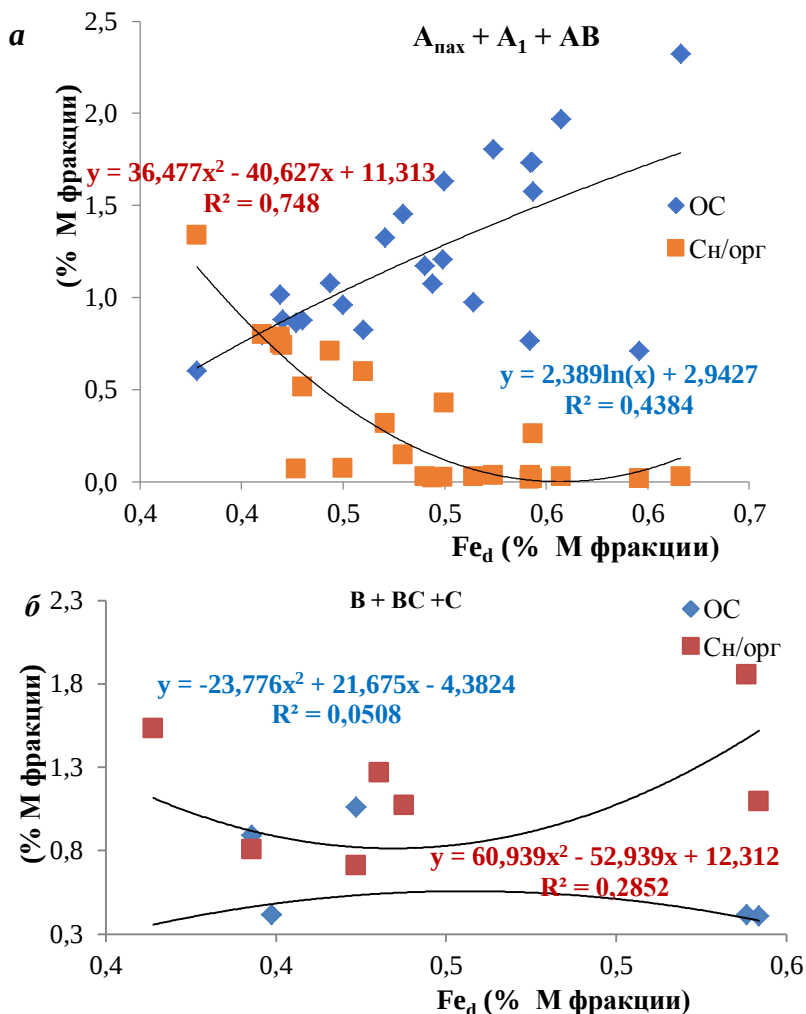
В пахотных горизонтах смыто-намытых вариантов обоих ключевых участков наблюдается единая тенденция – величина отношения  $OC/Fe_d$  увеличивается по сравнению с таковой смытого варианта за счет увеличения “загрузки” ОС на оксиды железа и, как правило, характеризуется промежуточными (между несмытым и смытым вариантами) значениями данного параметра (рис. 5).

Максимально наблюдающиеся величины отношения  $OC/Fe_d$ , как правило, наблюдаются в намытых агрочерноземах обоих ключевых участков в силу максимально наблюдаемого обогащения ОВ и, соответственно, максимальной “загрузкой” ОС на оксиды Fe (рис. 5).

*Фракция Остаток.* В силу присутствия во фракции Остаток, наряду с устойчивыми в УЗ-поле микроагрегатами, крупнозернистого компонента (первичные минералы) представляется целесообразным проанализировать полученные экспериментальные данные не только по концентрации  $Fe_d$ , ОС, но и  $C_{н/орг}$  (карбонатов).

Анализ величины концентрации несиликатного железа во фракции Остаток для всего массива экспериментальных данных показал, что она слабо коррелирует с содержанием С, как органического, так и неорганического (ОС и  $C_{н/орг}$ ):  $R^2 = 0.30$  и  $0.23$  соответственно,  $n = 34$ ,  $P < 0.05$ . Мы предполагаем, что это связано с разной природой железа в гумусовых и нижних горизонтах профиля. В связи с этим мы разделили весь массив аналитических данных на два блока, в первый вошли только гумусовые горизонты ( $A_{пах} + A_1 + AB$ ), во второй – нижние ( $B + BC + C$ ). Такой подход оказался весьма информативным. Так для гумусовых горизонтов оказалось, что величина концентрации С, как органического, так и неорганического, в большей степени коррелирует с количеством несиликатного железа ( $Fe_d$ ), при этом связь  $C_{н/орг}$  с  $Fe_d$  была значимо выше по сравнению с таковой ОС ( $R^2$ ):  $0.75$  против  $0.44$  соответственно ( $n = 25$ ,  $P < 0.05$ ) (рис. 6а).

Здесь следует остановиться на природе ОВ фракции Остаток. Недавние исследования показали весьма близкую химическую структуру ОВ фракции Остаток и гумина (негидролизующий остаток) ([Данченко и др., 2022](#)).



**Рис. 6.** Зависимость величины концентрации ОС от величины концентрации  $Fe_d$  во фракции Остаток в горизонтах (гумусовых ( $A_{\text{пах}} + A_1 + AB$ ) (а) и нижних ( $B + BC + C$ ) (б)) исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне.

**Fig. 6.** Dependence of C concentrations on  $Fe_d$  concentrations in the Residue fraction of horizons: humic (а) and lower ( $B + BC + C$ ) (б) of the studied agrochernozems of different position on the slope.

Поэтому с большой долей вероятности можно утверждать, что ОВ фракции Остаток преимущественно представлено именно гумином. Многие исследователи предполагают активное участие железа в образовании гумина ([Jumbu et al., 1986](#); [Jeanroy et al., 1986](#)). Более того, ранее было показано, что гумин может быть представлен гуминовыми кислотами, прочно связанными с соединениями Fe (III) ([Саакян, 1985](#)). Учитывая высокую прочность связей железа в составе гумина, исключаящую его экстракцию химическим путем, так же как экстракцию железа из состава алюмосиликатов, отсутствие сильной корреляционной связи несиликатного железа с ОС в гумусовых горизонтах выглядит вполне логичным.

Наличие же сильной корреляционной связи несиликатного железа с  $C_{n/орг}$  в гумусовых горизонтах, по-видимому, свидетельствует в пользу его присутствия в форме карбонатов железа ( $FeCO_3$ ).

Для нижних горизонтов не выявлено корреляционной связи несиликатного железа ни с ОС ( $R^2 = 0.05$ ), ни с  $C_{n/орг}$  ( $R^2 = 0.3$ ) ( $n = 9$ ,  $P < 0.05$ ) (рис. 66).

Таким образом, несиликатное железо во фракции Остаток гумусовых горизонтов, по-видимому, представлено преимущественно карбонатами железа ( $FeCO_3$ ). Скорее всего, это обусловлено гетерогенностью состава фракции Остаток, в которой доля собственно устойчивых в УЗ-поле микроагрегатов (гумин) относительно невелика на фоне абсолютного доминирования первичных минералов (вес. %).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных четко демонстрирует обнажение в результате эрозионных процессов почвенного материала нижележащих горизонтов. Это отражается, в первую очередь, в снижении величины концентрации ОС илистых фракций в пахотных горизонтах смытых агрочерноземов. При этом величины концентрации ОС в них очень близки таковым подповерхностных горизонтов полнопрофильных вариантов, что согласуется с выводом об эрозионном выносе почвенной массы верхнего ~30-сантиметрового слоя смытых агрочерноземов. Это сопровождается

ся изменениями содержания несиликатного железа в илистой фракции пахотного горизонта смытых агрочерноземов, что является следствием постоянного обнажения почвенной массы ранее нижележащего горизонта, провоцирующего разложение ОВ ранее нижележащего горизонта. Это способствует высвобождению железа из железоорганических комплексов в результате их окислительной деструкции железобактериями. Тем не менее пахотные горизонты смытых агрочерноземов не всегда характеризуются меньшим, по сравнению с таковым несмытых вариантов, содержанием  $Fe_d$ , что обусловлено интенсивностью эрозионных процессов, которая зависит, в том числе, от крутизны склона. В случае меньшей крутизны (2-ой ключевой участок – 4°) наблюдается незначительное увеличение содержания  $Fe_d$  в пахотном горизонте смытого агрочернозема, по сравнению с таковым несмытого варианта, за счет большей загрузки ОС на оксиды Fe (мольное отношение ОС/Fe = 9), что свидетельствует о менее прочном связывании ОВ на более загруженных поверхностях в отличие от 1-го ключевого участка (крутизна 6°), где наблюдается снижение содержания  $Fe_d$  (ОС/Fe = 7).

В зонах денудации-аккумуляции и преимущественной аккумуляции наблюдается многообразие процессов, участвующих в формировании смыто-намытых и намытых почв. Для пахотных горизонтов смыто-намытых вариантов обоих ключевых участков наблюдается единая тенденция – весьма близкие значения концентрации несиликатного железа с таковыми несмытых вариантов, которые могут даже превышать их. Максимальные величины содержания  $Fe_d$ , как правило, наблюдаются в намытых агрочерноземах, что обусловлено наибольшей загрузкой ОС на оксиды Fe, что облегчает десорбируемость  $Fe_d$ .

Распределение несиликатного железа ( $Fe_d$  – валовое) фракции Остаток в почвенном профиле, аналогично илистой фракции, имеет в целом аккумулятивный характер: максимальные величины концентрации  $Fe_d$ , как правило, приурочены к поверхностным горизонтам, снижаются в середине профиля и увеличиваются в наиболее глубоких горизонтах, что, по-видимому, является следствием их обогащения карбонатами.

Выявлена тесная корреляционная связь между величинами

концентрации ОС и  $\text{Fe}_d$  в гумусовых горизонтах исследованных агрочерноземов разной локализации на склоне ( $R^2 = 0.68$ ,  $n = 25$ ,  $P < 0.05$ ), что подтверждает важность несиликатного железа для стабилизации ОС.

Использование величины мольного соотношения ОС/Fe в качестве индикатора типа ассоциации между оксидами Fe и ОС представляется весьма информативным. Аналитические данные позволяют предполагать, что в илистых фракциях вне зависимости от их локализации в профиле, как и вне зависимости от положения исследованных агрочерноземов на склоне преобладающим механизмом стабилизации ОБ было образование органо-железосодержащих комплексов ( $\text{ОС/Fe} > 10$ ). Более того, мольное отношение  $\text{ОС/Fe}_d$  может служить дополнительным индикационным параметром степени смытости даже в пределах одной категории (средне смытые разновидности).

В гумусовых горизонтах во фракции Остаток несиликатное железо, по-видимому, присутствует преимущественно в виде карбонатов железа ( $\text{FeCO}_3$ ), а доля собственно устойчивых в УЗ-поле микроагрегатов, ОБ которых представлено в основном гумином, относительно невелика на фоне абсолютного доминирования в составе данной фракции первичных минералов (вес. %).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С.* Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Москва, 2008. 49 с.
2. *Артемяева З.С.* Органо-минеральные профили агрогенно-эрозионно-деградированных типичных черноземов Западной части Центрально-Черноземного района // *Агрохимия*. 2009. № 3. С. 1–8.
3. *Артемяева З.С., Травникова Л.С.* Изменение характеристик органического вещества и глинистых минералов серых почв в процессе агропедогенеза // *Почвоведение*. 2006. № 1. С. 96–107.
4. *Артемяева З.С., Данченко Н.Н., Кириллова Н.П., Масютенко Н.П., Дубовик Е.В., Кузнецов А.В., Козут Б.М.* Изменение компонентного состава органического вещества макро- и микроагрегатов типичного чернозема под воздействием эрозионных процессов // *Почвоведение*. 2021. № 11. С. 1322–1331.

5. *Артемяева З.С., Данченко Н.Н., Колягин Ю.Г., Варламова Е.Б., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Когут Б.М.* Химическая структура органического вещества агрочерноземов разных позиций на склоне // Почвоведение. 2023. № 6. С. 1–11.
6. *Водяницкий Ю.Н.* Оксиды железа и их роль в плодородии почв. М.: Наука, 1989. 160 с.
7. *Ермолаев О.П.* Пояса эрозии в природно-антропогенных ландшафтах речных бассейнов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1992. 147 с.
8. *Данченко Н.Н., Артемяева З.С., Колягин Ю.Г., Когут Б.М.* Сравнительный анализ гумусовых веществ и органического вещества физических фракций чернозема типичного // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1241–1254.
9. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
10. *Розанов Б.Г.* Генетическая морфология почв. М.: Изд-во МГУ, 1975. 290 с.
11. *Саакян В.Г.* Окислительно-восстановительные режимы автоморфных и гидроморфных почв нечерноземной зоны и их влияние на органическое вещество: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 1985. 24 с.
12. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толмешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
13. *Титова Н.А.* Железогумусовые комплексы некоторых почв // Почвоведение. 1962. № 12. С. 38.
14. *Травникова Л.С., Артемяева З.С., Сорокина Н.П.* Распределение гранулоденсиметрических фракций в дерново-подзолистых почвах, подверженных плоскостной эрозии // Почвоведение. 2010. № 4. С. 495–504.
15. *Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.* Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // Catena. 2021. Vol. 204. P. 105403.
16. *Baldock J.A., Skjemstad J.O.* Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // Org. Geochem. 2000. Vol. 31. P. 697–710.
17. *Barral M.T., Arias M., Guérif J.* Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates // Soil. Res. 1998. Vol. 46. P. 261–272.
18. *Chen C., Hall S. J., Coward E., Thompson A.* Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection // Nature Communications. 2020. Vol. 11. P. 2255.

19. *Chenu C., Plante A.F.* Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “organo-mineral complex” // *European J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 596–607.
20. *Dai K.H., Johnson C.E.* Applicability of solid state  $^{13}\text{C}$ /MAS NMR analysis in Spodosols: chemical removal of magnetic materials // *Geoderma*. 1999. Vol. 93. P. 289–310.
21. *Eusterhues K., Rumpel C., Kleber M., Kögel-Knabner I.* Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation // *Org. Geochem.* 2003. Vol. 34. P. 1591–1600.
22. *Eusterhues K., Rumpel C., Kögel-Knabner I.* Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: importance of specific surface area, iron oxides and micropores // *Eur. J. Soil Sci.* 2005. Vol. 56. P. 753–763.
23. *Guggenberger G., Kaiser K.* Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation // *Geoderma*. 2003. Vol. 113. P. 293–310.
24. *Harden J.W., Sharpe J.M., Parton W.J., Ojima D.S., Fries T.L., Huntington T.G., Dabney S.M.* Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1999. Vol. 13. P. 885–901.
25. *Heckman K., Lawrence C.R., Harden J.W.* A sequential selective dissolution method to quantify storage and stability of organic carbon associated with Al and Fe hydroxide phases // *Geoderma*. 2018. Vol. 312. P. 24–35.
26. *Jeanroy E., Guillet B., Ortiz R.* Evaluation of iron forms by chemical extractants // *Sci. Sol.* 1986. No. 1. P. 137–138.
27. *Jumbu P., Moucawi J., Dupuis N., Dupuis J.* Studies on the degree of condensation of humic acids and humins of loamy soils, in Atlantic climate // *Sci. sol.* 1986. No. 1. P. 53–54.
28. *Kaiser K., Guggenberger G.* The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils // *Org. Geochem.* 2000. Vol. 31. P. 711–725.
29. *Kaiser K., Guggenberger G.* Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: sorption into small pores vs. surface complexation // *Eur. J. Soil Sci.* 2007. Vol. 58. P. 45–59.
30. *Kaiser K., Guggenberger G., Haumaier L., Zech W.* Dissolved organic matter sorption on subsoil and minerals studied by  $^{13}\text{C}$ -NMR and DRIFT spectroscopy // *Eur. J. Soil Sci.* 1997. Vol. 48. P. 301–310.
31. *Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., et al.* Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments // *Adv. Agron.* 2015. Vol. 130. P. 1–140.

32. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2008. Vol. 171. P. 61–82.
33. Kunhi Mouvenchery Y., Kučerík J., Diehl D., Schaumann G.E. Cation-mediated cross-linking in natural organic matter: a review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2012. Vol. 11. P. 41–54.
34. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environ. Int.* 2003. Vol. 29 (4). P. 437–450.
35. Lalonde K., Mucci A., Ouellet A., Gélinas Y. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron // *Nature.* 2012. Vol. 483. P. 198–200.
36. Lehmann J., Kinyangi J., Solomon D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms // *Biogeochemistry.* 2007. Vol. 85. P. 45–57.
37. von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review // *Eur. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 426–445.
38. Mehra O.P., Jackson M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate // *Clay Miner.* 1960. Vol. 7. P. 317–327.
39. Melton E. D., Swanner E. D., Behrens S., Schmidt C., Kappler A. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle // *Nat. Rev. Microbiol.* 2014. Vol. 12. P. 797–808.
40. Muneer M., Oades J. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models // *Aust. J. Soil Res.* 1989. Vol. 27. P. 411.
41. Pronk G.J., Heister K., Kögel-Knabner I. Iron Oxides as Major Available Interface Component in Loamy Arable Topsoils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2011. Vol. 75. P. 2158–2168.
42. Senesi N., Loffredo E. Metal ion complexation by soil humic substances. // *Chemical Processes in Soil.* Soil Sci. Soc. of America, Sparks D.L., Tabatabai M.A. (Eds.), Inc., Madison, WI, 2005. P. 563–618.
43. Solomon D., Lehmann J., Harden J., Wang J., Kinyangi J., Heymann K., Karunakaran C., Lu Y., Wirick S., Jacobsen C. Micro- and nano-environments of carbon sequestration: multi-element STXM-NEXAFS spectromicroscopy assessment of microbial carbon and mineral associations // *Chem. Geol.* 2012. Vol. 329. P. 53–73.
44. Totsche K., Amelung W., Gerzabek M., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., et al. Microaggregates in soils // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2018. Vol. 181. P. 104–136.

45. Wagai R., Mayer L.M. Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta* 2007. Vol. 71. P. 25–35.
46. Weng L.P., Koopal L.K., Hiemstra T., Meeussen J.C.L., Van Riemsdijk W.H. Interactions of calcium and fulvic acid at the goethite-water interface // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. Vol. 69. P. 325–339.
47. *World reference base for soil resources* 2014. A framework for international classification, correlation and communication, Word Soil Resource Report 106. FAO. Rome. 2014. 181 p.
48. Zhao Q., Poulson S.R., Obrist D., Sumaila S., Dynes J.J., McBeth J.M., Yang Yu. Iron-bound organic carbon in forest soils: quantification and characterization // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 4777–4788.

## REFERENCES

1. Artem'eva Z.S., *Organicheskie i organo-glinistye komplekсы agrogenno-degradirovannyh pochv: Avtoref. dis.... dokt. biol. nauk* (Organic and organo-clay complexes of agro-genetically degraded soils, Extended abstract of Dr. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2008, 49 p.
2. Artem'eva Z.S., *Organo-mineral'nye profili agrogenno-jerozionno-degradirovannyh tipichnyh chernozemov Zapadnoj chasti Central'no-Chernozemnogo rajona* (Organ-mineral profiles of agro-erosion-degraded typical chernozems of the Western part of the Central Chernozem region), *Agrohimija*, 2009, No. 3, pp. 1–8.
3. Artem'eva Z.S., Travnikova L.S., *Izmenenie harakteristik organicheskogo veshhestva i glinistyh mineralov seryh pochv v processe agropodgeneza* (Transformation of Organic Matter and Clay Minerals in Cultivated Gray Forest Soils), *Pochvovedenie*, 2006, No. 1, pp. 96–107.
4. Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Kirillova N.P., Masjutenko N.P., Dubovik E.V., Kuznecov A.V., Kogut B.M., *Izmenenie komponentnogo sostava organicheskogo veshhestva makro- i mikroagregatov tipichnogo chernozema pod vozdeystviem jerozionnyh processov* (Alteration of the Content and Composition of Organic Matter in Macro- and Microaggregates of Haplic Chernozem under the Influence of Erosion Processes), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1322–1331.
5. Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Koljagin Ju.G., Varlamova E.B., Zasuhina E.S., Comaeva E.V., Kogut B.M., *Himicheskaja struktura organicheskogo veshhestva agrochernozemov raznyh pozicij na sklone* (Chemical Structure of Organic Matter of Agrochernozems of Different Alocalization on the Slope), *Pochvovedenie*, 2023b, No. 6, pp. 1–11.
6. Vodjanickij Ju.N., *Oksidy zheleza i ih rol' v plodorodii pochv* (Iron oxides and their role in soil fertility), Moscow: Nauka, 1989, 160 p.

7. Ermolaev O.P., *Pojasa jerozii v prirodno-antropogennyh landshaftah rechnyh bassejnov* (Erosion belts in natural-anthropogenic landscapes of river basins), Kazan: KGU, 1992, 147 p.
8. Danchenko N.N., Artem'eva Z.S., Koljagin Ju.G., Kogut B.M., *Sravnitel'nyj analiz gumusovyh veshhestv i organicheskogo veshhestva fizicheskikh frakcij chernozema tipichnogo* (A Comparative Study of the Humic Substances and Organic Matter in Physical Fractions of Haplic Chernozem under Contrasting Land Uses), *Pochvovedenie*, 2022, No. 10, pp. 1241–1254.
9. *Klassifikacija i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
10. Rozanov B.G., *Geneticheskaja morfologija pochv* (Soil genetic morphology), Moscow: MGU, 1975, 290 p.
11. Saakjan V.G., *Okislitel'no-vosstanovitel'nye rezhimy avtomorfnyh i gidromorfnyh pochv nechernozemnoj zony i ih vlijanie na organicheskoe veshhestvo: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Oxidation-reduction regimes of automorphous and hydromorphous soils of non-black earth zone and their influence on organic matter, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 1985, 24 p.
12. Sokolova T.A., Dronova T.Ja., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvah* (Soil clay minerals), Tula: Grif i K, 2005, 336 p.
13. Titova N.A., *Zhelezogumusovye komplekсы nekotoryh pochv* (Iron humus complexes of some soils), *Pochvovedenie*, 1962, No. 12, p. 38.
14. Travnikova L.S., Artem'eva Z.S., Sorokina N.P., *Raspredelenie granulodensimetricheskikh frakcij v dernovo-podzolistykh pochvah, podverzhennyh ploskostnoj jerozii* (Distribution of the Particle-Size Fractions in Soddy Podzolic Soils Subjected to Sheet Erosion), *Pochvovedenie*, 2010, No. 4, pp. 495–504.
15. Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B., *Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants*, *Catena*, 2021, Vol. 204, pp. 105403.
16. Baldock J.A., Skjemstad J.O., *Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack*, *Org. Geochem.*, 2000, Vol. 31, pp. 697–710.
17. Barral M. T., Arias M., Guérif J., *Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates*, *Soil. Res.*, 1998, Vol. 46, pp. 261–272.
18. Chen C., Hall S. J., Coward E., Thompson A., *Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection*, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11, p. 2255.

19. Chenu C., Plante A.F., Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “organo-mineral complex”, *European J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 596–607.
20. Dai K.H., Johnson C.E., Applicability of solid state  $^{13}\text{C}$ /MAS NMR analysis in Spodosols: chemical removal of magnetic materials, *Geoderma*, 1999, Vol. 93, pp. 289–310.
21. Eusterhues K., Rumpel C., Kleber M., Kögel-Knabner I., Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation, *Org. Geochem.*, 2003, Vol. 34, pp. 1591–1600.
22. Eusterhues K., Rumpel C., Kögel-Knabner I., Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: importance of specific surface area, iron oxides and micropores, *Eur. J. Soil Sci.*, 2005, Vol. 56, pp. 753–763.
23. Guggenberger G., Kaiser K., Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation, *Geoderma*, 2003, Vol. 113, pp. 293–310.
24. Harden J.W., Sharpe J.M., Parton W.J., Ojima D.S., Fries T.L., Huntington T.G., Dabney S.M., Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1999, Vol. 13, pp. 885–901.
25. Heckman K., Lawrence C.R., Harden J.W., A sequential selective dissolution method to quantify storage and stability of organic carbon associated with Al and Fe hydroxide phases, *Geoderma*, 2018, Vol. 312, pp. 24–35.
26. Jeanroy E., Guillet B., Ortiz R., Evaluation of iron forms by chemical extractants, *Sci. Sol.*, 1986, No. 1, pp. 137–138.
27. Jumbu P., Moucawi J., Dupuis N., Dupuis J., Studies on the degree of condensation of humic acids and humins of loamy soils, in Atlantic climate, *Sci. sol.*, 1986, No. 1, pp. 53–54.
28. Kaiser K., Guggenberger G., The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils, *Org. Geochem.*, 2000, Vol. 31, pp. 711–725.
29. Kaiser K., Guggenberger G., Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: sorption into small pores vs. surface complexation, *Eur. J. Soil Sci.*, 2007, Vol. 58, pp. 45–59.
30. Kaiser K., Guggenberger G., Haumaier L., Zech W., Dissolved organic matter sorption on subsoil and minerals studied by  $^{13}\text{C}$ -NMR and DRIFT spectroscopy, *Eur. J. Soil Sci.*, 1997, Vol. 48, pp. 301–310.
31. Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., et al., Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments, *Adv. Agron.*, 2015, Vol. 130, pp. 1–140.

32. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., et al., Organo–mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2008, Vol. 171, pp. 61–82.
33. Kunhi Mouvenchery Y., Kučerík J., Diehl D., Schaumann G.E., Cation-mediated cross-linking in natural organic matter: a review, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 2012, Vol. 11, pp. 41–54.
34. Lal R., Soil erosion and the global carbon budget, *Environ. Int.*, 2003, No. 4, pp. 437–450.
35. Lalonde K., Mucci A., Ouellet A., Gélinas Y., Preservation of organic matter in sediments promoted by iron, *Nature*, 2012, Vol. 483, pp. 198–200.
36. Lehmann J., Kinyangi J., Solomon D., Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms, *Biogeochemistry*, 2007, Vol. 85, pp. 45–57.
37. von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H., Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review, *Eur. J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 426–445.
38. Mehra O.P., Jackson M.L., Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate, *Clay Miner.*, 1960, Vol. 7, pp. 317–327.
39. Melton E. D., Swanner E. D., Behrens S., Schmidt C., Kappler A., The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle, *Nat. Rev. Microbiol.*, 2014, Vol. 12, pp. 797–808.
40. Muneer M., Oades J., The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models, *Aust. J. Soil Res.*, 1989, Vol. 27, p. 411.
41. Pronk G.J., Heister K., Kogel-Knabner I., Iron Oxides as Major Available Interface Component in Loamy Arable Topsoils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2011, Vol. 75, pp. 2158–2168.
42. Senesi N., Loffredo E., Metal ion complexation by soil humic substances, In: Sparks, D.L., Tabatabai, M.A. (Eds.) *Chemical Processes in Soil*. Soil Sci. Soc. of America, Inc., Madison, WI, 2005, pp. 563–618.
43. Solomon D., Lehmann J., Harden J., Wang J., Kinyangi J., Heymann K., Karunakaran C., Lu Y., Wirick S., Jacobsen C., Micro- and nano-environments of carbon sequestration: multi-element STXM-NEXAFS spectromicroscopy assessment of microbial carbon and mineral associations, *Chem. Geol.*, 2012, Vol. 329, pp. 53–73.
44. Totsche K., Amelung W., Gerzabek M., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., et al., Microaggregates in soils, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2018, Vol. 181, pp. 104–136.
45. Wagai R., Mayer L.M., Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, Vol. 71, pp. 25–35.

46. Weng L.P., Koopal L.K., Hiemstra T., Meeussen J.C.L., Van Riemsdijk W.H., Interactions of calcium and fulvic acid at the goethite-water interface, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, Vol. 69, pp. 325–339.
47. World Reference Base for soil resources 2014. A framework for international classification, correlation and communication, Word Soil Resource Report 106, FAO, Rome, 2014, 181 p.
48. Zhao Q., Poulson S.R., Obrist D., Sumaila S., Dynes J.J., McBeth J.M., Yang Yu., Iron-bound organic carbon in forest soils: quantification and characterization, *Biogeosciences*, 2016, Vol. 13, pp. 4777–4788.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106



### Ссылки для цитирования:

Юдина А.В., Фомин Д.С. Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 87-106.  
DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106

### Cite this article as:

Yudina A.V., Fomin D.S., Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 87-106,  
DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106

### Благодарность:

Анализ методом лазерной дифракции выполнен с привлечением оборудования ЦКП “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева (регистрационный номер 441994, <https://ckp-rf.ru/ckp/441994/>).

### Acknowledgments:

Analysis using laser diffraction method was carried out with the equipment of the Centre for Collective Use “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (registration number 441994, <https://ckp-rf.ru/ckp/441994/>).

## Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука

© 2023 г. А. В. Юдина\*, Д. С. Фомин\*\*

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\*<https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: [yudina\\_av@esoil.ru](mailto:yudina_av@esoil.ru),

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>.

Поступила в редакцию 15.05.2023, после доработки 29.05.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Элементарные почвенные частицы – первый специфичный для почв уровень иерархии структуры почвы, также являющийся объектом гранулометрического состава почв. Для диспергации твердой фазы почв до элементарных почвенных частиц необходимо разрушить прочные

связи между частицами с помощью физического воздействия. Эффективным способом физической диспергации является воздействие на почвенные суспензии ультразвуком. Однако в зависимости от типа почвы необходимый уровень энергии может варьировать, так как он определяется устойчивостью структуры почвы. В данной работе был проведен эксперимент с увеличивающейся в диапазоне от 65 до 1 101 Дж·мл<sup>-1</sup> энергией ультразвуковой диспергации при постоянной мощности равной 32.4 Ватт. Для эксперимента были выбраны верхние горизонты трех типов почв – дерново-подзолистой, серой лесной и чернозема суглинистого гранулометрического состава. Для этого был использован диспергатор зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со ступенчатым цельным наконечником (stepped solid horn tip, 13 мм). Установлено, что величина суммарной энергии диспергации  $E_t$ , необходимая для полного разрушения агрегатов почв до ЭПЧ, зависит от типа почв и варьирует в пределах 200–800 Дж·мл<sup>-1</sup> для суглинистых почв с содержанием органического вещества 1.8–4.6 г · 100 г<sup>-1</sup> почвы. Для пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу и последующего определения текстурного класса почв согласно классификации Качинского достаточной является величина  $E_t = 250$  Дж·мл<sup>-1</sup>, так как она позволяет получить максимальное количество физической глины (<10 мкм) при минимальной длительности пробоподготовки.

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, лазерная дифрактометрия, ультразвук, пробоподготовка, гранулометрический анализ, фракционирование почв.

## Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound

© 2023 A. V. Yudina\*, D. S. Fomin\*\*

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: [yudina\\_av@esoil.ru](mailto:yudina_av@esoil.ru),  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>.*

*Received 15.05.2023, Revised 29.05.2023, Accepted 27.06.2023*

**Abstract:** Elementary soil particles are the first soil-specific level in the soil structure hierarchy, which is also the object of the soil texture analysis. To disperse soil solids to elementary soil particles (ESP), it is necessary to break the strong bonds between particles by physical action. An effective way of

physical dispersion is to treat soil suspensions with ultrasound. However, depending on the type of soil, the required energy level varies, as it is determined by the stability of the soil structure. In this work the experiment with increasing energy (from 65 to 1 101 J·mL<sup>-1</sup>) of ultrasonic dispersion at constant power equal to 32.4 W is described. Soil samples from the upper horizons of three types of loamy soils (Retisol, Phaeozem, Chernozem) were used in the experiment. For this purpose, a horn-type ultrasonic disruptor Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, USA) with a stepped solid horn tip (13 mm) was used. It was found that the value of the total energy of dispersion  $E_t$  required for complete destruction of soil aggregates to ESP depends on soil type and varies within 200–800 J·mL<sup>-1</sup> for loamy soils with an organic matter content of 1.8–4.6 g · 100 g<sup>-1</sup> soil. For sample preparation of soils for grain-size analysis with a subsequent determination of soil texture class according to Kachinsky classification, the value  $E_t = 250 \text{ J·mL}^{-1}$  is sufficient, as it allows obtaining the maximum amount of physical clay (<10 µm) at the minimum duration of sample preparation.

**Keywords:** soil texture, laser diffractometry, pretreatment, grain-size analysis, soil fractionation.

## ВВЕДЕНИЕ

Элементарные почвенные частицы (ЭПЧ, elementary soil particles) – твердофазные продукты почвообразования, представленные обломками горных пород и минералов, органо-минеральными и органическими частицами, все компоненты которых находятся в химическом и физико-химическом взаимодействии ([Воронин, 1984](#); [Юдина и др., 2018](#)). ЭПЧ является первым специфичным для почвы как природного тела уровнем иерархии структурной организации ([Воронин, 1984](#); [Позанов, 1983](#); [Yudina, Kuzyakov, 2023](#)), а также объектом измерений в гранулометрическом анализе почв ([Юдина и др., 2018](#)). Существующие стандарты гранулометрического анализа почв и грунтов ([ГОСТ 12536-2014](#); [ISO 11277:2009](#)) и наиболее распространенные в научно-практической экспертизе методы (пирофосфатный способ пробоподготовки, [Шеин и др., 2007](#)) основаны на комбинации химических и физических приемов диспергации почвенных частиц. Для определения размера первичных элементов почв, т. е. минеральных частиц, необходимо удалить клеящие вещества, преимущественно представленные органо-минеральными соединениями и

оксидами, гидроксидами металлов. Для этого используются различные способы окисления органических веществ и экстракции соединений Fe, Al ([Юдина и др., 2018](#)). Физические этапы пробоподготовки почвы не стандартизированы количественно по оказываемому механическому воздействию. Для решения проблемы стандартизации воздействия был предложен ультразвуковой (УЗ) метод диспергации почвы ([Edwards, Bremner, 1967](#); [Березин, 1983](#)).

В данный момент не существует общепризнанных величин выходной мощности (output power, Ватт или Дж·сек<sup>-1</sup>) и суммарной энергии (total energy,  $E_t$ , Дж·мл<sup>-1</sup>) диспергации почв УЗ, несмотря на широкое распространение метода ультразвуковой диспергации почв для подготовки почв к анализу гранулометрического состава ([Polakowski et al., 2018](#)), ферментативной активности почв ([Stemmer et al., 1998](#)), выделения пулов органического вещества ([Poeplau et al., 2018](#); [Büks, 2023](#)). Сравнение оказываемого воздействия УЗ на почвенные образцы необходимо проводить при известных мощности, времени воздействия ( $t$ , сек), концентрации (соотношение почва : жидкость) и объема ( $V$ , мл) почвенной суспензии. Наиболее распространенным способом калибровки выходной мощности УЗ является калориметрический метод, предложенный North ([1976](#)). Мощность УЗ имеет качественно разное воздействие на почвенные частицы. При недостаточной мощности УЗ использование высокой суммарной энергии диспергации не приведет к разрушению прочных связей между частицами почвы. Поэтому при пробоподготовке почвенных образцов для достижения достаточной мощности преимущественно используются УЗ диспергаторы зондового типа (horn-type), имеющие мощность в десятки – сотни Ватт.

Воздействие УЗ на почвы разного состава, генезиса и землепользования может различаться как по силе, так и по форме ([Kaiser et al., 2014](#)). В исследовательских работах суммарная энергия УЗ диспергации  $E_t$  образцов почв варьирует в пределах от 7 до 5 350 Дж·мл<sup>-1</sup> ([Mentler et al., 2017](#)). Однако  $E_t$  равная 450–500 Дж·мл<sup>-1</sup> считается достаточной для диспергации образцов большинства почв ([Amelung et al., 1999](#), при заявленной приборной мощности  $P = 49$  Ватт; [Schmidt et al., 1999](#), мощность согласно

калориметрическому методу  $P = 75$  Ватт). При высоких значениях энергии диспергации может изменяться состав почвенного образца. Например, минералы песчаной фракции почв, развитые на вулканических пеплах, могут разрушаться при достижении  $E_t$  значений свыше  $400\text{--}1500 \text{ Дж}\cdot\text{мл}^{-1}$  (Hunter, Bussaca, 1989,  $P = 39.9$  Ватт). Также при значениях  $E_t$  выше  $500 \text{ Дж}\cdot\text{мл}^{-1}$  происходит разрушение дисперсного органического вещества (particulated organic matter) (Amelung et al., 1999,  $P = 49$  Ватт). В слаборазвитых и молодых почвах может наблюдаться разрушение почвенных частиц при достижении  $E_t = 1\,500 \text{ Дж}\cdot\text{мл}^{-1}$  (Kaiser et al., 2012,  $P = 52.7$  Ватт). Для почв, развитых на известняках, не рекомендуется использовать встряхивание и УЗ, так как хрупкие и пористые фрагменты карбоната кальция будут разрушаться (Kerry et al., 2009). В процессе диспергации УЗ может происходить разрушение зерен кварца, что было диагностировано по появлению острых осколков кварца при увеличении времени УЗ воздействия (Chappell, 1998, использованная мощность УЗ не указана). Энергия диспергации отличается для почв разного типа землепользования. Пахотные почвы требуют меньше затрат энергии на диспергацию по сравнению с природными (Eriksen et al., 1995).

Единого уровня диспергации твердой фазы почв не существует, так как интенсивность необходимого воздействия будет зависеть от устойчивости агрегатов (Cerli et al., 2012). Однако попытки найти универсальное значение энергии диспергации не прекращаются, так как это необходимо для стандартизации базовых анализов. Подробный эксперимент по влиянию мощности УЗ на диспергацию был проведен для тех образцов почв из слоя  $0\text{--}10$  см различного гранулометрического состава (coarse sand, loam, sandy loam) (Poeplau, Don, 2014). В эксперименте оценивали влияние мощности УЗ на количество частиц  $<63$  мкм, концентрацию общего органического углерода и  $\delta^{13}\text{C}$  в этой же фракции почвенных частиц. Мощность УЗ была выбрана в пределах от  $5$  до  $122.4$  Ватт. Согласно результатам работы, минимальная необходимая для диспергации почв до стабильного состояния мощность УЗ составляет  $50$  Ватт. Данное значение мощности воздействия УЗ является достаточно высоким и может приводить к разрушению дисперсного органического вещества, из-за чего рекомендуется его удаление

после низкого воздействия УЗ ([Amelung et al., 1999](#)), например, по схеме Golchin et al. ([1994](#)).

Цель данной работы – на примере верхних горизонтов дерново-подзолистой, серой лесной почвы и чернозема суглинистого гранулометрического состава определить величину суммарной энергии УЗ, необходимую для диспергации почвенной суспензии до ЭПЧ. Для минимизации разрушения дисперсного органического вещества почв нами был выбран средний уровень мощности УЗ, равный 32.4 Ватт. Для регистрации изменений размера частиц при увеличении энергии воздействия был использован метод лазерной дифракции, результатом которого является детальное распределение частиц по размерам ([Юдина и др., 2021](#); [Polakowski et al., 2018](#)). Наша гипотеза состоит в том, что в диапазоне суммарной энергии диспергации от 11 до 1 101 Дж·мл<sup>-1</sup> содержание ила (<1 мкм), физической глины (<10 мкм) и среднего объемного размера частиц достигнут стабильного состояния и выйдут на уровень плато, на основе которого мы сможем определить минимальное значение энергии для диспергации почвы до ЭПЧ.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись верхние горизонты трех почв тяжелого гранулометрического состава, контрастные по содержанию органического вещества: агродерново-слабоподзолистая (*Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic, Differentic)*) – опытное поле Зеленоградского опорного пункта ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, N: 56.131622° с. ш., E: 37.802792° в. д.); серая лесная (*Greyic Phaeozems (Albic)*) – широколиственный лес Тульских засек рядом с с. Крапивна, Тульская обл., N: 53.93304° с. ш., E 37.09259° в. д.); агрочернозем миграционно-мицеллярный среднепахотный средне карбонатный (*Haplic Chernozem (Loamic, uperhumic, Pachic)*) – лесополоса, Курский НИИ АПП, N: 51.59946° с. ш., E: 36.23127° в. д.). Содержание углерода в образцах почв представлено в таблице 1.

Образцы почв перед анализом были высушены до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях, далее гомогенизированы пестиком с резиновым наконечником с параллельным удалением растительных остатков с помощью пинцета и просеяны

через сито 2 мм.

**Таблица 1.** Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в исследованных образцах почв

**Table 1.** The organic carbon content in studied soil samples

| Почва                                                                                                        | Горизонт<br>(мощность, см) | $C_{\text{орг}}$<br>(г · 100 г <sup>-1</sup> почвы) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Дерново-подзолистая<br>( <i>Albic Glossic Retisols</i><br>( <i>Loamic, Cutanic,</i><br><i>Differentic</i> )) | Ap (0–10)                  | 1.84                                                |
| Серая лесная ( <i>Greyic</i><br><i>Phaeozems (Albic)</i> )                                                   | A (0–15)                   | 3.58                                                |
| Чернозем ( <i>Haplic</i><br><i>Chernozem (Loamic,</i><br><i>yperhumic, Pachic</i> ))                         | Ap (0–10)                  | 4.67                                                |

***Пробоподготовка образцов***

Обработка УЗ осуществлялась на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со ступенчатым цельным наконечником (stepped solid horn tip, 13 мм, 101-147-038). Калибровка мощности УЗ осуществлена в дистиллированной воде калориметрически согласно общепринятой методике (North, 1976). Выходная мощность  $P$  составляла 32.4 Ватт при выставленной на блоке управления диспергатором мощности 50%. Суспензии почв концентрацией 1–3% и объемом 15 мл озвучивались в пластиковых стаканчиках в течение различных периодов времени, для которых была предварительно рассчитана величина суммарной энергии диспергации (Дж·мл<sup>-1</sup>) (табл. 2). Во избежание перегрева суспензий время однократного озвучивания не превышало 2.5 минут.

***Измерение размеров частиц***

Все определения распределений частиц по размерам проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave

(Microtrac, США) в трехкратной повторности. Обработка дифрактограмм проведена с помощью ПО анализатора Microtrac FLEX 11. Используемые при обработке параметры твердой фазы – частицы абсорбирующие, изометричной формы.

**Таблица 2.** Время и соответствующим величины суммарной энергии диспергации почвенных суспензий объемом 15 мл и концентрацией 1–3% использованные в эксперименте ( $P = 32.4$  Ватт)

**Table 1.** Time and corresponding total energy of ultrasonic dispersion of soil suspensions (15 ml) having concentration 1–3% used in the experiment ( $P = 32.4$  W).

| №<br>варианта | Время воздействия<br>(мин) | Суммарная энергия УЗ<br>(Дж·мл <sup>-1</sup> ) |
|---------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| 1             | 0.5                        | 65                                             |
| 2             | 1                          | 130                                            |
| 3             | 1.5                        | 194                                            |
| 4             | 2                          | 259                                            |
| 5             | 2.5                        | 324                                            |
| 6             | 3                          | 389                                            |
| 7             | 3.5                        | 453                                            |
| 8             | 4.5                        | 583                                            |
| 9             | 5.5                        | 712                                            |
| 10            | 6.5                        | 842                                            |
| 11            | 7.5                        | 971                                            |
| 12            | 8.5                        | 1 101                                          |

Для каждого из полученных распределений частиц почв по размерам были рассчитаны следующие параметры – средний объемный размер частиц (MVD, мкм), содержание ила (сумма частиц <1 мкм) согласно российской классификации гранулометрических элементов почв (ИЛ<sub><1</sub>, %), содержание физической глины (сумма частиц меньше 10 мкм, ФЗГ<sub><10</sub>, %).

### ***Моделирование взаимосвязей между дисперсностью почвы и энергией диспергации***

Аппроксимация данных по взаимосвязи содержания ила и

физической глины с суммарной энергией диспергации проводилась с использованием экспоненциальной функции ([Демьянов, Савельева, 2010](#)):

$$v = c \times \left(1 - \exp\left(1 - \frac{3 \times E}{E_{INF}}\right)\right) \text{ (уравнение 1),}$$

где  $v$  – содержание частиц (%),  $E$  – суммарная энергия диспергации ( $\text{Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ );  $c$  – плато, т. е. равновесное содержание частиц при данном типе диспергации (%);  $E_{INF}$  – пороговая суммарная энергия ( $\text{Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ ), достаточная для достижения содержания частиц до уровня плато.

Для аппроксимации данных взаимосвязи среднего размера частиц и суммарной энергией диспергации к уравнению 1 был добавлен стартовый параметр  $c_0$ :

$$v = c_0 + (c - c_0) \times \left(1 - \exp\left(1 - \frac{3 \times E}{E_{INF}}\right)\right) \text{ (уравнение 2),}$$

где  $c_0$  – точка пересечения функции с осью ординат.

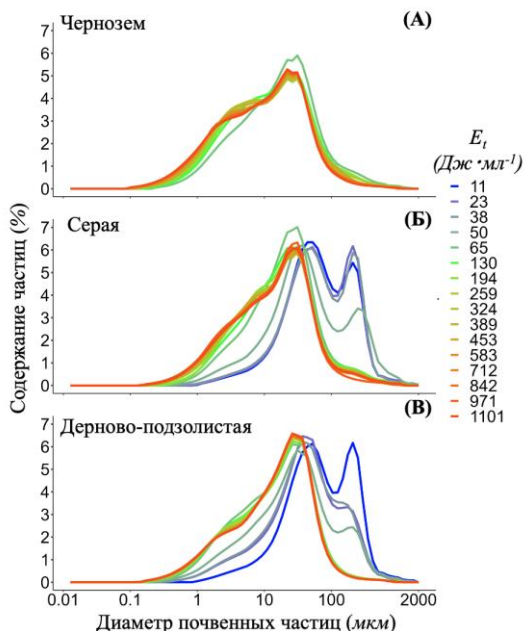
### **Статистическая обработка**

Статистическая обработка и визуализация выполнялись в среде R 4.2.1. Расчет базовых статистик выполнялся с использованием пакета *broom* ([Robinson, 2014](#)). Визуализация с использованием пакета *ggplot2* ([Wickham et al., 2016](#)). Доверительный интервал рассчитывался как двусторонний с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$ .

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Анализ распределений частиц по размерам показывает динамику изменения содержания частиц отдельных фракций при увеличении энергии диспергации. Для всех почв распределения частиц по размерам, полученные при минимальном уровне воздействия УЗ на твердую фазу почв ( $E_t = 11 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ ), характеризуются наличием максимума в диапазоне размеров частиц песка от 100 до 2 000 мкм (рис. 1). При увеличении энергии УЗ диспергации до  $65 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$  происходит постепенная дезагрегация частиц крупнее 100 мкм. И при диспергации с использованием  $E_t = 65 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$  частицы крупнее 100 мкм почти полностью разрушаются. Увеличение суммарной энергии диспергации свыше

65 Дж·мл<sup>-1</sup> приводит к снижению содержания пылеватых частиц в диапазоне размеров 1–10 мкм.



**Рис. 1.** Дифференциальные кривые содержания (ось Y, %) частиц различного диаметра (ось X, мкм), полученные при увеличивающемся воздействии УЗ на почвенные суспензии (суммарная энергия  $E_t$ , Дж·мл<sup>-1</sup>, легенда в правой части рисунка): (А) чернозем; (Б) серая лесная; (В) дерново-подзолистая почвы. Выходная мощность  $P$  составляла 32.4 Ватт.

**Fig. 1.** Differential curves of the content (Y axis, %) of particles of different diameters (X axis,  $\mu\text{m}$ ) obtained with increasing ultrasonic energy on soil suspensions (total energy  $E_t$ ,  $\text{J}\cdot\text{mL}^{-1}$ , legend in the right part of the figure): (А) Chernozem; (Б) Phaeozem; (В) Retisol. The output power  $P$  was equal to 32.4 W.

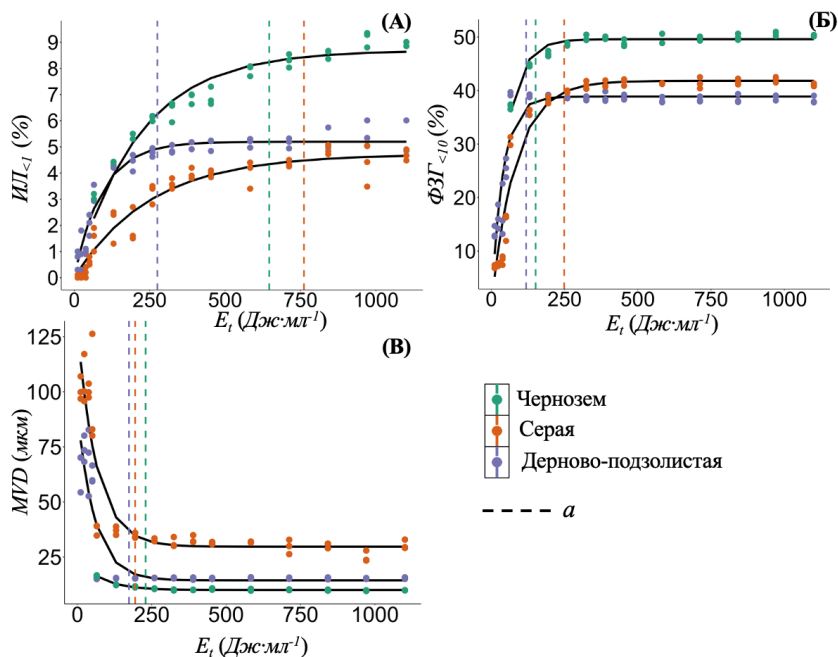
Содержание ила является наиболее чувствительным показателем при анализе устойчивости почвы к диспергации УЗ. При увеличении энергии диспергации происходит постепенное увели-

чение количества илистых частиц в суспензии (рис. 2А). Максимальное содержание илистых частиц составляет  $8.69 \pm 0.15\%$  для чернозема,  $4.72 \pm 0.16\%$  – для серой почвы,  $5.20 \pm 0.09\%$  – для дерново-подзолистой почвы (табл. 2). Для дерново-подзолистой почвы необходимое количество суммарной энергии для полного выхода илистой фракции значимо ниже по сравнению с серой лесной почвой и черноземом и составляет  $275 \pm 21$  Дж·мл<sup>-1</sup>. Пороговая суммарная энергия в 2.4 раза для серой лесной почвы ( $646 \pm 37$  Дж·мл<sup>-1</sup>) и в 2.8 раза ( $762 \pm 73$  Дж·мл<sup>-1</sup>) для чернозема выше, чем для дерново-подзолистой почвы.

Содержание физической глины резко изменяется с увеличением энергии диспергации (рис. 2Б), поэтому значение пороговой суммарной энергии для физической глины в среднем в 3 раза ниже, чем для ила. Содержание физической глины является чувствительным параметром к типу почв, потому что между  $E_{INF}$  исследованными почвами наблюдаются статистические различия. Полная суммарная энергия диспергации физической глины минимальная для дерново-подзолистой почвы и составляет  $119 \pm 9$  Дж·мл<sup>-1</sup>. Для серой лесной почвы  $E_{INF}$  в 1.3 раза ( $151 \pm 5$  Дж·мл<sup>-1</sup>), а для черноземов в 2.1 раза ( $249 \pm 17$  Дж·мл<sup>-1</sup>) выше, чем для дерново-подзолистой почвы.

$E_{INF}$  для частиц среднего размера в среднем на 13% выше, чем для физической глины (рис. 2В). Однако суммарная энергия диспергации до ЭПЧ между исследованными почвами очень близка, и статистических различий не обнаружено (табл. 1).

Выбор режима диспергации почв УЗ зависит от устойчивости связей между частицами и заключается в выборе двух параметров – мощности  $P$  и суммарной энергии  $E_t$ . В аналогичном проведенному нами эксперименте Poreplau and Don (2014) был сделан вывод, что необходимая мощность для разрушения связей между почвенными частицами в агрегатах составляет 50 Ватт. Авторы использовали тот же ультразвуковой диспергатор и наконечник большего диаметра (19 мм), однако работали с большим в 10 раз объемом суспензии (150 мл). Чем меньше диаметр наконечника, тем выше амплитуда УЗ. Выбранный рабочий объем влияет на долю объема суспензии, находящуюся в непосредственной зоне воздействия УЗ.



**Рис. 2.** Изменение содержания (ось Y): (А) – частиц ила ( $\text{ИЛ}_{<1}$ , %), (Б) – физической глины ( $\text{ФЗГ}$ , %), (В) – среднего объемного диаметра (MVD,  $\mu\text{m}$ ) почвенных частиц при увеличении суммарной энергии УЗ диспергации (ось X,  $E_t$ ) в образцах дерново-подзолистой почвы (фиолетовый цвет), серой лесной почвы (оранжевый цвет) и чернозема (зеленый цвет) (легенда в нижнем правом секторе графика).  $a$  – пороговое значение  $E_t$ , необходимое для диспергации твердой фазы почвы до элементарных почвенных частиц.

**Fig. 1.** Changes in the content (Y axis): (А) – clay particles ( $\text{ИЛ}_{<1}$ , %), (Б) – physical clay ( $\text{ФЗГ}$ , %), (В) – mean volume diameter (MVD,  $\mu\text{m}$ ) of soil particles with increasing total ultrasonic dispersion energy (X axis,  $E_t$ ,  $\text{J}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) in samples of Chernozem (green dots), Phaeozem (orange dots) and Retisol (purple dots) (legend in the lower right sector of the figure).  $a$  is the threshold value of  $E_t$  necessary for dispersion of the soil solid phase into elementary soil particles.

**Таблица 2.** Параметры аппроксимации кривых зависимости содержания ила, физической глины и среднего объемного диаметра частиц от величины суммарной энергии диспергации суспензий почв УЗ ( $E_t \sim \text{ИЛ}_{<1}$ ,  $E_t \sim \Phi\text{ЗГ}_{<10}$ ,  $E_t \sim \text{MVD}$  соответственно):  $c$  – уровень плато, соответствующий максимальному содержанию ила, физической глины или минимальному среднему размеру частиц соответственно;  $a$  – пороговое значение  $E_t$  (Дж·мл<sup>-1</sup>),  $c_0$  – начальный средний размер частиц суспензии почвы (мкм). \* – статистически значимые отличия между образцами почв ( $p < 0.05$ )

**Table 2.** Parameters of approximation of relationships between the clay content, the physical clay, the mean volume diameter of particles, and the value of total energy of dispersion of soil suspensions by US ( $E_t \sim \text{ИЛ}_{<1}$ ,  $E_t \sim \Phi\text{ЗГ}_{<10}$ ,  $E_t \sim \text{MVD}$ , respectively):  $c$  – plateau level corresponding to the maximum content of clay, physical clay or minimum mean particle size, respectively;  $a$  – threshold value of  $E_t$  (J·mL<sup>-1</sup>),  $c_0$  – initial mean size of soil particles in suspensions (μm). \* – statistically significant differences between soil samples ( $p < 0.05$ )

| Функция                        | Почва               | $c$                | $E_{\text{INF}}$ | $c_0$         |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|
| $E_t \sim \text{ИЛ}_{<1}$      | Чернозем            | $8.69 \pm 0.15^*$  | $646 \pm 37$     | –             |
|                                | Серая лесная        | $4.72 \pm 0.16$    | $762 \pm 73$     | –             |
|                                | Дерново-подзолистая | $5.20 \pm 0.09$    | $275 \pm 21^*$   | –             |
| $E_t \sim \Phi\text{ЗГ}_{<10}$ | Чернозем            | $49.6 \pm 0.18^*$  | $151 \pm 4^*$    | –             |
|                                | Серая лесная        | $41.82 \pm 0.64^*$ | $249 \pm 17^*$   | –             |
|                                | Дерново-подзолистая | $38.88 \pm 0.58^*$ | $119 \pm 9^*$    | –             |
| $E_t \sim \text{MVD}$          | Чернозем            | $10.02 \pm 0.07^*$ | $229 \pm 15$     | $25 \pm 1^*$  |
|                                | Серая лесная        | $29.68 \pm 2.42^*$ | $194 \pm 35$     | $129 \pm 9^*$ |
|                                | Дерново-подзолистая | $14.40 \pm 1.96^*$ | $173 \pm 34$     | $91 \pm 8^*$  |

От мощности УЗ также зависит скорость циркуляции объема диспергируемой жидкости. Соответственно, чем меньше объем и выше мощность, тем большая часть рабочего объема суспензии подвергается воздействию УЗ в единицу времени.

Выбранная нами мощность УЗ равная 32.4 Ватт была обусловлена минимизацией разрушения дисперсного органического вещества (Amelung et al., 1999), которое может быть заключено в микроагрегатах почв. Также УЗ низкой мощности используется для подготовки почв к микробиологическим и биохимическим

анализам, чтобы избежать разрушение клеток и ферментов (например, 30 Ватт – [Neumann et al., 2013](#); 40 Ватт – [Zhou et al., 2021](#)).

Проведенный нами эксперимент показал, что разрушение твердой фазы серой лесной и дерново-подзолистой почв, имеющих ярко выраженный максимум в диапазоне частиц 100–1000 мкм, делится на два этапа по границе суммарной энергии диспергации  $E_t$  равной 65 Дж·мл<sup>-1</sup> (рис. 1): ниже этой границы разрушаются крупные агрегаты (>100 мкм), выше – мелкие агрегаты в диапазоне частиц 0–10 мкм. Таким образом, предположительно, в исследованных почвах существуют два пула микроагрегатов почв – низкой и высокой устойчивости.

Найденные нами пороговые значения  $E_t$  для чернозема и серой лесной почвы (646 и 762 Дж·мл<sup>-1</sup> соответственно), необходимые для максимальной диспергации образцов почв, оцененной нами по увеличению количества частиц ила (рис. 2А, табл. 2) выше значения  $E_t$ , установленного другими исследователями и равному 500 Дж·мл<sup>-1</sup> ([Amelung et al., 1999](#); [Schmidt et al., 1999](#)). Значение  $E_t$ , установленное для дерново-подзолистой почвы, значительно ниже (275 Дж·мл<sup>-1</sup>), и, вероятно, связано с более низким содержанием органического вещества почвы (табл. 1), являющимся основным агрегирующим агентом органо-аккумулятивных горизонтов почв. Таким образом, величина энергии диспергации почв до ЭПЧ варьирует в пределах сотен Дж·мл<sup>-1</sup> и зависит от типа почвы.

Величина энергии, выше которой не происходит значимого изменения содержания физической глины, является искомой энергией диспергации, необходимой для подготовки почв к гранулометрическому анализу и определения класса почв согласно классификации Качинского. Для исследованных образцов чернозема, серой лесной и дерново-подзолистой почв она значительно отличалась и составляла 151, 249 и 119 Дж·мл<sup>-1</sup> соответственно. Эти данные подтверждают гипотезу Cerli et al. ([2012](#)), что энергия диспергации будет варьировать для различных по генезису образцов почв. Более высокая энергия диспергации серой лесной почвы предположительно связана с дисперсным органическим веществом, которое может быть заключено в большом количестве в крупных

микроагрегатах, и, соответственно, может разрушаться при более высоких суммарных энергиях воздействия УЗ.

Средний объемный диаметр (MVD, мкм) частиц не является подходящим параметром для оценки способов пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу, так как для него не было выявлено значимых различий между исследованными образцами почв (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного эксперимента с образцами дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема, с увеличением суммарной энергии  $E_t$  диспергации почвенных суспензий в диапазоне 65–1101 Дж·мл<sup>-1</sup> почвы при постоянной мощности УЗ равной 32.4 Ватт установлено:

1) величина  $E_t$ , необходимая для полного разрушения агрегатов почв до ЭПЧ, зависит от типа почв и варьирует в пределах 200–800  $E_t$  для суглинистых почв с содержанием органического вещества 1.8–4.6 г · 100 г<sup>-1</sup> почвы;

2) для пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу и последующего определения класса почв согласно классификации Качинского достаточной является величина  $E_t = 250$  Дж·мл<sup>-1</sup>, так как она позволяет получить максимальное количество физической глины при минимальной длительности пробоподготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин П.Н. Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород // Почвоведение. 1983. № 2. С. 64–72.
2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: изд. МГУ, 1984. 205 с.
3. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
4. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
5. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: изд. МГУ, 1983. 320 с.

6. *Шеин Е.В. и др.* Теории и методы физики почв. М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
7. *Юдина А.В. и др.* От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. №. 11. С. 1340–1362.
8. *Amelung W., Zech W.* Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons // *Geoderma*. 1999. Vol. 92. Iss. 1–2. P. 73–85.
9. *Büks F.* The recovery rate of free particulate organic matter from soil samples is strongly affected by the method of density fractionation // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20 (7). P. 1529–1535.
10. *Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K.* Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level // *Geoderma*. 2012. Vol. 170. P. 403–416.
11. *Chappell A.* Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction // *Catena*. 1998. Vol. 31. P. 271–281.
12. *Edwards A.P., Bremner J.M.* Use of sonic vibration for separation of soil particles // *Canadian Journal of Soil Science*. 1964. Vol. 44. P. 366.
13. *Eriksen J., Lefroy R.D.B., Blair G.J.* Physical protection of soil organic S studied using acetylacetone extraction at various intensities of ultrasonic dispersion // *Soil Biology and Biochemistry*. 1995. Vol. 27. P. 1005–1010.
14. *Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy // *Soil Res*. 1994b. Vol. 32. P. 285–309.
15. *Hunter C.R., Busacca A.J.* Dispersion of three andic soils by ultrasonic vibration // *Soil Science Society of America Journal*. 1989. Vol. 53. P. 1299–1302.
16. ISO 11277:2009. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Geneva. International Organization for Standardization.
17. *Kaiser M., Berhe A.A.* How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? – A review // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2014. Vol. 177. P. 479–495.
18. *Kerry R., Rawlins B.G., Oliver M.A., Lacinska A.M.* Problems with determining the particle size distribution of chalk soil and some of their implications // *Geoderma*. 2009. Vol. 152. P. 324–337.
19. *Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H.* Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate // *Int. Agrophysics*. 2017. Vol. 31. P. 582–588.

20. Neumann D., Heuer A., Hemkemeyer M., Martens R., Tebbe C.C. Response of microbial communities to long-term fertilization depends on their microhabitat // *FEMS Microbiology Ecology*. 2013. Vol. 86 (1). P. 71–84.
21. North P.F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound // *Journal of Soil Science*. 1976. Vol. 27. P. 451–459.
22. Poeplau C., Don A. Effect of ultrasonic power on soil organic carbon fractions // *Journal of plant nutrition and soil science*. 2014. Vol. 177 (2). P. 137–140.
23. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., ..., Nieder R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 125. P. 10–26.
24. Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryzak M., Zaleski T., Beczek M., ..., Bieganski A. Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis // *Geoderma*. 2023. Vol. 430. P. 116358.
25. Robinson D. broom: And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames // *arXiv preprint arXiv:1412.3565*. 2014.
26. Schmidt M.W.I., Rumpel C., Kögel- Knabner I. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils // *European Journal of Soil Science*. 1999. Vol. 50. P. 87–94.
27. Stemmer M., Gerzabek M. H., Kandeler E. Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. Vol. 30. No. 1. P. 9–17.
28. Wickham H., Chang W., Wickham M.H. Package ‘ggplot2’ // *Create elegant data visualisations using the grammar of graphics*. Version. 2016. Vol. 2. No. 1. P. 1–189.
29. Yudina A., Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores // *Geoderma*. 2023. Vol. 434. P. 116478.
30. Zhou J., Gui H., Banfield C.C., Wen Y., Zang H., Dippold M.A., Charlton A., Jones D.L. The microplastisphere: Biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 156. 108211.

## REFERENCES

1. Berezin P.N., Osobennosti raspredeleniya granulometricheskikh elementov pochv i pochvoobrazuyushchikh porod (Distribution of particle-size elements in soils and parent rocks), *Pochvovedenie*, 1983, No. 2, pp. 64–72.
2. Voronin A.D., *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv* (Structural-functional hydrophysics of soils), Moscow: izd. MGU, 1984, 205 p.

3. State standard. GOST 12536-2014 Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution.
4. Demyanov V.V., Savelyeva E.A., *Geostatistics. Theory and Practice*. Moscow: Nauka, 2010, 327 p.
5. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: izd. MGU, 1983, 320 p.
6. Shein E.V., Karpachevskii L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: "Grif i K", 2007, 616 p.
7. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian Soil Science*, 2018, No. 51, pp. 1326–1347.
8. Amelung W., Zech W., Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons, *Geoderma*, 1999, Vol. 92, Iss. 1–2, pp. 73–85.
9. Büks F., The recovery rate of free particulate organic matter from soil samples is strongly affected by the method of density fractionation, *Biogeosciences*, 2023, Vol. 20 (7), pp. 1529–1535.
10. Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K., Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level, *Geoderma*, 2012, Vol. 170, pp. 403–416.
11. Chappell A., Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction, *Catena*, 1998, Vol. 31, pp. 271–281.
12. Edwards A.P., Bremner J.M., Use of sonic vibration for separation of soil particles, *Canadian Journal of Soil Science*, 1964, Vol. 44, p. 366.
13. Eriksen J., Lefroy R.D.B., Blair G.J., Physical protection of soil organic S studied using acetylacetone extraction at various intensities of ultrasonic dispersion, *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, Vol. 27, pp. 1005–1010.
14. Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P., Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy, *Soil Res.*, 1994, Vol. 32, pp. 285–309.
15. Hunter C.R., Busacca A.J. Dispersion of three andic soils by ultrasonic vibration, *Soil Science Society of America Journal*, 1989, Vol. 53, pp. 1299–1302.
16. ISO 11277:2009. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Geneva. International Organization for Standardization.

17. Kaiser M., Berhe A.A., How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? – A review, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, Vol. 177, pp. 479–495.
18. Kerry R., Rawlins B.G., Oliver M.A., Lacinska A.M., Problems with determining the particle size distribution of chalk soil and some of their implications, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, pp. 324–337.
19. Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H., Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate, *Int. Agrophysics*, 2017, Vol. 31, pp. 582–588.
20. Neumann D., Heuer A., Hemkemeyer M., Martens R., Tebbe C.C., Response of microbial communities to long-term fertilization depends on their microhabitat, *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, Vol. 86 (1), pp. 71–84.
21. North P.F., Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound, *Journal of Soil Science*, 1976, Vol. 27, pp. 451–459.
22. Poeplau C., Don A., Effect of ultrasonic power on soil organic carbon fractions, *Journal of plant nutrition and soil science*, 2014, Vol. 177 (2), pp. 137–140.
23. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., ..., Nieder R., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26.
24. Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryzak M., Zaleski T., Beczek M., ..., Bieganski A., Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis, *Geoderma*, 2023, Vol. 430, pp. 116358.
25. Robinson D., broom: And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames, *arXiv preprint arXiv:1412.3565*, 2014.
26. Schmidt M.W.I., Rumpel C., Kögel-Knabner I., Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils, *European Journal of Soil Science*, 1999, Vol. 50, pp. 87–94.
27. Stemmer M., Gerzabek M. H., Kandeler E., Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication, *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, Vol. 30, No. 1, pp. 9–17.
28. Wickham H., Chang W., Wickham M.H., Package ‘ggplot2’, Create elegant data visualisations using the grammar of graphics, *Version*, 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 1–189.
29. Yudina A., Kuzyakov Y., Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, pp. 116478.
30. Zhou J., Gui H., Banfield C.C., Wen Y., Zang H., Dippold M.A., Charlton A., Jones D.L., The microplastisphere: Biodegradable microplastics

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, 115

addition alters soil microbial community structure and function, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 156, 108211.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-107-128



### Ссылки для цитирования:

Федотова А.В., Умарова А.Б., Шваров А.П., Яковлева Л.В. Динамика физических свойств почв и запасов гумуса в засоленных почвах в условиях опустынивания // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 107-128. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-107-128

### Cite this article as:

Fedotova A.V., Umarova A.B., Shvarov A.P., Yakovleva L.V., Dynamics of physical properties of soils and humus reserves in salted soils under desertification, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 107-128, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-107-128

## Динамика физических свойств почв и запасов гумуса в засоленных почвах в условиях опустынивания

© 2023 г. А. В. Федотова<sup>1\*</sup>, А. Б. Умарова<sup>2\*\*</sup>, А. П. Шваров<sup>2</sup>,  
Л. В. Яковлева<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева,  
Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 20а,

\*<https://orcid.org/0000-0003-0241-1797>, e-mail: [fedotova@asu.edu.ru](mailto:fedotova@asu.edu.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2240-9291>.

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2124-8657>.

Поступила в редакцию 02.03.2023, после доработки 23.03.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Представлена динамика физических свойств и запасов гумуса в засоленных почвах засушливой полупустынной зоны. Основой для исследований явились данные наблюдений за 2010–2022 гг. в типичном бугровом ландшафте Астраханской области. Была заложена сетка 100 × 100 м. Исследования почв проводили в узлах сетки по слоям опробования. Изучали изменение физических свойств (влажность почвы; содержание солей по величине плотного остатка; плотность почвы; коэффициент фильтрации; порозность почвы; запас влаги), запасов

гумуса и солевого состояния засоленных почв в условиях опустынивания. Сравнительный анализ показал, что на исследуемой территории произошли негативные изменения и можно констатировать интенсивное развитие процессов деградации почв и опустынивания. Установлено, что в почвенном слое 0–40 см произошло значимое сокращение запасов почвенной влаги на фоне увеличения максимальных температур воздуха и поверхности почвы, а также изменения гидрологического режима в результате обваловки территории. Наблюдаются процессы дегумификации. Наиболее четко отрицательный тренд выявлен для луговых солончаков. Изменение гидрологического режима территории в результате обваловки способствует увеличению ареалов автоморфных почв в ландшафте и сокращению площадей луговых почв. Зафиксировано возрастание степени засоления и уплотнения для автоморфных зональных почв. Физическое разрушение бугров Бэра усугубляет процессы деградации и развития опустынивания в подобных условиях.

**Ключевые слова:** аридизация, деградация почв, засоление почв, дегумификация, запас влаги, плотность почвы, Астраханская область, бугры Бэра.

## Dynamics of physical properties of soils and humus reserves in salted soils under desertification

© 2023 A. V. Fedotova<sup>1\*</sup>, A. B. Umarova<sup>2\*\*</sup>, A. P. Shvarov<sup>2</sup>,  
L. V. Yakovleva<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Astrakhan Tatishchev State University,  
20a, Tatischev Str., Astrakhan 414056, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0003-0241-1797>, e-mail: [fedotova@asu.edu.ru](mailto:fedotova@asu.edu.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2240-9291>.

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0003-2124-8657>.

Received 02.03.2023, Revised 23.03.2023, Accepted 27.06.2023

**Abstract:** The dynamics of the physical properties and reserves of humus in saline soils of an arid semi-desert zone is presented. The basis for the research was observational data for 2010–2022. in a typical hilly landscape of the Astrakhan region. A grid of 100 × 100 m was laid. Soil studies were carried out at the grid nodes along the sampling layers. We studied the change in physical properties (soil moisture; salt content according to the amount of

dense residue; soil density; filtration coefficient; soil porosity; moisture reserve), humus reserves and salt state of saline soils under desertification. Comparative analysis showed that negative changes have taken place in the study area and it can be stated that the processes of soil degradation and desertification are intensively developing. It has been established that in the soil layer of 0–40 cm there was a significant reduction in soil moisture reserves against the background of an increase in maximum air and soil surface temperatures, as well as changes in the hydrological regime because of the embankment of the territory. Dehumification processes are observed. The most clearly negative trend was revealed for meadow solonchaks. The change in the hydrological regime of the territory because of embankment contributes to an increase in the areas of automorphic soils in the landscape and a reduction in the areas of meadow soils. An increase in the degree of salinity and compaction was recorded for automorphic zonal soils. The physical destruction of the Baer's hills exacerbates the processes of degradation and the development of desertification in such conditions.

**Keywords:** aridization, soil degradation, soil salinization, dehumification, moisture reserve, soil density, Astrakhan region, Baer's hills.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема деградации почвенного покрова и опустынивания является неоспоримым фактом в глобальном масштабе (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>). Можно говорить о катастрофическом развитии негативных процессов в почве практически во всех природно-климатических зонах. Для России наиболее сложная ситуация сложилась в южных засушливых регионах, усугубляемая развитием опустынивания.

Как правило, деградационные процессы экосистем, в том числе под влиянием климатических изменений, фиксируют по изменению состава растительных сообществ. В засушливых регионах индикаторами деградации и опустынивания является смещение видового состава растительности в сторону ксерофитов и галофитов (Яшин и др., 2012; Пугачева, 2020). По динамике растительных сообществ под влиянием климатических изменений существует большое число работ (Parmesan, Yohe, 2003; Dietrich et al., 2022), но особенности происходящих изменений в почвах освещены крайне скудно.

Однако происходящие изменения в растительном покрове

являются следствием нарушения экологических функций почвы, где именно физические свойства являются основой формирования лимитирующих факторов для развития растений. Важную роль в меняющихся климатических условиях имеет понимание вектора смещения физических свойств в условиях прогрессирующего опустынивания, осложненного засолением почв.

Термин “опустынивание” впервые использовал французский ученый Анри Обревиль в 1949 г. в докладе “Климат, леса и опустынивание в тропической Африке” ([Aubreville, 1949](#)). Опустынивание является следствием воздействия целого ряда факторов как природного, так и антропогенного характера и трактуется достаточно широко. Причиной опустынивания часто называют увеличение аридизации климата. Под понятием аридизации традиционно подразумевается сочетание дефицита влаги в атмосфере и в почве.

Дефицит почвенной влаги на фоне дефицита атмосферной влаги при глубоком залегании грунтовых вод, усиливающийся деградационными процессами, сопровождается изменением физических свойств/процессов. То есть ухудшаются водно-физические свойства почв, что, в свою очередь, ведет к “опустыниванию почв”. На это указывали Б.Г. Розанов, И.С. Зонн ([Розанов, Зонн, 1981](#)): “... степень аридизации почв можно количественно устанавливать в конкретных показателях водно-физических свойств и водного режима”.

А.Н. Золотокрылин ([2011](#)) утверждает, что динамика опустынивания является следствием взаимодействия процессов аридизации и деградации земель ([Золотокрылин, 2011](#)).

Однако в работе того же автора, спустя 10 лет, отмечено, что проведенные исследования трендов увлажнения в засушливых зонах Юга России показали взаимную компенсацию колебаний индекса аридности и отсутствие развития аридизации более чем за 100 лет. Авторы приходят к выводу, что основным фактором опустынивания все же является интенсивная деградация земель ([Золотокрылин, 2020](#)). А физическая деградация почв служит спусковым механизмом для большого количества опасных природных явлений, например, пыльных бурь, количество которых увеличилось в разы за последнее десятилетие в засушливых реги-

онах ([Zucca et al., 2022](#); [Leroy et al., 2022](#)).

Целью данного исследования явилось изучение динамики физических свойств и запасов гумуса засоленных почв в условиях опустынивания.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Анализ многолетних трендов (2000–2018 гг.) показал, что скорость роста деградации земель на фоне увеличения альбедо поверхности в засушливых регионах Европейской части России наиболее высока в Астраханской области, и здесь же отмечается положительный тренд для индекса аридности – около 5% ([Золотокрылин, 2020](#)).

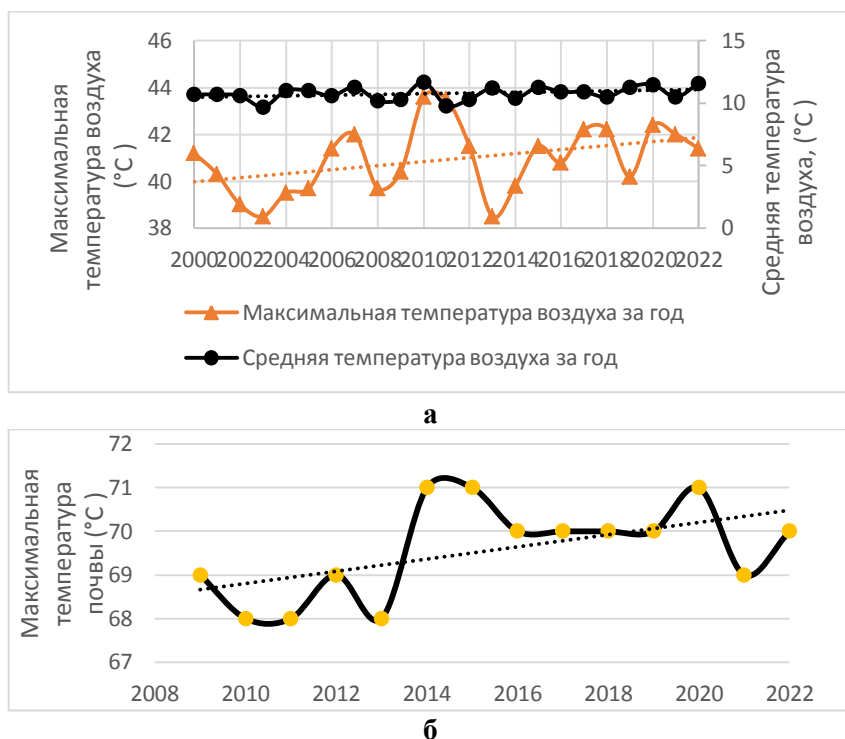
Динамику физических свойств почвы, а также запасов почвенной влаги и гумуса изучали на территории заложенного в 2010 г. стационарного участка в Икрянинском районе на юго-западе Астраханской области в пределах западной периферии Волжской дельты и восточной окраины района Западных под-степных ильменей. К числу наиболее распространенных процессов деградации почв в этой зоне относятся засоление, дефляция, обесструктурирование. В южных районах – опесчанивание.

Объект исследования представляет собой типичный антропогенно измененный бугровой ландшафт на территории дельты Волги в Астраханской области, имеющий специфический водный режим, осложненный обваловкой территорий в 70-е годы XX в.

Климат резко континентальный. Годовое количество осадков – на уровне 180–200 мм. Длительность безморозного периода – 170–190 дней.

По данным Астраханского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, максимальные величины температуры воздуха за 2000–2022 гг. характеризуются устойчивой тенденцией к увеличению и часто превышают отметку +40 °С. Средняя годовая температура воздуха также имеет тенденцию к незначительному увеличению (рис. 1а). В течение указанного периода отклонение от климатической нормы находилось в положительных пределах и в среднем составило +1.15 °С (максимальное в 2010 г. – +2.11 °С, минимальное в 2003 г. – +0.10 °С). Климат характеризуется значительными амплитудами колебания температур

воздуха, как годовых, так и суточных.



**Рис. 1.** Максимальные и средние температуры воздуха 2000–2022 гг. (**а**) и максимальные температуры поверхности почвы 2008–2022 гг. (**б**).

**Fig. 1.** Maximum and mean air temperatures 2000–2022 (**a**) and maximum soil surface temperatures 2008–2022 (**b**).

Максимальные температуры поверхности почвы в летний период выше +67 °C (рис. 1б) и имеют тенденцию к увеличению.

Рельеф представлен морской аккумулятивной равниной с ильменно-грядовыми ландшафтами, осложненной полигенетическими образованиями – бэзовскими буграми и ильменями в межбугровом пространстве ([Нижняя Волга..., 2002](#)).

Особенностью территории является наличие обвалованных участков, представленных постагrogenными почвами, выведен-

ными их хозяйственного использования более 30 лет назад, ранее используемых для выращивания пасленовых и культуры риса. Обваловка существенно изменила гидрологический режим участка. Территория оказалась отрезанной от влияния поверхностных паводковых вод в период весенне-летних половодий. Источниками поступления влаги в почву остались немногочисленные осадки и минерализованные грунтовые воды. Началось интенсивное развитие деградационных процессов, в первую очередь засоление, сопутствующее опустыниванию. Это привело к формированию на значительной площади солончаков. Засоление на объекте исследования присутствует исторически долго, трансформация экосистемы вышла на стационарный уровень. Хорошо видны зоны деградации и даже деструкции в результате засоления.

Наблюдения за динамикой базовых физических свойств почв, солевого состояния, запасов гумуса и почвенной влаги проводили с 2010 по 2022 гг. Характер динамики некоторых физических свойств может существенно отличаться по периодам в зависимости от климатических и гидрологических условий в конкретный момент времени.

Для выбора срока проведения ежегодных исследований был проведен анализ многолетних архивных климатических и гидрологических данных за 2000–2009 гг., который показал, что наименьшие амплитуды колебания температуры воздуха (средняя месячная температура воздуха 26.08 °C), количества осадков (среднемесячное количество осадков 5.88 мм) и низкий уровень воды в водотоках дельты Волги (средний уровень воды по гидропосту рукава Бахтемир составляет 277.00 см) характерны для августа месяца. Исходя из этого, полевые исследования и отбор почвенных проб проводился в августе (ориентировочно с 10 по 20 августа). За время проведения полевых исследований на объекте дни с осадками отсутствовали. В этих условиях многолетние стационарные наблюдения позволили установить общие тенденции изменения почв, определяющиеся почвенно-климатическими параметрами конкретного участка.

Одними из важнейших параметров, характеризующих степень деградации и опустынивания, являются физические свойства почв: влажность, запас влаги, плотность, порозность, водопрони-

цаемость, а также солевое состояние и запасы гумуса.

Отбор проб для лабораторных анализов и стационарные определения почвенных свойств почв осуществляли непосредственно на исследуемом участке в узлах равномерной сетки с шагом 10 м на участке 100 × 100 м. Перепад высот составил 11.9 м (самая высокая отметка – вершина бугра Бэра).

Количество пробных площадок составило 120 шт., что достаточно для корректной аппроксимации результатов и достоверного анализа полученных выборок данных.

Исследованная территория разделена на три почвенных участка (ПУ) в зависимости от положения в рельефе: ПУ № 1 – вершина бугра Бэра; ПУ № 2 – восточный склон бугра Бэра (оба участка представлены зональными бурыми аридными сильнозасоленными почвами, не подверженными влиянию антропогенного фактора); ПУ № 3 – шлейф восточной части бугра Бэра, солончак типичный луговой ([Полевой определитель..., 2008](#)). Все ПУ представляют собой генетически однотипные биогеоценозы, имеющие сходные уровни нагрузки.

При полевых исследованиях почвы использовали экспресс-методы определения физических свойств ([Полевые..., 2001](#)). Определение свойств и отбор проб для проведения лабораторных анализов осуществлялись по слоям 0–10 см, 10–20 см, 20–40 см и 40–50 см без учета генетических горизонтов, что вполне согласуется с задачами.

Влажность почвы ( $W$ , %) определяли на влагомере МХ-50; плотность почвы ( $\rho_b$ , г/см<sup>3</sup>) буровым методом с использованием бура Качинского объемом 100 см<sup>3</sup> в трехкратной повторности; водопроницаемость ( $K_f$ , см/час) почв послойно определяли методом трубок с переменным напором. Изучение солевого состояния почв проведено по величине плотного остатка. Содержание гумуса определялось по методу И.В. Тюрина ([ГОСТ 26213-2021..., 2021](#)).

Полученные массивы экспериментальных данных были структурированы в выборки по годам, далее по ПУ в соответствии с изучаемыми свойствами.

Статистический анализ данных выполняли в среде программирования R с использованием общеизвестных статистических методов (уровень значимости  $p = 0.05$ ). Обработку результатов

проводили методами описательной статистики. Для оценки различия выборочных средних применяли непараметрический критерий Манна–Уитни, это позволяет избежать проверки каждого свойства на нормальность распределения в силу возможности несоответствия такового. Результаты визуализировали с использованием диаграммы размаха (Box, Whiskers).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение состояния объекта исследования за период 2010–2022 гг. представлено на рисунке 2. Значительно увеличились площади деградированных участков, лишенных растительности. В 2010 г. целостность бугра Бэра была сохранена. В 2022 г. бугор Бэра находится в стадии физического разрушения. Материал бугра используется населением для хозяйственных нужд.

Значительный интерес представляет изменение базовых физических свойств почвы, а также запасов влаги и гумуса в условиях развития деградационных процессов на фоне обваловки территории и повышения среднегодовых температур воздуха.

В условиях малой влагообеспеченности и крайне скудного растительного опада процессы гумусообразования значительно замедляются. За период наблюдений установлена отрицательная тенденция запасов влаги и гумуса (рис. 3).

Анализ результатов описательной статистики выборок данных по изученным свойствам за 2010 и 2022 гг. (табл. 1) показал, что запасы влаги в почве сократились на 13%, запасы гумуса – на 11%. Увеличилось содержание солей в почве (от 2.15 до 2.30%), которое изначально и так было очень высокое. Показатели порозности почвы уменьшились с 39 до 35%.

Как видно из таблицы 1, в абсолютных величинах изменения зафиксированы для всех выбранных почвенных свойств.

В целом для всей территории исследования проверка равенства выборочных средних с использованием критерия Манна–Уитни показала, что с 2010 по 2022 гг. статистически значимо в слое 0–40 см изменились величины влажности почвы ( $p = 2.2E-16$ ), запасы почвенной влаги ( $p = 2.61E-09$ ) и гумуса ( $p = 0.0008$ ). Плотность, порозность, содержание солей и водопроницаемость почвы значимо не изменились.



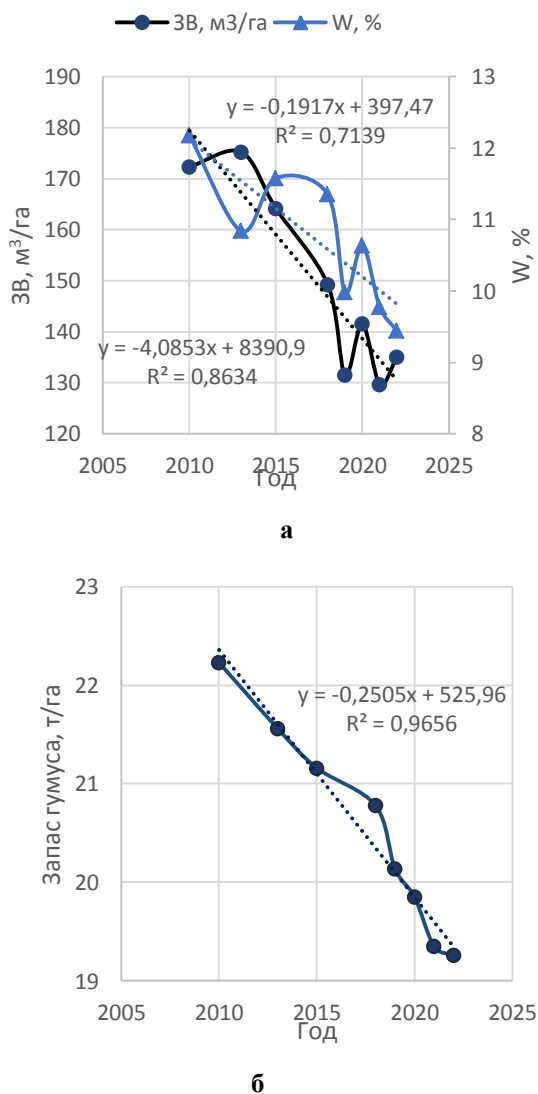
**а**



**б**

**Рис. 2.** Космический снимок объекта исследования. Астраханская область, Икрянинский район (даты снимков: **а** – 10.08.2010; **б** – 06.09.2022, рамкой обозначен стационарный участок).

**Fig. 2.** Satellite image of the study site. Astrakhan oblast, Ikryaninsky region (dates of images: **а** – 10.08.2010; **б** – 06.09.2022, stationary site is marked by the frame).



**Рис. 3.** Динамика запасов влаги (а) и гумуса (б).

**Fig. 3.** Dynamics of moisture reserves (а) and humus (б).

**Таблица 1.** Статистические показатели свойств почв (n = 120)

**Table 1.** Statistical indicators of soil properties (n = 120)

| Параметр                     | mean   |        | median |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| год                          | 2010   | 2022   | 2010   | 2022   |
| W, %                         | 12.18  | 9.44   | 11.98  | 9.48   |
| Sol, %                       | 2.15   | 2.30   | 1.61   | 1.83   |
| $\rho_b$ , г/см <sup>3</sup> | 1.42   | 1.43   | 1.43   | 1.45   |
| Kf, см/час                   | 3.84   | 3.39   | 2.13   | 1.74   |
| $\epsilon$ , %               | 39.00  | 36.00  | 38.00  | 36.00  |
| ЗГ, т/га                     | 22.23  | 19.26  | 19.81  | 16.76  |
| ЗВ, м <sup>3</sup> /га       | 172.35 | 135.02 | 150.28 | 128.86 |

**Примечание.** Здесь и далее: mean – среднее значение; median – медианное значение; W, % – влажность почвы; Sol, % – содержание солей по величине плотного остатка;  $\rho_b$ , г/см<sup>3</sup> – плотность почвы; Kf, см/час – коэффициент фильтрации;  $\epsilon$ , % – порозность почвы; ЗГ, т/га – запас гумуса; ЗВ, м<sup>3</sup>/га – запас влаги в почве.

**Note.** Hereinafter: mean – mean value; median – median value; W, % – soil moisture; Sol, % – salt content according to the value of solid residue;  $\rho_b$ , g/cm<sup>3</sup> – soil density; Kf, cm/hour – filtration coefficient;  $\epsilon$ , % – porosity of soil; ЗГ, t/ha – soil humus reserve; ЗВ, m<sup>3</sup>/ha – soil moisture reserve.

Как уже было отмечено, исследуемая территория находится в пределах бугрового ландшафта и обобщенные результаты, полученные для всей территории, не позволяют сделать достоверные выводы о происходящих изменениях, а лишь констатируют общие тенденции.

С целью уточнения временной динамики физических свойств по разным геоморфологическим элементам ландшафта анализировали выборки данных для каждого ПУ за 2010 и 2022 гг. Статистические результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

Анализ данных показал, что в зависимости от положения ПУ в рельефе, величины имеют значительную пространственную вариабельность.

**Таблица 2.** Статистические показатели свойств почв (n = 40 для каждого ПУ)

**Таблица 2.** Statistical indicators of soil properties (n = 40 for each soil site)

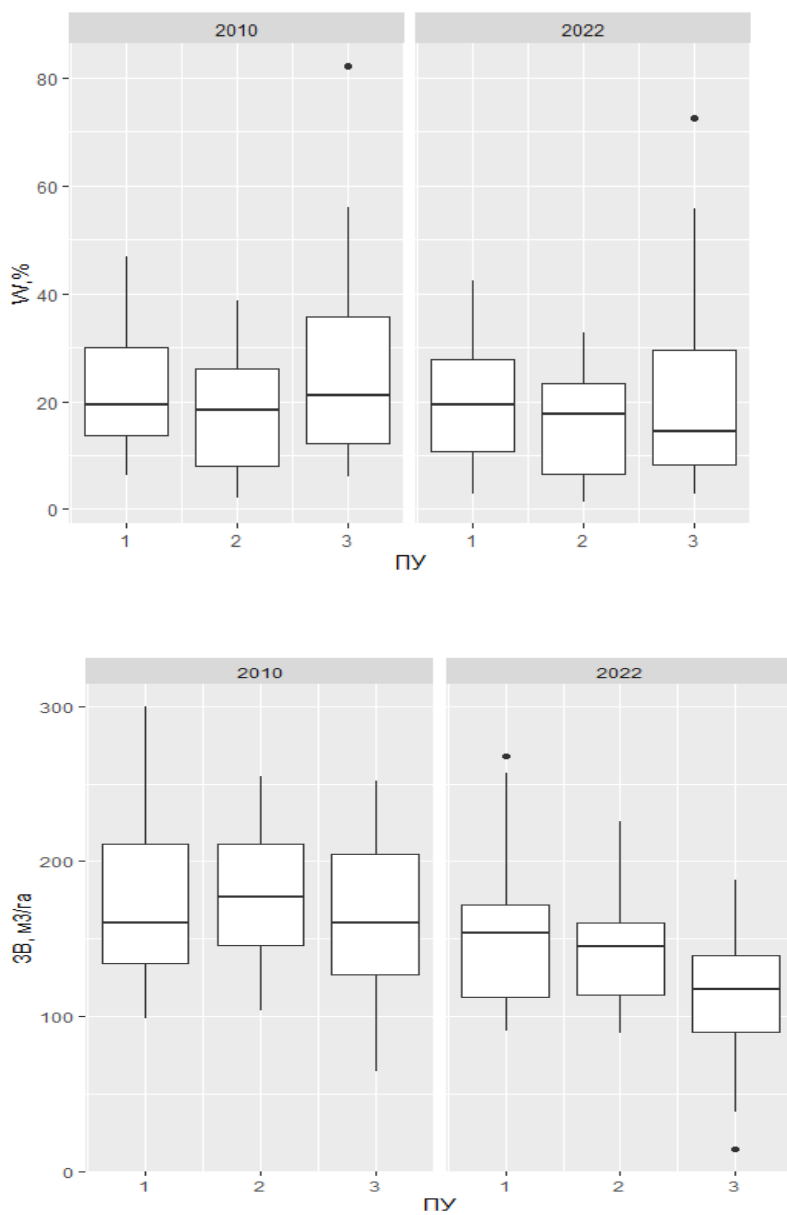
| Параметр                     | mean   |        | median |        | sd    |       | R      |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| год                          | 2010   | 2022   | 2010   | 2022   | 2010  | 2022  | 2010   | 2022   |
| ПУ № 1 (вершина бугра Бэра)  |        |        |        |        |       |       |        |        |
| W, %                         | 12.27  | 10.40  | 11.75  | 10.02  | 3.66  | 3.05  | 13.75  | 12.11  |
| Sol, %                       | 2.13   | 2.55   | 1.78   | 2.20   | 1.40  | 1.58  | 4.97   | 5.51   |
| $\rho_b$ , г/см <sup>3</sup> | 1.44   | 1.45   | 1.44   | 1.45   | 0.08  | 0.08  | 0.37   | 0.36   |
| Kf, см/час                   | 3.24   | 2.84   | 1.48   | 1.00   | 5.24  | 5.05  | 30.30  | 30.30  |
| $\varepsilon$ , %            | 38.00  | 38.00  | 38.50  | 38.50  | 5.31  | 5.29  | 24.00  | 24.00  |
| ЗГ, т/га                     | 22.35  | 20.06  | 19.44  | 19.44  | 11.66 | 10.68 | 40.44  | 39.42  |
| ЗВ, м <sup>3</sup> /га       | 175.92 | 150.55 | 160.29 | 153.63 | 52.68 | 45.34 | 201.62 | 177.50 |
| ПУ № 2 (склон бугра Бэра)    |        |        |        |        |       |       |        |        |
| W, %                         | 12.44  | 9.66   | 12.78  | 10.03  | 3.01  | 2.45  | 10.82  | 8.78   |
| Sol, %                       | 2.84   | 2.84   | 2.84   | 2.84   | 1.80  | 1.80  | 5.80   | 5.80   |
| $\rho_b$ , г/см <sup>3</sup> | 1.44   | 1.40   | 1.44   | 1.47   | 0.09  | 0.11  | 0.66   | 0.65   |
| Kf, см/час                   | 3.48   | 3.06   | 1.94   | 1.54   | 4.59  | 4.45  | 23.54  | 23.22  |
| $\varepsilon$ , %            | 36.00  | 36.00  | 35.00  | 34.50  | 6.71  | 6.93  | 23.00  | 23.00  |
| ЗГ, т/га                     | 17.88  | 16.00  | 18.36  | 17.58  | 10.67 | 9.63  | 36.65  | 31.21  |
| ЗВ, м <sup>3</sup> /га       | 178.51 | 140.76 | 177.25 | 145.02 | 42.07 | 35.15 | 151.45 | 136.51 |

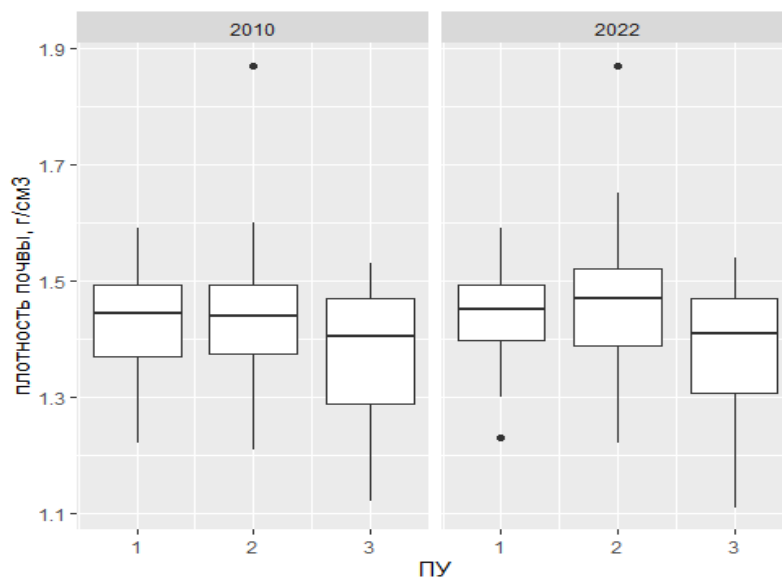
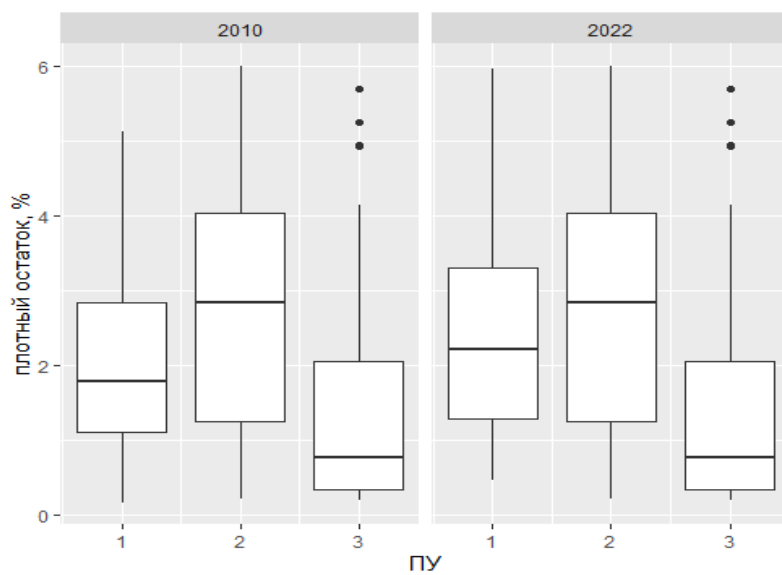
**Продолжение таблицы 2**  
**Table 2 continued**

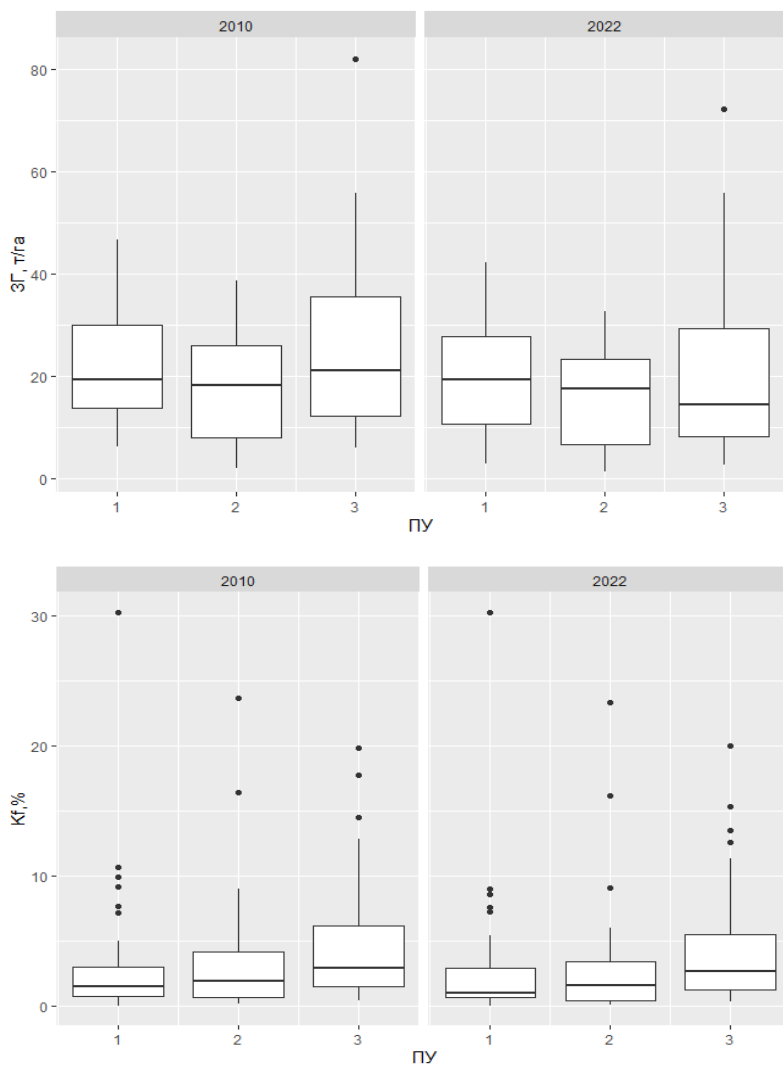
| Параметр                     | mean   |        | median |        | sd    |       | R      |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| год                          | 2010   | 2022   | 2010   | 2022   | 2010  | 2022  | 2010   | 2022   |
| ПУ № 3 (шлейф бугра Бэра)    |        |        |        |        |       |       |        |        |
| W, %                         | 11.83  | 8.27   | 11.77  | 8.18   | 3.20  | 2.44  | 12.10  | 9.13   |
| Sol, %                       | 1.50   | 1.50   | 0.76   | 0.76   | 1.65  | 1.65  | 5.51   | 5.51   |
| $\rho_b$ , г/см <sup>3</sup> | 1.37   | 1.39   | 1.40   | 1.41   | 0.11  | 0.11  | 0.41   | 0.43   |
| Kf, см/час                   | 4.81   | 4.27   | 2.94   | 2.67   | 4.87  | 4.57  | 19.47  | 19.71  |
| $\varepsilon$ , %            | 41.00  | 40.00  | 41.00  | 41.50  | 7.85  | 8.55  | 30.00  | 34.00  |
| ЗГ, т/га                     | 26.46  | 21.71  | 21.19  | 17.07  | 17.84 | 17.07 | 76.04  | 69.64  |
| ЗВ, м <sup>3</sup> /га       | 162.62 | 113.75 | 160.25 | 117.77 | 45.79 | 37.00 | 187.31 | 173.75 |

**Примечание.** Здесь и далее: R – размах; sd – стандартное отклонение.

**Note.** Hereinafter: R – values diapason; sd – standard deviation.







**Рис. 4.** Диаграммы размаха физически свойств в 2010 и 2022 гг. по почвенным участкам.

**Fig. 4.** Diagrams of values diapasons for physical properties in 2010 and 2022 on each soil site.

В результате дефицита почвенной и атмосферной влаги произошло уменьшение запасов почвенной влаги и гумуса повсеместно на всей исследованной территории. Наиболее выражена дегумификация в околобугровом пространстве, что связано еще и с уничтожением поверхностного слоя почвы в результате разрушения бугра Бэра. Содержание солей незначительно увеличилось лишь на вершине бугра (ПУ № 1).

Значимость различий в 2010 и 2022 гг. величин физических свойств и запасов гумуса по выделенным почвенным участкам устанавливали с помощью критерия Манна–Уитни (табл. 3).

**Таблица 3.** Уровень достоверности различий ( $p = 0.05$ ) физических свойств и запасов гумуса на ПУ в 2010 и 2022 гг.

**Table 3.** Level of reliability of differences ( $p = 0.05$ ) in physical properties and humus reserves on soil sites in 2010 and 2022

| Параметр                     | ПУ № 1        | ПУ № 2          | ПУ № 3           |
|------------------------------|---------------|-----------------|------------------|
| W, %                         | <b>0.023*</b> | <b>1.27E-4*</b> | <b>2.42E-06*</b> |
| Sol, %                       | <b>0.047*</b> | 0.248           | 0.857            |
| $\rho_b$ , г/см <sup>3</sup> | 0.566         | 0.250           | 0.654            |
| Kf, см/час                   | 0.554         | 0.421           | 0.424            |
| $\epsilon$ , %               | 0.406         | 0.242           | 0.175            |
| ЗГ, т/га                     | 0.061         | 0.083           | 0.121            |
| ЗВ, м <sup>3</sup> /га       | <b>0.033*</b> | <b>1.6E-4*</b>  | <b>8.01E-06*</b> |

Результаты сравнения выборочных средних изученных свойств подтвердили, что статистически значимо ( $p = 0.05$ ) за выбранный временной диапазон изменились влагообеспеченность почвы на всей территории исследования и солесодержание на вершине бугра Бэра.

Почвенный покров бугра Бэра представлен бурыми аридными засоленными почвами, отрезанными от влияния грунтовых вод. За счет малого количества растительности, представленной видами пустынной флоры (полынь, верблюжья колючка), почвы

подвержены ветровой эрозии и дефляции. Влажность почвы на поверхности в летний период находится на уровне гигроскопической (2–4%). В результате высоких температур воздуха и значительного нагрева почвы вершины бугра происходит интенсивное испарение влаги из нижележащих слоев почвы, что способствует подъему солей под действием капиллярных сил. Под влиянием немногочисленных осадков в почвенном профиле развиваются процессы осолонцевания, что проявляется в увеличении плотности автоморфных почв. Почвы склона бугра (ПУ № 2) характеризуются более высокими величинами ЗГ и ЗВ в силу более тяжелого гранулометрического состава за счет сноса материала с вершины бугра.

ПУ № 3 (гидроморфный луговой солончак) приурочен к пониженным элементам ландшафта. Нижняя часть почвенного профиля подвержена влиянию минерализованных грунтовых вод во время весенне-летних половодий на глубине порядка 1 м. До обваловки участок подвергался затоплению паводковыми водами. На фоне высоких температур воздуха происходит интенсивное испарение и пересыхание почвы. На поверхности образуются многочисленные трещины, что способствует значительной вариабельности величины коэффициента водопроницаемости почвы и перераспределению гранулометрических фракций. Физическое разрушение бугра приводит к выходу на поверхность подстилающей породы, что способствует прогрессирующей дегумификации, ветровой эрозии и в последствии появлению открытых песков.

В околобугровом пространстве за счет микрорельефа и изменения гидрологического режима произошло перераспределение солей в пространстве, однако количественное содержание значительно не изменилось.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение многолетней динамики физических свойств и запасов гумуса засоленных засушливых почв Астраханской области показало, что за период с 2010 по 2022 гг. развитие деградационных процессов обвалованных территорий усилилось на фоне повышения температуры воздуха. На статистически значимом уровне существенно уменьшились запасы влаги и гумуса в почве,

отмечается тенденция увеличения плотности и содержания солей в автоморфных почвах. Наибольшие негативные изменения почвенных свойств приурочены к пониженным элементам рельефа, где наблюдается устойчивая дегумификация почвы. Значительное уменьшение влагообеспеченности почв и дефицит атмосферной влаги в условиях изменения водного режима в результате обваловки территории приводят к увеличению скорости развития деградации и опустынивания почв. Устойчивая тенденция негативных изменений в почвенном покрове подобных территорий может привести в ближайшем будущем к необратимым изменениям и экологическому бедствию. Необходимы срочные меры по восстановлению подобных территорий в виде разваловки территорий и применения комплексных технологий по борьбе с опустыниванием и деградацией почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26213-2021. Межгосударственный стандарт. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 7 с.
2. *Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217.
3. *Золотокрылин А.Н.* Опустынивание засушливых земель Европейской России в контексте изменений климата // Вестник Института комплексных исследований аридных территорий. 2011. Т. 2. № 2(23). С. 116–119.
4. Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / под ред. *Г.И. Рычагова* и *В.Н. Коротаева*. М.: ГЕОС, 2002. 242 с.
5. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
6. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв / под ред. *Е.В. Шеина*. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
7. *Пугачева А.М.* Климатические флуктуации сухих степей и их роль в процессе демуляции // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 3 (84). С. 14–22.
8. *Розанов Б.Г., Зонн И.С.* План действий по борьбе с опустыниванием в СССР: оценка, мониторинг, предупреждение и борьба с ним // Проблемы освоения пустынь. 1981. № 6. С. 22–31.

9. Яшин И.М., Васенев И.И., Ворников Д.В., Петухова А.А. Экологическое состояние и деградация черноземов Приволжской возвышенности // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2012. № 1. С. 41–52.
10. Aubreville André. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris: Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 1949. 351 p.
11. Dietrich P.P., Schumacher J., Eisenhauer N., Roscher C. Eco-evolutionary dynamics modulate plant responses to global change depending on plant diversity and species identity // Elife. 2022. Vol. 11. P. e74054.
12. Keselman H.J., Rogan J.C. The Tukey multiple comparison test: 1953–1976 // Psychological Bulletin. 1977. Vol. 84. No. 5. P. 1050.
13. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea // Nat. Hazards. 2022. Vol. 114. P. 2435–2478.
14. Parmesan C., Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems // Nature. 2003. Vol. 421(6918). P. 37–42.
15. The Sustainable Development Goals. Report 2022. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>.
16. Zucca C., Fleiner R., Bonaiuti E., Kang U. Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms // CATENA. 2022. Vol. 219. P. 106575.

## REFERENCES

1. GOST 26213-2021. Interstate standard. Soils. Methods of determination of organic matter, Moscow: Russian Institute for Standardization, 2021, 7 p.
2. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B., Aridizatsiya zasushliviyykh zemel' evropeiskoi chasti rossii i svyaz' s zasukhami (Aridization of arid lands in the European part of Russia and connection with droughts), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 207–217.
3. Zolotokrylin A.N., Opustynivanie zasushliviyykh zemel' Evropeiskoi Rossii v kontekste izmenenii klimata (Desertification of arid lands in European Russia in the context of climate change), *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorii*, 2011, Vol. 2, No. 2(23), pp. 116–119.
4. Zaitsev A.A., Ivanov V.V., Korotaev V.N., Labutina I.A., Luk'yanova S.A., Tszunshyan' Li, Rimskii-Korsakov N.A., Rychagov G.I., Svitoch A.A., Sidorchuk A.Yu., Sychev V.V., Chernov A.V., *Nizhnyaya Volga: geomorfologiya, paleogeografiya i ruslovaya morfodinamika* (Lower Volga: geomorphology, paleogeography and channel morphodynamics), Moscow: GEOS, 2002, 242 p.
5. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field soil qualifier of Russia), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

6. Shein E.V. (Ed.), *Polevye i laboratornye metody issledovaniya fizicheskikh svoystv i rezhimov pochv* (Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 200 p.
7. Pugacheva A.M., Climatic Fluctuations in Dry Steppes and Their Role in the Demutation Process, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 3, pp. 181–187.
8. Rozanov B.G., Zonn I.S., Plan deistvii po bor'be s opustynivaniem v SSSR: otsenka, monitoring, preduprezhdenie i bor'ba s nim (Action Plan to Combat Desertification in the USSR: Assessment, Monitoring, Prevention and Control), *Problemy osvoeniya pustyn'*, 1981, No. 6, pp. 22–31.
9. Yashin I.M., Vasenev I.I., Vornikov D.V., Petukhova A.A., Ekologicheskoe sostoyanie i degradatsiya chernozemov Privolzhskoi vozvyshennosti (Ecological state and degradation of chernozems of the Volga Upland), *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2012, No. 1, pp. 41–52.
10. Aubreville André, *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*, Paris: Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 1949, 351 p.
11. Dietrich P.P., Schumacher J., Eisenhauer N., Roscher C., Eco-evolutionary dynamics modulate plant responses to global change depending on plant diversity and species identity, *Elife*, 2022, Vol. 11, e74054.
12. Keselman H.J., Rogan J.C., The Tukey multiple comparison test: 1953–1976, *Psychological Bulletin*, 1977, Vol. 84, No. 5, p. 1050.
13. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A., Natural hazards and disasters around the Caspian Sea, *Nat. Hazards*, 2022, Vol. 114, pp. 2435–2478.
14. Parmesan C., Yohe G., A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 2003, Vol. 421(6918), pp. 37–42.
15. The Sustainable Development Goals. Report 2022. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>.
16. Zucca C., Fleiner R., Bonaiuti E., Kang U., Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms, *CATENA*, 2022, Vol. 219, 106575.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159



### **Ссылки для цитирования:**

Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 129-159. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159

### **Cite this article as:**

Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Grubina P.G., Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 129-159, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159

### **Благодарность:**

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6) и при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2022-321).

### **Acknowledgments:**

The studies were carried out within the framework of the implementation of the most important innovative project of state importance “Development of a system of ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system of accounting data on the fluxes of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6) and with the support of the Ministry of Education and Science of Russia (agreement No. 075-15-2022-321).

## **Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности**

© 2023 г. Е. Ю. Прудникова<sup>1\*</sup>, И. Ю. Савин<sup>1,2\*\*</sup>,  
П. Г. Грубина<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,  
\*<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: [prudnikova\\_eyu@esoil.ru](mailto:prudnikova_eyu@esoil.ru),  
\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: [grubina\\_pg@esoil.ru](mailto:grubina_pg@esoil.ru).

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Россия,  
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила в редакцию 17.03.2023, принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Спутниковые данные достаточно давно используются для оценки различных свойств пахотных почв. В то же время существуют определенные сложности, связанные с тем, что ряд агрономически важных свойств почв не оказывает непосредственного влияния на спектральную отражательную способность их поверхности, что осложняет дистанционную оценку таких свойств. Кроме того, для получения воспроизводимых моделей необходимо учитывать состояние открытой поверхности почв во время съемки. Целью исследования было провести демонстрацию метода детектирования агрономически важных свойств пахотных почв по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI с привлечением информации о состоянии их открытой поверхности на примере тестового поля в Серебряно-Прудском районе Московской области. В зависимости от свойства почвы  $R^2_{cv}$  моделей, построенных по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI, варьировал от 0.57 до 0.91. Наилучшие модели  $R^2_{cv} > 0.8$  были получены для органического вещества и сильно скоррелированных с ним свойств, таких как содержание обменных катионов кальция и магния, содержание общего азота, pH водной и солевой вытяжек. Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. На основе полученных моделей в рамках демонстрации метода были построены карты пространственного варьирования агрономически важных свойств пахотных почв. Полученные модели могут быть использованы для дистанционного мониторинга анализируемых свойств пахотных почв тестового поля. В то же время для таких свойств, как содержание обменного калия и соединений фосфора необходим поиск подходов, учитывающих их высокую пространственную вариабельность, а также требуется предварительная оценка информативности сроков съемки, в которые открытая поверхность почвы не трансформирована.

**Ключевые слова:** дистанционные методы, пахотные почвы, агрономически важные свойства, Landsat 8-9 OLI, состояние открытой поверхности почв.

## Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state

© 2023 E. Yu. Prudnikova<sup>1\*</sup>, I. Yu. Savin<sup>1,2\*\*</sup>, P.G. Grubina<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: [prudnikova\\_eyu@esoil.ru](mailto:prudnikova_eyu@esoil.ru),  
\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: [grubina\\_pg@esoil.ru](mailto:grubina_pg@esoil.ru).

<sup>2</sup>Peoples' Friendship University of Russia,  
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

Received 17.03.2023, Accepted 27.06.2023

**Abstract:** Satellite data have been used for a long time to assess various properties of arable soils. At the same time, there are certain difficulties associated with the fact that a number of agronomically important soil properties do not directly affect spectral reflectance of their surface, which complicates the remote assessment of such properties. In addition, to obtain reproducible models, it is necessary to take into account the state of the open soil surface during the survey. The aim of the study was to demonstrate a method for detecting agronomically important properties of arable soils based on Landsat 8-9 OLI satellite data and including information about the state of their open surface using the example of a test field in the Serebryano-Prudsky district of the Moscow region. Depending on the soil property,  $R^2_{cv}$  of the models developed based on Landsat 8-9 OLI satellite data varied from 0.57 to 0.91. The best models with  $R^2_{cv} > 0.8$  were obtained for organic matter and properties highly correlated with it such as the content of exchangeable calcium and magnesium cations, the content of total nitrogen, pH of water and salt extracts. The involvement of information on the state of the open surface of arable soils for most properties made it possible to obtain models of higher quality and predictive ability, regardless of the survey period. Based on the models obtained, maps of the spatial variation of agronomically important properties of arable soils were constructed as part of the demonstration of the method. The resulting models can be used for remote monitoring of the

analyzed properties of arable soils of the test field. At the same time, for such properties as the content of exchangeable potassium and phosphorus compounds, it is necessary to search for the approaches that will take into account their high variability, as well as to perform a prior assessment of the informativity of the survey periods in which the open soil surface is not transformed.

**Keywords:** remote methods, arable soils, agronomically important properties, Landsat 8-9 OLI, state of open soil surface.

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные данные широко используются для оценки различных свойств пахотных почв ([Ben-Dor, Banin, 1995](#); [V. Rossel et al., 2006](#); [Савин и др., 2019](#)). При этом возможности такой оценки обусловлены наличием связей между свойствами поверхности почв и их спектральной отражательной способностью. Многочисленные исследования показали, что непосредственное влияние на спектральную отражательную способность оказывают такие свойства, как содержание органического вещества, минералогический состав, влажность, гранулометрический состав, содержание растворимых солей, карбонатов, содержание железа ([Орлов, 2001](#); [Belinaso et al., 2010](#); [Lesaignoux et al., 2009](#); [Fang et al., 2018](#); [Savin, Vindeker, 2021](#)). Эти свойства, как правило, достаточно хорошо детектируются по дистанционным данным.

В то же время такие агрономически важные свойства как рН, содержание питательных элементов, обменных катионов не оказывают прямого выраженного воздействия на спектральные характеристики в оптическом диапазоне и, соответственно, корреляция между ними и спектральной отражательной способностью почв в данном участке спектра слабая ([Stenberg et al., 2010](#)). Их дистанционная оценка возможна в случае, когда свойства со слабым спектральным сигналом скоррелированы со свойствами с сильным спектральным сигналом (например, с содержанием органического вещества), ([Kuang et al., 2012](#); [Mouazen, Kuang, 2016](#); [Dematte et al., 2017](#)).

С другой стороны, спектральная отражательная способность почв в оптическом диапазоне, который на данный момент чаще всего используется для дистанционного детектирования свойств

пахотных почв, представляет информацию об очень тонком поверхностном слое. При этом поверхность пахотных почв находится под постоянным воздействием сельскохозяйственной техники и/или природных факторов, среди которых в умеренной зоне на первое место по интенсивности воздействия выходят атмосферные осадки. Под влиянием атмосферных осадков меняются свойства поверхности пахотных почв: влажность, шероховатость, вещественный состав (органическое вещество, минералогия) ([Савин, 1995](#); [Виндекер и др., 2018](#); [Прудникова и др., 2019](#); [Ben-Dor et al., 2003](#); [Prudnikova et al., 2019](#); [Prudnikova, Savin, 2021](#)). Чем дальше поверхность почв находится под воздействием атмосферных осадков, тем сильнее ее свойства отличаются от свойств остального пахотного горизонта. Различия между поверхностным слоем почвы и пахотным горизонтом будут влиять на точность и воспроизводимость моделей, предсказывающих почвенные свойства на основе оптических дистанционных данных. В связи с чем необходимо учитывать состояние открытой поверхности пахотных почв во время съемки при дистанционной оценке свойств пахотных почв.

Целью исследования было провести демонстрацию метода детектирования агрономически важных свойств пахотных почв по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI с привлечением информации о состоянии их открытой поверхности на примере тестового поля в Серебряно-Прудском районе Московской области.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выступают пахотные почвы тестового поля, расположенного в Серебряно-Прудском районе Московской области (рис. 1), и их спектральная отражательная способность. Площадь поля составляет 37.3 га.

Почвы тестового поля представлены черноземами выщелоченными малогумусными мало и среднемощными тяжелосуглинистыми на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими слабоволнистые водороздельные равнины; черноземами выщелоченными малогумусными тяжелосуглинистыми слабосмытыми на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими слабополосные склоны и ложбины (преимущественно северо-западная часть тестового поля); луговато-черноземными среднесмытыми

тяжелосуглинистыми почвами на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими ложбины стока и нижние части склонов (юго-восточная часть тестового поля) ([Почвенная карта..., 1991](#)).



**Рис. 1.** Географическое положение тестового поля (границы тестового поля показаны красным цветом).

**Fig. 1.** Geographic location of the test field (test field boundaries are shown in red).

### *Полевые исследования*

Полевой выезд был совершен 28.04.2022 г. Измерения и отбор образцов были сделаны в 30 точках, которые были выбраны случайным образом. В каждой точке отбирался смешанный образец почвы с участка  $5 \times 5$  метров из слоя 0–3 см. Во время выезда поверхность тестового поля находилась в открытом состоянии.

### *Анализ почвенных образцов*

В 30 отобранных почвенных образцах определялись следующие свойства пахотных почв: pH в водной и солевой вытяжке ([ГОСТ 26423-85](#), [ГОСТ 26483-85](#) соответственно), содержание органического вещества ([ГОСТ 26213-91](#)), массовая доля соединений фосфора ([ГОСТ Р 54650-2011](#)), содержание обменного калия по Масловой ([ГОСТ 26210-91](#)), обменных катионов по Шоллен-

бергеру (кальций, магний) ([Руководство..., 1990](#)), общий азот ([ГОСТ 26107-84](#), п. 4.1). Анализы проводились ИЛЦ Почвенного института имени В.В. Докучаева.

#### *Съемка спектральных кривых*

Для съемки спектральной отражательной способности использовался полевой спектрорадиометр HandHeld-2, работающий в диапазоне 325–1 075 нм. Съемка проводилась в ясную погоду в дневное время. В каждой точке опробования (площадка 5 × 5 метров) измерения проводились в 5-кратной повторности. Для съемки спектров открытой поверхности почвы прибор располагался на высоте 10–15 см. Кривые отражения для каждой точки осреднялись.

#### *Подбор и подготовка спутниковых данных*

Для демонстрации работы метода были отобраны две сцены Landsat 8-9 OLI (продукт Landsat Collection 2 Level-2) (табл. 1), по срокам наиболее близкие к дате полевых работ: 1) Landsat 8 OLI от 06.05.2022; 2) Landsat 9 OLI от 12.04.2022. Сцены были скачаны с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), где они находятся в открытом доступе. Продукт Landsat Collection 2 Level-2 содержит атмосферно скорректированные данные (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>), поэтому дополнительной обработки спутниковых данных не требовалось.

**Таблица 1.** Характеристики спутниковых данных Landsat 8-9 OLI  
**Table 1.** Characteristics of Landsat 8-9 OLI satellite data

| Каналы  | Длина волны (мкм) | Пространственное разрешение (м) |
|---------|-------------------|---------------------------------|
| Канал 1 | 0.43–0.45         | 30                              |
| Канал 2 | 0.45–0.51         | 30                              |
| Канал 3 | 0.53–0.59         | 30                              |
| Канал 4 | 0.64–0.67         | 30                              |
| Канал 5 | 0.85–0.88         | 30                              |

В то же время для данного продукта необходимо применение поправочного коэффициента, а именно, каждый канал нужно умножить на 0.0000275 и вычесть 0.2 (<https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-scale-factor-landsat-level-2-science-products#:~:text=Landsat%20Collection%20%20surface%20reflectance,offset%20of%20%2D0.2%20per%20pixel>). Данная операция была проведена для каналов обеих сцен в программе ILWIS 3.3 Academic.

#### *Предобработка спектральных данных*

Предобработка данных о спектральной отражательной способности заключалась в усреднении, удалении зашумленных участков и сглаживании. Для каждой точки на основе 5 повторностей рассчитывалась средняя спектральная кривая. При этом из-за зашумленности для анализа использовался только участок 350–900 нм, который захватывает видимый и ближний инфракрасный участки спектра. Сглаживание спектральных кривых осуществлялось фильтром Савицкого-Голея в программе R с помощью функции *savitzkyGolay* пакета *prospectr* (<https://cran.r-project.org/web/packages/prospectr/index.html>).

После сглаживания спектральная отражательная способность, измеренная в поле, была пересчитана в каналы Landsat 8-9 OLI в программе R с помощью пакета *prospectr* и функции *resample*. Затем для 30 точек были рассчитаны различные спектральные индексы и спектральные отношения (табл. 2).

#### *Оценка состояния открытой поверхности пахотных почв*

Спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв, регистрируемая на спутниковых данных и с помощью спектрорадиометра, представляет собой линейную спектральную смесь отражения элементов, формирующих данную поверхность: почвенные агрегаты, корка, тени, трещины, растительные остатки (при наличии) (рис. 2), которая может быть выражена в виде следующего уравнения:

$$COC_{нов} = s1 * COC_{на} + s2 * COC_{м/мп} + s3 * COC_{к} + s4 * COC_{р},$$

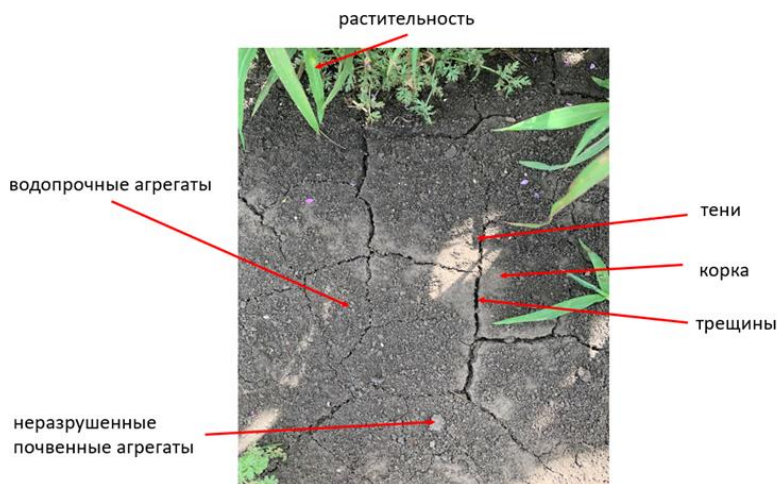
**Таблица 2.** Спектральные индексы, использованные для анализа  
**Table 2.** Spectral indices used for the analysis

| Индекс | Уравнение                                         | Уравнение с учетом каналов Landsat 8-9 OLI                          | Ссылки                                         |
|--------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| BI     | $\sqrt{\frac{(B^2 + G^2 + R^2)}{3}}$              | $\sqrt{\frac{(Band2^2 + Band3^2 + Band4^2)}{3}}$                    | ( <a href="#">Mathieu et al., 1998</a> )       |
| CI     | $\frac{(R - G)}{(R + G)}$                         | $\frac{(Band4 - Band3)}{(Band4 + Band3)}$                           | ( <a href="#">Mathieu et al., 1998</a> )       |
| HI     | $\frac{(2 * R - G - B)}{(G - B)}$                 | $\frac{(2 * Band4 - Band3 - Band2)}{(Band3 - Band2)}$               | ( <a href="#">Mathieu et al., 1998</a> )       |
| SI     | $\frac{(R - B)}{(R + B)}$                         | $\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$                           | ( <a href="#">Mathieu et al., 1998</a> )       |
| RI     | $\frac{R^2}{(B * G^3)}$                           | $\frac{Band4^2}{(Band2 * Band3^3)}$                                 | ( <a href="#">Mathieu et al., 1998</a> )       |
| BSCI   | $\frac{1 - 2 *  R - G }{(\frac{R + G + NIR}{3})}$ | $\frac{1 - 2 *  Band4 - Band3 }{(\frac{Band4 + Band3 + Band5}{3})}$ | ( <a href="#">Chen et al., 2005</a> )          |
| GSI    | $\frac{(R - B)}{(R + B + G)}$                     | $\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band3 + Band2)}$                   | ( <a href="#">Xiao et al., 2006</a> )          |
| CRUST  | $1 - \frac{(R - B)}{(R + B)}$                     | $1 - \frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$                       | ( <a href="#">Karnieli, 1997</a> )             |
| NDVI   | $\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$                     | $\frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + Band4)}$                           | ( <a href="#">Deering, 1978</a> )              |
| SAVI   | $1.5 * \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$         | $1.5 * \frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + Band4 + 0.5)}$               | ( <a href="#">Huete, 1988</a> )                |
| EVI2   | $2.5 * \frac{(NIR - R)}{(NIR + 2.4 * R + 1)}$     | $2.5 * \frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + 2.4 * Band4 + 1)}$           | ( <a href="#">Jiang et al., 2008</a> )         |
| NDWI   | $\frac{(G - NIR)}{(G + NIR)}$                     | $\frac{(Band3 - Band5)}{(Band3 + Band5)}$                           | ( <a href="#">McFeeters and Stuart, 1996</a> ) |

**Примечание.** В – спектральная отражательная способность в синем участке спектра; G – спектральная отражательная способность в зеленом участке спектра; R – спектральная отражательная способность в красном участке спектра; NIR – спектральная отражательная способность в ближнем инфракрасном участке спектра.

**Note.** B – spectral reflectivity in the blue diapason of the spectrum; G – spectral reflectivity in the green diapason of the spectrum; R – spectral reflectivity in the red diapason of the spectrum; NIR – spectral reflectivity in the near-infrared diapason of the spectrum.

где  $CO_{Снов}$  – спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв;  $CO_{Сна}$  – спектральная отражательная способность почвенных агрегатов,  $CO_{Сm/mp}$  – спектральная отражательная способность теней, включая трещины,  $CO_{Ск}$  – спектральная отражательная способность корки,  $CO_{Ср}$  – спектральная отражательная способность растительных остатков;  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$  – площади, занимаемые данными элементами на открытой поверхности пахотных почв, выраженные в долях от единицы.



**Рис. 2.** Элементы открытой поверхности пахотных почв.

**Fig. 2.** Elements of the open surface of arable soils.

Метод спектрального разделения позволяет определить значения площадей (в долях от 1), занимаемых отдельными элементами поверхности, по спутниковым данным в конкретный срок съемки. В качестве основы для этого используется их спектральная отражательная способность, измеренная в поле и пересчитанная в каналы спутниковых данных. За спектральную отражательную способность почвенных агрегатов в данном исследовании

принимается спектральная отражательная способность почвы под коркой.

Метод был реализован в программе R с помощью пакета *hsdar* и функции *unmix* (<https://cran.r-project.org/web/packages/hsdar/index.html>). Для работы со спутниковыми изображениями использовались пакеты *raster* (<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>), *sp* (<https://cran.r-project.org/web/packages/sp/index.html>) и *rgdal* (<https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html>).

При этом помимо площадей, занимаемых отдельными элементами поверхности, также рассчитывалась ошибка спектрального разделения, величина которой связана с теми компонентами, спектральная отражательная способность которых не была учтена при спектральном разделении. Сюда, как правило, относятся тени и/или трещины.

Таким образом, для каждой точки полевого обследования и пикселя анализируемых изображений рассчитывалась доля корки и “некорки” (почвенные агрегаты), а также ошибка спектрального разделения, величина которой зависит от площади, занимаемой тенями и/или трещинами. При анализе спутниковых данных для каждого выбранного срока съемки были получены карты, отражающие пространственное варьирование доли корки в пикселе и ошибки спектрального разделения.

#### *Моделирование свойств пахотных почв*

Сначала анализировались спектральные параметры, рассчитанные по данным полевого спектрометрирования. Предварительно из дальнейшего анализа исключались те параметры, которые сильно скоррелированы друг с другом. Для этого рассчитывались коэффициенты корреляции между ними. И далее, если коэффициент корреляции между параметрами превышал 0.7, то один из параметров исключался из дальнейшего анализа. В итоге в анализ включались только те параметры, коэффициент корреляции между которыми не превышал 0.7. Отбор проводился в программе R с помощью пакета *usdm* и функции *vifcor* (<https://cran.r-project.org/web/packages/usdm/index.html>).

Оставшиеся после отбора параметры включались в регрессионное моделирование, которое осуществлялось методом множе-

ственной линейной регрессии с помощью функции *lm* пакета *stats* программы R (<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/stats-package.html>).

Для каждого свойства моделирование проводилось в двух вариантах: 1) без учета информации о состоянии поверхности в момент проведения полевых работ; 2) с учетом информации о состоянии поверхности. При учете состояния поверхности в модель дополнительно в качестве предикторов включалась доля корки и ошибка спектрального разделения.

В каждом варианте сначала в модель включались все отобранные параметры, далее последовательно проводилось исключение параметров с уровнем значимости (*p-value*) более 0.05 до тех пор, пока в модели для каждого анализируемого свойства не оставались только статистически значимые параметры.

Те спектральные параметры, которые для конкретного свойства попали в модели по результатам анализа данных полевого спектрометрирования, затем использовались для моделирования этого свойства по спутниковым данным. Моделирование проводилось также в двух вариантах: без учета и с учетом состояния поверхности в конкретный срок съемки. Построение моделей проводилось так же, как и в случае данных полевого спектрометрирования.

#### *Оценка качества полученных моделей*

Для проверки моделей, полученных как по данным полевого спектрометрирования, так и по спутниковым данным, проводилась процедура кросс-валидации. Выборка случайным образом делилась на 10 блоков, из которых один использовался для проверки, а остальные для обучения. Для устойчивости значений параметров оценки качества подобное деление повторялось 100 раз. Для кросс-валидации использовался пакет *caret* программы R (<https://cran.r-project.org/web/packages/caret/vignettes/caret.html>).

Основными параметрами для оценки качества моделей по результатам кросс-валидации являлись следующие: коэффициент детерминации ( $R^2_{cv}$ ), среднеквадратическая ошибка предсказания ( $RMSE_{cv}$ ), и отношение межквартильного размаха (IQR) к среднеквадратической ошибке предсказания ( $RPIQ$ ). Чем выше коэффициент детерминации и  $RPIQ$ , и ниже среднеквадратическая ошиб-

ка предсказания по результатам валидации, тем лучше модель. В целом RPIQ меньше 2 говорит о невысокой предсказательной способности модели.

#### *Построение карт свойств пахотных почв*

Для построения карт использовались наилучшие модели, полученные по спутниковым данным, с наибольшим  $R^2_{cv}$  и RPIQ и наименьшим RMSE<sub>cv</sub>. Для этого в программе ILWIS 3.3 Academic по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI для соответствующих сроков съемки рассчитывались информативные параметры, включенные в данные модели. Затем строились карты пространственного варьирования анализируемых свойств на основе отобранных регрессионных уравнений. После чего построенные карты обрезались по границам тестового поля, поскольку считалось, что за его пределами построенные модели не работают.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

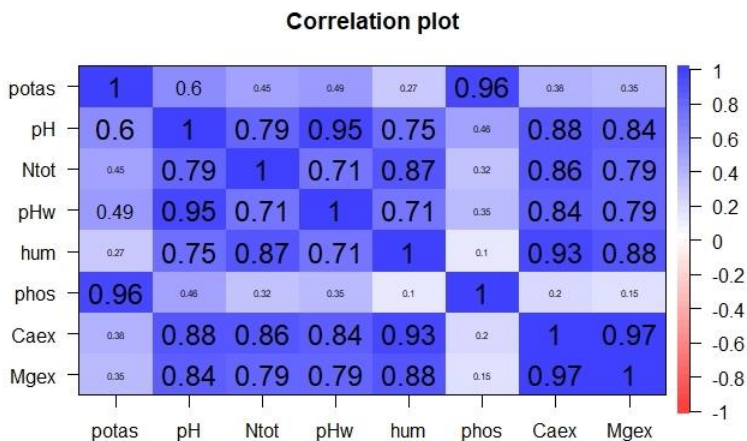
Лабораторный анализ отобранных образцов показал, что содержание в них обменного калия варьирует в пределах 168.3 – 1816.9 млн<sup>-1</sup> (табл. 3). При этом коэффициент вариации для данного свойства превышает 80%. Также высокий коэффициент вариации отмечается для массовой доли соединений фосфора (141.7%), массовая доля которых изменяется от 0 до 1%. Для обменных катионов кальция коэффициент вариации превышает 50%, изменяясь от 1.5 до 15.5 ммоль/100 г. В случае органического вещества, обменных катионов магния и общего азота коэффициент вариации превышает 40% и составляет 42.1% и 40.9 % соответственно. При этом содержание органического вещества изменяется от 1.8 до 6.5%, обменных катионов магния – от 0.5 до 2.6 ммоль/100 г, а массовая доля общего азота – от 0.1 до 0.4%. Меньше всего варьирует pH водной и солевой вытяжек с коэффициентом вариации 7.3% и 10.8% соответственно. pH водной вытяжки изменяется от 5.2 до 7.4, а солевой вытяжки – от 4.1 до 6.5.

**Таблица 3.** Свойства пахотных почв тестового поля  
**Table 3.** Properties of arable soils of the test field

|                        | Обменный калий, мгл <sup>-1</sup> | рН солевой вытяжки | Общий азот, % | рН водной вытяжки | Органическое вещество, % | Соединения фосфора (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | Обменные катионы (ммоль/100 г) |      |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|------|
|                        |                                   |                    |               |                   |                          |                                                     | Ca                             | Mg   |
| Минимум                | 168.3                             | 4.1                | 0.1           | 5.2               | 1.8                      | 0.0                                                 | 1.5                            | 0.5  |
| Максимум               | 1816.9                            | 6.5                | 0.4           | 7.4               | 6.5                      | 1.0                                                 | 15.5                           | 2.6  |
| Среднее                | 328.6                             | 4.8                | 0.2           | 6.2               | 3.8                      | 0.1                                                 | 7.5                            | 1.5  |
| Стандартное отклонение | 283.8                             | 0.5                | 0.1           | 0.5               | 1.6                      | 0.2                                                 | 4.1                            | 0.6  |
| Коэффициент вариации   | 86.4                              | 10.8               | 40.9          | 7.3               | 41.1                     | 141.7                                               | 53.8                           | 42.1 |

Корреляционный анализ показал, что анализируемые свойства достаточно хорошо коррелируют друг с другом (рис. 3). Содержание обменного калия сильнее всего коррелирует с массовой долей соединений фосфора с коэффициентом корреляции 0.96. В остальных случаях коэффициент корреляции не превышает 0.6. В случае рН солевой вытяжки, наибольшая корреляция отмечается между данным свойством и рН водной вытяжки (коэффициент корреляции 0.95). Также высокие значения коэффициента корреляции отмечаются между рН солевой вытяжки и содержанием обменных катионов кальция и магния (коэффициенты корреляции 0.88 и 0.84 соответственно). Массовая доля общего азота сильнее всего коррелирует с содержанием органического вещества и обменных катионов кальция (коэффициенты корреляции 0.87 и 0.86 соответственно). Содержание органического вещества сильнее всего скоррелировано с содержанием обменных катионов кальция

(коэффициент корреляции составляет 0.93). Содержание обменных катионов кальция, в свою очередь, сильнее всего коррелирует с содержанием обменных катионов магния (коэффициент корреляции 0.97). При этом следует отметить, что все свойства, кроме содержания обменного калия и массовой доли соединений фосфора (коэффициент корреляции  $<0.3$ ), характеризуются достаточно высокой корреляцией (коэффициент корреляции  $>0.7$ ) с содержанием органического вещества.



**Рис. 3.** Корреляция между свойствами пахотных почв тестового поля (potas – содержание обменного калия, pH – pH солевой вытяжки, Ntot – массовая доля общего азота, pHw – pH водной вытяжки, hum – содержание органического вещества, phos – массовая доля соединений фосфора, Caex – содержание обменных катионов кальция, Mgex – содержание обменных катионов магния).

**Fig. 3.** Correlation between the properties of arable soils of the test field (potas – the content of exchangeable potassium, pH – pH of the salt extract, Ntot – the mass fraction of total nitrogen, pHw – pH of the water extract, hum – the content of organic matter, phos – the mass fraction of phosphorus compounds, Caex – the content of exchangeable calcium cations, Mgex – the content of exchangeable magnesium cations).

Оценка состояния открытой поверхности пахотных почв тестового поля в день проведения полевых работ показала, что доля корки на поверхности в точках отбора образцов варьировала от 0 до 1, среднее значение составило 0.48, коэффициент вариации оказался выше 80% (83.8%). Ошибка спектрального разделения находилась в диапазоне 0.005–0.159 со средним значением 0.031, коэффициент вариации при этом составил 120.1%.

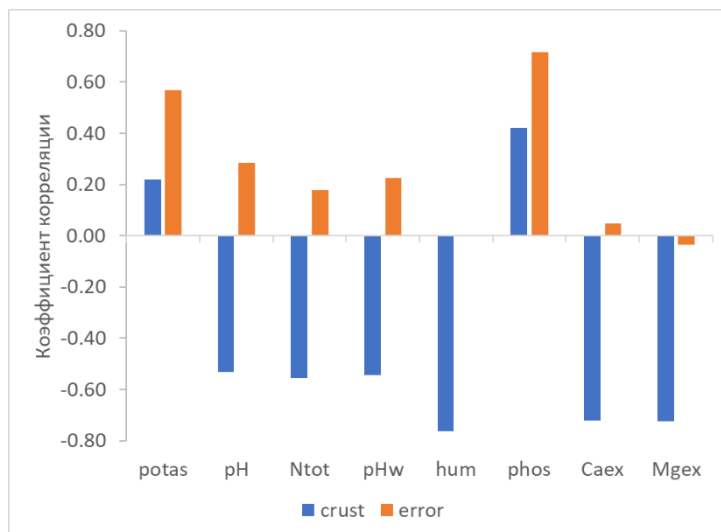
Доля корки оказалось достаточно сильно отрицательно скоррелирована с содержанием органического вещества (рис. 4) и со свойствами, которые показали высокую корреляцию с содержанием органического вещества (рис. 3). Содержание органического вещества, поскольку от него зависит стабильность почвенных агрегатов, определяет скорость и интенсивность коркообразования. Соответственно, почвы с низким содержанием органического вещества более склонны к коркообразованию, чем почвы с высоким содержанием органического вещества.

Ошибка спектрального разделения, в свою очередь, показала высокую положительную корреляцию с массовой долей соединений фосфора и обменным калием.

При моделировании свойств пахотных почв по данным полевого спектрометрирования худшие по качеству модели были получены для свойств с низкой корреляцией с содержанием органического вещества: обменный калий и соединения фосфора (табл. 4). В случае обменного калия  $R^2_{cv}$  моделей изменялся от 0.62 для модели без учета состояния поверхности до 0.64 для модели с учетом состояния поверхности. RPIQ в обоих случаях оказался очень низким (0.14) из-за высокой ошибки предсказания.

Что касается соединений фосфора,  $R^2_{cv}$  полученных моделей варьировал от 0.68 (без учета состояния поверхности) до 0.69 (с учетом состояния поверхности). RPIQ оказался чуть выше, чем в случае обменного калия, но все равно значения были очень низкими (0.4–0.5) также из-за высокой ошибки предсказания.

Наилучшая модель была получена для содержания органического вещества без учета состояния поверхности с  $R^2_{cv} = 0.90$  и RPIQ = 4.7.  $R^2_{cv}$  для модели с учетом состояния поверхности составил 0.83, RPIQ – 3.4.



**Рис.4.** Связь между состоянием открытой поверхности пахотных почв и их свойствами: crust – доля корки на открытой поверхности пахотных почв в точках отбора образцов, error – ошибка спектрального разделения.  
**Fig. 4.** Relationship between the state of the open surface of arable soils and their properties: crust – the area of the crust on the open surface of arable soils at sampling points, error – the spectral unmixing error.

Для pH водной солевой вытяжки были получены модели с достаточно высоким  $R^2_{cv}$ , но при этом RPIQ оказался меньше 2. Для pH солевой вытяжки  $R^2_{cv}$  полученных моделей варьировал от 0.70 (без учета состояния поверхности) до 0.79 (с учетом состояния поверхности), а RPIQ изменялся от 1.5 до 1.8 соответственно. В случае pH водной вытяжки  $R^2_{cv}$  моделей с учетом и без учета состояния поверхности был одинаковым и составил 0.74, RPIQ также получился достаточно близким по значению 1.7–1.8 соответственно.

**Таблица 4.** Модели, построенные по данным полевого спектрометрирования

**Table 4.** Models developed based on field spectrometry data

| Свойство                 | Информативные параметры | R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> | RMSE <sub>cv</sub> | RPIQ |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|------|
| Обменный калий           | HI, Band1               | 0.62                         | 235.8              | 0.14 |
|                          | Band1, Crust            | 0.64                         | 228.7              | 0.14 |
| pH солевой вытяжки       | HI, Band1               | 0.70                         | 0.47               | 1.5  |
|                          | Band1, Crust            | 0.79                         | 0.40               | 1.8  |
| Общий азот               | R34, HI, Band1          | 0.77                         | 0.05               | 2.6  |
|                          | HI, Error               | 0.73                         | 0.06               | 2.2  |
| pH водной вытяжки        | HI                      | 0.74                         | 0.32               | 1.8  |
|                          | Crust, Error            | 0.74                         | 0.33               | 1.7  |
| Органическое вещество    | R34, HI, Band1          | <b>0.90</b>                  | 0.63               | 4.7  |
|                          | Crust                   | 0.83                         | 0.91               | 3.2  |
| Соединения фосфора       | HI, Band1               | 0.68                         | 0.12               | 0.4  |
|                          | Band1, Crust            | 0.69                         | 0.11               | 0.5  |
| Обменные катионы кальция | HI, Band1               | 0.84                         | 2.42               | 2.5  |
|                          | Crust, Error            | 0.81                         | 2.52               | 2.4  |
| Обменные катионы магния  | R34, HI                 | 0.86                         | 0.33               | 3.1  |

**Примечание.** HI – спектральный индекс из табл. 2, Band1 – спектральная отражательная способность, измеренная полевым спектрорадиометром и пересчитанная в канал 1 Landsat 8-9 OLI, R34 – отношение спектральной отражательной способности, пересчитанной в канал 3 Landsat 8-9 OLI, к спектральной отражательной способности, пересчитанной в канал 4 Landsat 8-9 OLI, Crust – доля корки на открытой поверхности пахотных почв тестового поля, Error – ошибка спектрального разделения.

**Note.** HI – spectral index from Table 2, Band1 – spectral reflectance measured by field spectroradiometer and recalculated to Landsat 8-9 OLI channel 1, R34 – ratio of spectral reflectance recalculated to Landsat 8-9 OLI channel 3 to spectral reflectance recalculated to Land-sat 8-9 OLI channel 4, Crust – fraction of crust on the open surface of arable soils of the test field, Error – spectral separation error.

Что касается общего азота,  $R^2_{cv}$  полученных моделей варьировал от 0.73 (с учетом состояния поверхности) до 0.77 (без учета состояния поверхности). RPIQ изменялся в районе 2.2–2.6 соответственно.

При моделировании содержания обменных катионов кальция  $R^2_{cv}$  полученных моделей варьировал от 0.81 (с учетом состояния поверхности) до 0.84 (без учета состояния поверхности). RPIQ изменялся в районе 2.4–2.5 соответственно.

В случае обменных катионов магния статистически достоверная модель была получена только без учета состояния поверхности с  $R^2_{cv} = 0.86$  и RPIQ = 3.1.

Таким образом, привлечение информации о состоянии поверхности позволило повысить качество моделей, полученных по результатам полевого спектрометрирования, для таких свойств, как обменный калий, pH солевой вытяжки, соединения фосфора. В остальных случаях модели без информации о состоянии поверхности оказались более высокого качества. При этом для pH водной вытяжки и обменных катионов кальция модели, учитывающие информацию о состоянии поверхности, содержали только данные о доле корки и ошибке спектрального разделения, а для органического вещества – только данные о доле корки. Информативность доли корки при картографировании содержания органического вещества в случае, когда открытая поверхность почвы достаточно сильно трансформирована, уже отмечалась нами ранее в других исследованиях ([Prudnikova, Savin, 2021](#)).

Анализ состояния открытой поверхности по данным Landsat 8-9 OLI за выбранные сроки съемки показал, что поверхность тестового поля была более трансформирована на снимке от 06.05.2022 поскольку минимальное, среднее и максимальное значение доли корки в пикселе в эту дату оказалось выше, чем на снимке от 12.04.2022 (табл. 5).

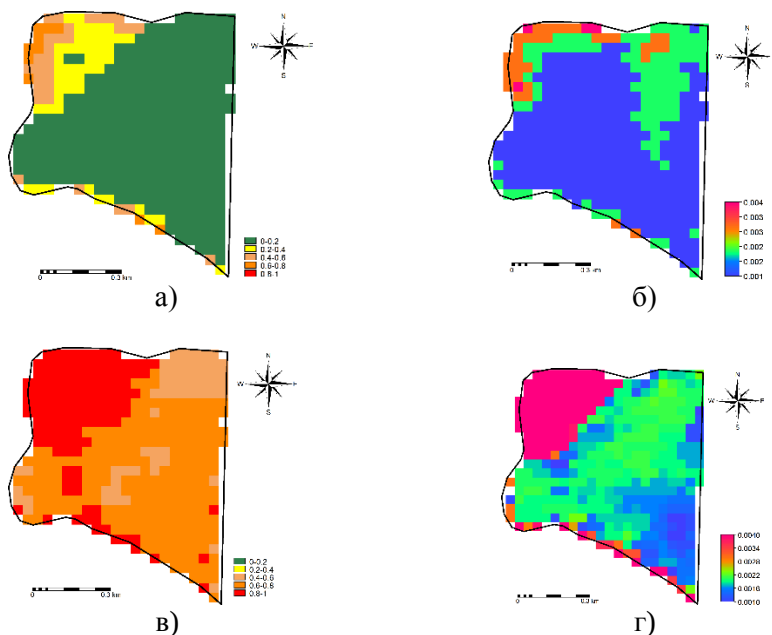
Карты, отражающие пространственное варьирование доли корки и ошибки спектрального разделения в выбранные сроки съемки, представлены ниже на рисунке 5. В северо-западной части тестового поля выделяется область, которая сильнее всего подвержена трансформации и, соответственно, коркообразованию

(рис. 5 а, в). В этой части поля также отмечается достаточно интенсивное растрескивание (рис. 5 б, г).

**Таблица 5.** Варьирование доли корки и ошибки спектрального разделения по данным Landsat 8-9 OLI для тестового поля (414 пикселей)  
**Table 5.** Variation in crust area and spectral separation error from Landsat 8-9 OLI data for a test field (414 pixels)

|                                 | 12.04.2022 |          |         |                        |                      |
|---------------------------------|------------|----------|---------|------------------------|----------------------|
|                                 | минимум    | максимум | среднее | стандартное отклонение | Коэффициент вариации |
| Доля корки                      | 0          | 0.71     | 0.32    | 0.2                    | 62.5                 |
| Ошибка спектрального разделения | 0          | 0.004    | 0.002   | 0.002                  | 100                  |
|                                 | 06.05.2022 |          |         |                        |                      |
|                                 | минимум    | максимум | среднее | стандартное отклонение | Коэффициент вариации |
| Доля корки                      | 0.43       | 1        | 0.72    | 0.16                   | 22.2                 |
| Ошибка спектрального разделения | 0.001      | 0.0205   | 0.0095  | 0.0062                 | 65.3                 |

При моделировании свойств по спутниковым данным, в случае обменного калия и соединений фосфора статистически достоверные модели были получены только для майского срока съемки (табл. 6). При этом ошибка предсказания осталась достаточно высокой как без учета, так и с учетом состояния поверхности. Данные свойства характеризуются достаточно высокой вариабельностью с коэффициентом вариации, превышающим 80% (табл. 3), и наименьшей корреляцией с содержанием органического вещества (коэффициент корреляции  $<0.3$ ) (рис. 3).



**Рис. 5.** Карты состояния открытой поверхности пахотных почв тестового поля для сцены от 12.04.2022 г. (**а** – доля корки, **б** – ошибка спектрального разделения) и от 06.05.2022 г. (**в** – доля корки, **г** – ошибка спектрального разделения).

**Fig. 5.** Maps of the state of the open surface of arable soils of the test field for the scene acquired at 12.04.2022 (**a** – crust area, **б** – spectral unmixing error) and at 06.05.2022 (**в** – crust area, **г** – spectral unmixing error).

Что касается pH солевой вытяжки, то статистически достоверные модели были получены для обоих анализируемых сроков съемки. Однако лучше оказалась модель для апрельской сцены без учета состояния поверхности.

В случае общего азота также статистически достоверные модели были получены как для апрельской, так и для майской сцен. При этом лучшая модель была получена для майской сцены с учетом состояния поверхности во время съемки.

**Таблица 6.** Модели, построенные по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI

**Table 6.** Models built based on Landsat 8-9 OLI satellite data

| Свойства                 | Срок съемки         |                              |                    |            |                         |                              |                    |            |
|--------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|------------|
|                          | 12.04.2022          |                              |                    |            | 06.05.2022              |                              |                    |            |
|                          | параметры           | R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> | RMSE <sub>cv</sub> | RPIQ       | параметры               | R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> | RMSE <sub>cv</sub> | RPIQ       |
| Обменный калий           | -                   | -                            | -                  | -          | HI                      | 0.62                         | 215.7              | 0.2        |
|                          | -                   | -                            | -                  | -          | HI, Crust               | 0.62                         | 216.8              | 0.2        |
| pH солевой вытяжки       | <b>Band1</b>        | <b>0.87</b>                  | <b>0.27</b>        | <b>2.6</b> | HI                      | 0.72                         | 0.36               | 1.9        |
|                          | Error, Crust        | 0.84                         | 0.28               | 2.5        | HI, Crust               | 0.80                         | 0.34               | 2.1        |
| Общий азот               | Band1               | 0.78                         | 0.05               | 2.6        | -                       | -                            | -                  | -          |
|                          | Crust               | 0.81                         | 0.05               | 2.6        | <b>Error</b>            | <b>0.81</b>                  | <b>0.04</b>        | <b>3.3</b> |
| pH водной вытяжки        | HI                  | 0.72                         | 0.36               | 1.6        | HI                      | 0.69                         | 0.33               | 1.7        |
|                          | <b>Error, Crust</b> | <b>0.82</b>                  | <b>0.26</b>        | <b>2.2</b> | Error                   | 0.81                         | 0.28               | 2.0        |
| Органическое вещество    | R34, HI, Band1      | 0.88                         | 0.67               | 4.4        | R34, HI                 | 0.88                         | 0.80               | 3.7        |
|                          | Error, Crust        | 0.91                         | 0.69               | 4.3        | <b>HI, Band1, Error</b> | <b>0.91</b>                  | <b>0.63</b>        | <b>4.7</b> |
| Соединения фосфора       | -                   | -                            | -                  | -          | HI, Band1, Crust        | 0.57                         | 0.13               | 0.4        |
| Обменные катионы кальция | Band1               | 0.89                         | 1.73               | 3.5        | R34, HI                 | 0.86                         | 2.1                | 2.9        |
|                          | <b>Error, Crust</b> | <b>0.91</b>                  | <b>1.71</b>        | <b>3.5</b> | HI, Error, Crust        | 0.90                         | 1.90               | 3.2        |
| Обменные катионы магния  | R34, HI             | 0.80                         | 0.45               | 2.3        | R34, HI                 | 0.85                         | 0.35               | 2.9        |
|                          | <b>Error, Crust</b> | <b>0.89</b>                  | <b>0.28</b>        | <b>3.6</b> | HI, Error, Crust        | 0.89                         | 0.31               | 3.3        |

Что касается pH водной вытяжки, лучшая модель была получена с учетом состояния поверхности для апрельского срока съемки. Однако модель для данного варианта для майского срока съемки оказалась достаточно близкой по предсказательной способности.

В случае содержания органического вещества лучшая модель также была получена с учетом состояния поверхности. При этом при одинаковом  $R^2_{cv}$  для майского срока ошибка предсказания оказалась чуть ниже, чем для апрельского.

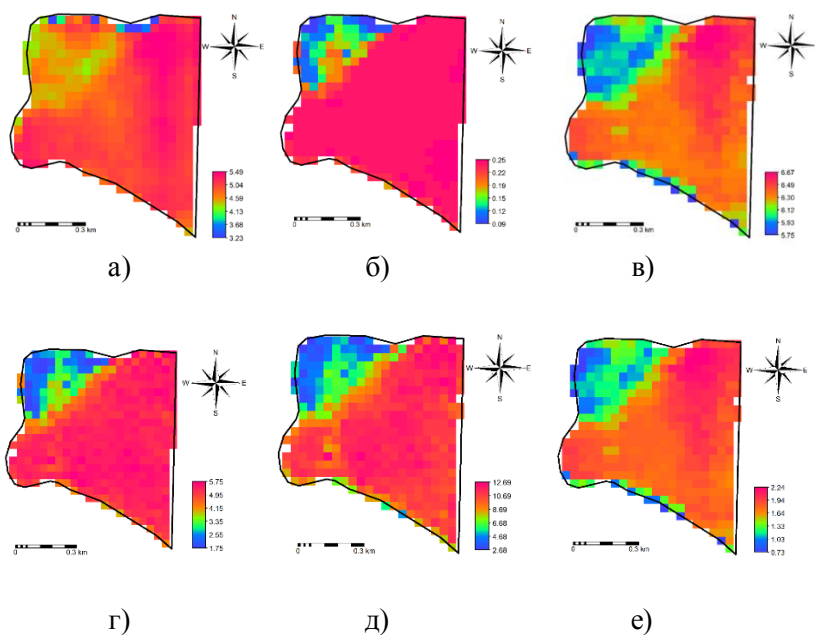
Для обменных катионов кальция и магния лучшая модель была получена с учетом состояния поверхности для апрельского срока съемки. При этом модели с учетом состояния поверхности для разных сроков отличаются незначительно по величине  $R^2_{cv}$  и по ошибке предсказания.

Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. Исключение составил обменный калий, в случае которого привлечение информации о состоянии поверхности почв привело к увеличению ошибки предсказания при неизменности  $R^2_{cv}$ . Также для pH солевой вытяжки привлечение информации о состоянии поверхности для апрельского срока съемки привело к снижению  $R^2_{cv}$  и небольшому увеличению ошибки предсказания.

В целом модели для разных сроков съемки с учетом состояния поверхности имели достаточно близкий  $R^2_{cv}$  и незначительно отличались по ошибке предсказания. Похожие результаты были получены для содержания органического вещества для тестового поля с серыми лесными почвами ([Prudnikova, Savin, 2021](#)), когда привлечение информации о состоянии открытой поверхности почвы также позволило получить стабильные модели с близкой предсказательной способностью вне зависимости от срока съемки. В ряде случаев для моделирования было достаточно только информации о состоянии открытой поверхности.

Карты свойств пахотных почв тестового поля, построенные на основе лучших по качеству моделей (выделены в табл. 6 жирным шрифтом), представлены ниже на рисунке 6. Следует отме-

титель, что северо-западная часть тестового поля, которая более склонна к коркообразованию, отличается более низкими значениями анализируемых свойств.



**Рис. 6.** Карты свойств пахотных почв тестового поля, построенные по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI: **а)** pH солевой вытяжки; **б)** общий азот; **в)** pH водной вытяжки; **г)** органическое вещество; **д)** обменные катионы кальция; **е)** обменные катионы магния.

**Fig. 6.** Maps of the properties of arable soils of the test field, built based on Landsat 8-9 OLI satellite data: **a)** pH of the salt extract; **б)** total nitrogen; **в)** pH of the water extract; **г)** organic matter; **д)** exchangeable calcium cations; **е)** exchangeable magnesium cations.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере тестового поля, расположенного в Серебряно-Прудском районе Московской области, была проведена демонстрация метода спутниковой оценки агрономически важных

свойств пахотных почв с привлечением информации о состоянии их поверхности. В зависимости от свойства  $R^2_{cv}$  моделей, построенных по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI, варьировал от 0.57 до 0.91. Наилучшие модели  $R^2_{cv} > 0.8$  были получены для органического вещества, обменных катионов кальция и магния, общего азота, pH водной и солевой вытяжек. На основе полученных моделей в рамках демонстрации метода были построены карты пространственного варьирования агрономически важных свойств пахотных почв поля.

Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить по спутниковым данным модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. При этом следует отметить, что в оба выбранных срока съемки открытая поверхность находилась в трансформированном состоянии, т. е. была затронута процессом коркообразования.

На возможность дистанционной оценки агрономически важных свойств в данном случае преимущественно повлияла величина их корреляции с содержанием органического вещества, а также вариабельность самих свойств.

Полученные модели могут быть использованы для дистанционного мониторинга анализируемых свойств пахотных почв тестового поля, за исключением обменного калия и соединений фосфора. Для данных свойств необходимы поиск подходов, учитывающих их высокую пространственную вариабельность, а также предварительная оценка информативности сроков съемки, в которые открытая поверхность почвы нетрансформирована.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виндекер Г.В., Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю. Трансформация открытой поверхности почв под воздействием осадков в модельном эксперименте // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 95. С. 23–40. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-23-40](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-23-40).
2. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки.
3. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

4. *ГОСТ 26213-91*. Почвы. Методы определения органического вещества.
5. *ГОСТ Р 54650-2011*. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
6. *ГОСТ 26210-91*. Почвы. Определение обменного калия по методу Масловой.
7. *ГОСТ 26107-84*. Почвы. Методы определения общего азота.
8. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: МГУ, 2001. 176 с.
9. Почвенная карта совхоза им. Карла Маркса Серебряно-Прудского района Московской области (масштаб 1 : 10 000). М.: Мосгипроводхоз, 1991 г.
10. Прудникова Е.Ю., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е. Дифференциация и баланс минералов при трансформации открытой поверхности пахотных почв под воздействием атмосферных осадков // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 105–131. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
11. Савин И.Ю. Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. №. 8. С. 976–980.
12. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я. Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.
13. Bellinaso H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A. Soil spectral library and its use in soil classification // Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2010. Vol. 34. P. 861–870. DOI: [10.1590/S0100-06832010000300027](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300027).
14. Ben-Dor E., Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties // Soil Sci. Soc. Am. J. 1995. Vol. 59 (2). P. 364–372. DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x).
15. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2- to 2.5- $\mu$ m spectral region // Soil Science Society of America Journal. 2003. Vol. 67 (1). P. 289–299. DOI: [10.2136/sssaj2003.2890](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890).
16. Chen J., Yuan Zhang M., Wang L., Shimazaki H., Tamura M. A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 96. P. 165–175. DOI: [10.1016/j.rse.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.011).
17. Deering D.W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors: Ph.D. Thesis. Texas A&M University. College Station, TX, USA. 1978.

18. *Demattê J.A., Ramirez-Lopez L., Marques K.P.P., Rodella A.A.* Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy // *Geoderma*. 2017. Vol. 288. P. 8–22. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.013).
19. *Fang Q., Hong H., Zhao L., Kukulich S., Yin K., Wang C.* Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: A review // *Journal of Spectroscopy*. 2018. Vol. 2018. DOI: [10.1155/2018/3168974](https://doi.org/10.1155/2018/3168974).
20. *Huete A.R.* A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote sensing of environment*. 1988. Vol. 25. P. 295–309. DOI: [10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
21. *Jiang Z., Huete A., Didan K., Miura T.* Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. P. 3833–3845. DOI: [10.1016/j.rse.2008.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006).
22. *Karnieli A.* Development and implementation of spectral crust index over dune sands // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. P. 1207–1220. DOI: [10.1080/014311697218368](https://doi.org/10.1080/014311697218368).
23. *Kuang B., Mahmood H.S., Quraishi M.Z., Hoogmoed W.B., Mouazen A.M., Henten E.J.V.* Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: a review // *Adv. Agr.* 2012. Vol. 114. P. 155–223. DOI: [10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1).
24. *Lesaigroux A., Fabre S., Briotter X., Olioso A.* Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15  $\mu\text{m}$  domain // 6. *EARSeL; Imaging spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications*. 2009. 6 p.
25. *McFeeters K., Stuart K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International journal of remote sensing*. 1996. Vol. 17.7. P. 1425–1432. DOI: [10.1080/01431169608948714](https://doi.org/10.1080/01431169608948714).
26. *Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R.* Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment // *Remote sensing of environment*. 1998. Vol. 66. P. 17–28. DOI: [10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3).
27. *Mouazen A.M., Kuang B.* On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management // *Soil Till. Res.* 2016. Vol. 155. P. 471–477. DOI: [10.1016/j.still.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003).
28. *Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D.* Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11 (16). P. 1932. DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).

29. Prudnikova E., Savin I. Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 2313. DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).
30. Rikimaru A., Roy P. S., Miyatake S. Tropical Forest cover density mapping // Tropical ecology. 2002. Vol. 43 (1). P. 39–47.
31. Savin I.Y., Vindeker G.V. Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 1019–1027. DOI: [10.1364/JOT.83.000642](https://doi.org/10.1364/JOT.83.000642).
32. Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J. Visible and near-infrared spectroscopy in soil science // Adv. Agr. 2010. Vol. 107. P. 163–215. DOI: [10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
33. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // Geoderma. 2006. Vol. 131. P. 59–75. DOI: [10.1016/j.geoderma.2005.03.007](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007).
34. Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. P. 2411–2422. DOI: [10.1080/01431160600554363](https://doi.org/10.1080/01431160600554363).

## REFERENCES

1. Vindeker G.V., Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Transformation of open soil surface under the impact of rainfall in model experiment, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 95, pp. 23–40, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-23-40](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-23-40).
2. State Standard, GOST 26423-85, Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract.
3. State Standard, GOST 26483-85, Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINAO method.
4. State Standard, GOST 26213-91, Soils. Methods for determination of organic matter.
5. State Standard, GOST R 54650-2011, Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov method modified by CINAO.
6. State Standard, GOST 26210-91, Soils. Determination of exchangeable potassium by Maslova method.
7. State Standard, GOST 26107-84, Soils. Methods for determination of total nitrogen.

8. Orlov D.S., Suhanova N.I., Rozanova M.S., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' pochv i ih komponentov* (Spectral reflective capacity of soils and their components), Moscow: Moscow State University, 2001, 176 p.
9. *Pochvennaya karta sovhoza im. Karla Marksa Serebrjano-Prudskogo rajona Moskovskoj oblasti* (masshtab 1 : 10 000) (Soil map of the state farm of Karl Marx Serebryano-Prudsky district of the Moscow region (scale 1 : 10 000)), Moscow, Mosgiprovodhoz, 1991.
10. Prudnikova E.Yu., Varlamov E.B., Churilin N.A., Churilina A.E., Differentiation and balance of minerals during transformation of the open surface of arable soils under the impact of rain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 105–131, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
11. Savin I.Yu., *Vliyanie livnovego dozhdya na integral'nyu otrazhatel'nyu sposobnost' poverkhnosti chernozemnykh pochv* (The influence of heavy rainfall on the integral surface reflectance of chernozem soil), *Pochvovedenie*, 1995, No. 8, pp. 976–980.
12. Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Ivanov A.L., Prudnikova E.Yu., Zhogolev A.V., Voronin A.Ya., *Tekhnologii sostavleniya i obnovleniya pochvennykh kart* (Technologies for compiling and updating soil maps), Moscow: Pero, 2019, 328 p.
13. Bellinaso H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A., Soil spectral library and its use in soil classification, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010, Vol. 34, pp. 861–870, DOI: [10.1590/S0100-06832010000300027](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300027).
14. Ben-Dor E., Banin A., Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, Vol. 59 (2), pp. 364–372, DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x).
15. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G., The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2- to 2.5- $\mu$ m spectral region, *Soil Science Society of America Journal*, 2003, Vol. 67 (1), pp. 289–299, DOI: [10.2136/sssaj2003.2890](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890).
16. Chen J., Yuan Zhang M., Wang L., Shimazaki H., Tamura M., A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, pp. 165–175, DOI: [10.1016/j.rse.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.011).
17. Deering D.W., *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*: Ph.D. Thesis. Texas A&M University. College Station, TX, USA. 1978.
18. Demattê J.A., Ramirez-Lopez L., Marques K.P.P., Rodella A.A., Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy, *Geoderma*, 2017, Vol. 288, pp. 8–22, DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.013).

19. Fang Q., Hong H., Zhao L., Kukulich S., Yin K., Wang C. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: A review, *Journal of Spectroscopy*, 2018, Vol. 2018, DOI: [10.1155/2018/3168974](https://doi.org/10.1155/2018/3168974).
20. Huete A.R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote sensing of environment*, 1988, Vol. 25, pp. 295–309, DOI: [10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
21. Jiang Z., Huete A., Didan K., Miura T., Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3833–3845, DOI: [10.1016/j.rse.2008.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006).
22. Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, pp. 1207–1220, DOI: [10.1080/014311697218368](https://doi.org/10.1080/014311697218368).
23. Kuang B., Mahmood H.S., Quraishi M.Z., Hoogmoed W.B., Mouazen A.M., Henten E.J.V., Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: a review, *Adv. Agr.*, 2012, Vol. 114, pp. 155–223, DOI: [10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1).
24. Lesaignoux A., Fabre S., Briotter X., Olivos A., Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15  $\mu\text{m}$  domain, In: 6. *EARSeL; Imaging spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications*, 2009, 6 p.
25. McFeeters K., Stuart K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International journal of remote sensing*, 1996, Vol. 17 (7), pp. 1425–1432, DOI: [10.1080/01431169608948714](https://doi.org/10.1080/01431169608948714).
26. Mathieu R., Pouget M., Cerville B., Escadafal R., Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment, *Remote sensing of environment*, 1998, Vol. 66, pp. 17–28, DOI: [10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3).
27. Mouazen A.M., Kuang B., On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management, *Soil Till. Res.*, 2016, Vol. 155, pp. 471–477, DOI: [10.1016/j.still.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003).
28. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D., Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11 (16), pp. 1932, DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).
29. Prudnikova E., Savin I. Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 12, pp. 2313, DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).

30. Rikimaru A., Roy P. S., Miyatake S., Tropical Forest cover density mapping, *Tropical ecology*, 2002, Vol. 43 (1), pp. 39–47.
31. Savin I.Y., Vindeker G.V., Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 7, pp. 1019–1027, DOI: [10.1364/JOT.83.000642](https://doi.org/10.1364/JOT.83.000642).
32. Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J., Visible and near-infrared spectroscopy in soil science, *Adv. Agr.*, 2010, Vol. 107, pp. 163–215, DOI: [10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
33. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 59–75, DOI: [10.1016/j.geoderma.2005.03.007](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007).
34. Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W., Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, pp. 2411–2422, DOI: [10.1080/01431160600554363](https://doi.org/10.1080/01431160600554363).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-160-198



### Ссылки для цитирования:

Семенов М.В., Железова А.Д., Ксенофонтова Н.А., Иванова Е.А., Никитин Д.А. Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 160-198. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-160-198

### Cite this article as:

Semenov M.V., Zhelezova A.D., Ksenofontova N.A., Ivanova E.A., Nikitin D.A., Chicken manure as an organic fertilizer: composting technologies and impact on soil properties (a review), Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 160-198, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-160-198

### Благодарность:

Работа выполнена молодежной лабораторией Почвенного углерода и микробной экологии в рамках госзадания Министерства Образования и науки Российской Федерации “Исследование микробных драйверов секвестрации и депонирования органического углерода в почвах агроэкосистем” (№ 0439-2022-0018).

### Acknowledgments:

The research was conducted by the Laboratory of Soil Carbon and Microbial Ecology within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation titled “The Study of Microbial Drivers of Sequestration and Storage of Organic Carbon in Soils of Agroecosystems” (No. 0439-2022-0018).

## Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор)

© 2023 г. М. В. Семенов\*, А. Д. Железова\*\*,  
Н. А. Ксенофонтова\*\*\*, Е. А. Иванова\*\*\*\*, Д. А. Никитин\*\*\*\*\*

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\*<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2086-299X>,

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1317-5101>,

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-1589-9875>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>, e-mail: [dimnik90@mail.ru](mailto:dimnik90@mail.ru).

Поступила в редакцию 14.03.2023, после доработки 29.03.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Куриный помёт и компосты на его основе являются ценными органическими удобрениями, способными положительно влиять на плодородие почвы и значительно повышать урожайность сельскохозяйственных культур. Однако внесение свежего помёта может приводить к избыточным концентрациям азота и других питательных веществ в почве, а также заражению почвы микроорганизмами, патогенными для человека и животных. Поэтому перед использованием в земледелии рекомендуется предварительное компостирование куриного помёта. В обзоре рассмотрены состав и свойства куриного помёта, технологии его компостирования, а также его влияние на физические, химические и биологические свойства почвы. Применение компостированного помёта способствует увеличению в нем содержания органического углерода (в среднем на 1–1.5%), азота (на 0.1–0.2%) и других биофильных элементов. Кроме того, наблюдается улучшение таких физических свойств почвы, как пористость, аэрированность, снижается плотность почвы, а также происходит повышение pH (на 0.2–0.4), электропроводности (в 2–2.5 раза) и количества водостойких агрегатов (на 5–10%). Применение данных видов удобрений также способствует повышению биологической активности, микробного разнообразия, углерода микробной биомассы (на 25–75%) и ферментативной активности почвы (фосфатазы и каталазы – в 5–7 раз; уреазы – в 3–5 раз). При внесении куриного помёта в почву отмечается значительное (в 2–4 раза) увеличение численности бактерий филумов Firmicutes, Bacteroidetes и Actinobacteria. Обсуждается необходимость изучения влияния компостов на основе куриного помёта на химический состав и пулы почвенного органического вещества, поровое пространство и эколого-трофическую структуру почвенного микробиома.

**Ключевые слова:** плодородие почвы, почвенное органическое вещество, биологическая активность почвы, микроорганизмы.

## Chicken manure as an organic fertilizer: composting technologies and impact on soil properties (a review)

© 2023 M. V. Semenov<sup>1\*</sup>, A. D. Zhelezova, N. A. Ksenofontova,  
E. A. Ivanova, D. A. Nikitin

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,*

*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2086-299X>,*

*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1317-5101>,*

*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1589-9875>,*

*\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>, e-mail: [dimnik90@mail.ru](mailto:dimnik90@mail.ru).*

*Received 14.03.2023, Revised 29.03.2023, Accepted 27.06.2023*

**Abstract:** Chicken manure and composts derived from it are valuable organic fertilizers that have a positive impact on soil fertility and significantly enhance crop yields. However, the application of fresh manure can lead to excessive concentrations of nitrogen and other nutrients in the soil, as well as contamination of the soil with microorganisms that are pathogenic to humans and animals. Therefore, it is recommended to compost chicken manure prior to its use in agriculture. This review examines the composition and properties of chicken manure, the techniques involved in its composting, and its influence on the physical, chemical, and biological properties of the soil. The utilization of composted manure results in increased levels of organic carbon (on average by 1–1.5%), nitrogen (by 0.1–0.2%), and other biophilic elements. Moreover, it improves various physical properties of the soil, such as porosity, aeration, and density. Levels of pH increase (by 0.2–0.4), as well as electrical conductivity (by 2–2.5 times), and the quantity of water-resistant aggregates (by 5–10%). The application of these fertilizers also promotes biological activity, microbial diversity, microbial biomass carbon (by 25–75%), and soil enzymatic activity (phosphatase and catalase increase by 5–7 times, and urease by 3–5 times). When chicken manure is incorporated into the soil, a significant (2–4 times) increase in the population of bacteria from the phyla Firmicutes, Bacteroidetes, and Actinobacteria is observed. The necessity of investigating the effects of compost derived from chicken manure on the chemical composition and storage of soil organic matter, pore space, and the ecotrophic structure of the soil microbiome is also discussed.

**Keywords:** soil fertility, soil organic matter, soil biological activity, microorganisms.

## ВВЕДЕНИЕ

Плодородие почв определяется суммой ее химических, физических и биологических характеристик. Значительное влияние на плодородие оказывает содержание и качественный состав почвенного органического вещества (ПОВ). Снижение запасов ПОВ

из-за интенсивного сельскохозяйственного использования и эрозионных процессов уменьшает плодородие и устойчивость почвы к различным стрессам ([Кирюшин, 2019](#)). Одним из способов увеличения содержания ПОВ и биологической активности почв является применение различных органических удобрений, в том числе коровьего или свиного навоза, куриного помета и компостов на их основе ([Васильев и др., 1984](#); [Мерзлая и др., 1991](#); [Еськов и др., 2001](#); [Сычев и др., 2018](#)).

Поголовье кур в России стремительно растет, и к 2019 г. оно достигло полумиллиона особей, увеличившись на 11% с 2014 г. ([Наумова, 2021](#)). Учитывая, что каждая тысяча цыплят производит 65 кг помета в день, а такое же число взрослых кур – 150 кг ([Urre et al., 2019](#); [Drózd et al., 2020](#)), проблема грамотной утилизации куриного помета встает все более остро. В то же время куриный помет и компосты на его основе являются ценными органическими удобрениями, богатыми питательными элементами и способными к подщелачиванию почвы ([Васильев и др., 1984](#); [Еськов и др., 2001](#); [Amanullah et al., 2007](#); [Фисинин и др., 2013](#); [Minkina et al., 2022](#)).

В конце 2022 г. была утверждена отраслевая программа “Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в сфере сельского хозяйства на 2022–2030 годы” в рамках реализации закона № 248-ФЗ от 14 июля 2022 г. “О побочных продуктах животноводства...” и Федерального проекта “Экономика замкнутого цикла”. Программой предусматривается обязательная переработка органических отходов сельскохозяйственного производства, включая куриный помет, для их обеззараживания согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям и дальнейшего использования в качестве органических удобрений для обеспечения воспроизводства плодородия земель сельскохозяйственного назначения. С целью устранения правовой неопределенности было принято специальное правовое регулирование обращения с навозом и пометом, в рамках которого допускается признавать их не как отходы, а как побочные продукты животноводства.

Таким образом, проблема утилизации и технологий компостирования куриного помета, а также его воздействия на физические, химические и биологические свойства почв в настоящее

время характеризуется особой актуальностью.

## СОСТАВ И СВОЙСТВА КУРИНОГО ПОМЕТА

В курином помете содержится 60–75% воды, примерно по 2% азота и фосфора, 1.5% калия ([Васильев, Филиппова, 1988](#); [Ashworth et al., 2021](#); [Наумова, 2021](#)), железа 367–900, цинка 12–39, марганца 15–38, меди – 0.5, кобальта 1–1.2 мг/100 г сухого вещества ([Kelleher et al., 2002](#); [Теучеж, 2017](#)). Таким образом, на каждую тонну куриного помета приходится по 55 кг NPK, что превышает содержание азота, фосфора и калия в навозе коров и свиней, а также в помете гусей и уток ([Васильев, Филиппова, 1988](#); [Oagile, Namasiku, 2010](#); [Фисинин и др., 2013](#)). Количество производимого свежего куриного помета и его точный химический состав зависят от многих факторов, таких как условия выращивания цыплят, используемые корма и подстилки ([Urta et al., 2019](#); [Ashworth et al., 2021](#)). Азот в помете находится в форме мочевой кислоты, которая быстро разлагается с образованием аммиака ([Jiang et al., 2021](#)). В целом внесение куриного помета приводит к увеличению плодородия почвы и к лучшей доступности питательных элементов для растений ([Ojeniyi, 2008](#); [Фисинин и др., 2013](#)). Куриный помет отличается от других видов животноводческих отходов самой высокой скоростью минерализации органического вещества в следующей последовательности: помет птичий (куриный) – 0.158, навоз свиной – 0.122, навоз коровий – 0.068, навоз конский – 0.026 сут<sup>-1</sup> ([Васильев, Филиппова, 1988](#); [Ajwa, Tabatabai, 1994](#); [Еськов и др., 2001](#); [Фисинин и др., 2013](#)).

С другой стороны, некоторые свойства куриного помета ограничивают его использование ([Фисинин и др., 2013](#)). В первую очередь, куриный помет содержит значительное количество жизнеспособных яиц гельминтов, возбудителей инфекционных болезней (сальмонелл, стафилококков, энтерококков), а также семян сорняков ([Kelleher et al., 2002](#); [Hruby et al., 2018](#); [Chen, Jiang, 2014](#); [Guo et al., 2022](#)). По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), куриный помет может быть источником более 100 возбудителей инфекционных и инвазионных заболеваний ([Minkina et al., 2022](#)). Во-вторых, это непостоянство химического и микробиологического состава, а также отсутствие сертификации как на

сам помет, так и на материал подстилки ([Ashworth et al., 2021](#); [Gurmesssa et al., 2021](#)). В-третьих, в свежем курином помете содержится относительно много воды, что делает нерентабельным его перевозку на большие расстояния ([Седых, Карауш, 2010](#)).

Помимо вышеперечисленных ограничений, существенным нежелательным эффектом применения куриного помета в качестве удобрения является распространение антибиотикорезистентных форм микроорганизмов и, соответственно, генов антибиотикорезистентности (Su et al., 2014; [Gurmesssa et al., 2021](#)). Антибиотики, особенно тетрациклины и сульфаниламиды, широко используются в сельском хозяйстве в качестве ветеринарных препаратов для повышения иммунитета животных ([Zhao et al., 2017](#)). Известно, что более половины (52%) производимых антибиотиков идет на нужды животноводства, а не для лечения людей ([Yang et al., 2016](#)). Основная часть (до 90%) антибиотиков выводится из организма без существенных изменений ([Yang et al., 2016](#); [Zhao et al., 2017](#); [Subirats et al., 2021](#); [Wu et al., 2022](#)). При внесении куриного помета в почву есть вероятность попадания остаточных количеств антибиотиков из навоза на поля, что, в свою очередь, является одним из основных источников загрязнения сельскохозяйственных культур антибиотиками ([Zhao et al., 2017](#)). Куриный помет содержит большее количество остаточных количеств антибиотиков и может оказывать более сильное воздействие на генетический состав резистомы почвы по сравнению с навозом крупного рогатого скота ([Yang et al., 2016](#); [Urre et al., 2019](#); [Gurmesssa et al., 2021](#)). Чрезмерное использование антибиотиков способствует их распространению в окружающей среде и повышет риски развития антибиотикорезистентности у почвенных микроорганизмов ([Zhao et al., 2017](#); [Wang et al., 2015](#); [Urre et al., 2019](#)). Гены антибиотикорезистентности могут передаваться и в микробиоту сельскохозяйственных растений ([Zhang et al., 2017](#); 2019; [Lacóni et al., 2021](#)). По-прежнему остается неясным, насколько хорошо выживают антибиотикорезистентные микроорганизмы помета в почве ([Yang et al., 2016](#)), однако имеются отдельные сведения, что кишечные бактерии и гены антибиотикорезистентности из куриного помета могут сохраняться в почве в течение как минимум нескольких недель после внесения ([Subirats et al., 2021](#)).

Исторически куриный помет использовался в качестве удобрения в малых объемах в личных подсобных хозяйствах и на небольших фермах. При увеличении объемов производства возникают проблемы утилизации и хранения куриного помета, его транспортировки к месту применения в качестве удобрения ([Еськов и др., 2001](#)). Транспортировка свыше 40 км становится нерентабельной ([Мерзлая и др., 1991](#); [Седых, Карауш, 2010](#)). Некоторые из этих проблем можно решить с помощью компостирования. Также компостирование значительно снижает количество патогенных микроорганизмов, семян сорняков, и в некоторой степени уменьшает распространение генов антибиотикорезистентности.

## ТЕХНОЛОГИИ КОМПОСТИРОВАНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА

Компостирование – один из наиболее широко используемых способов улучшения качества помета, предполагающих при этом относительно быструю (обычно 4–6 недель) аэробную трансформацию органических отходов посредством микробиологических процессов ([Седых, Карауш, 2010](#); [Rynk et al., 2022](#)). Также для этой цели используют смешивание помета с подстилкой из растительных остатков (соломы, опилок, торфа и т. д.), которая в процессе микробиологической ферментации переводит макро- и микроэлементы в доступные для растений формы ([Kelleher et al., 2002](#); [Guerra- Rodríguez et al., 2003](#); [Wan et al., 2020](#)).

Компостирование куриного помета способствует уменьшению запаха, содержания воды и объема, уничтожению насекомых, гельминтов и семян сорных растений, гибели патогенных микроорганизмов ([Rynk et al., 2022](#)). В компостных продуктах уровни углерода и азота более стабильны ([Наумова, 2021](#)). Основными недостатками данной процедуры являются потеря части питательных веществ при минерализации, а также добавочная стоимость и трудозатраты в процессе переработки исходного материала ([Kelleher et al., 2002](#)).

Существует несколько технологий компостирования (рис. 1).

*Биотермическое компостирование* (рис. 2) заключается в 2–3-месячном выдерживании исходного продукта с добавлением

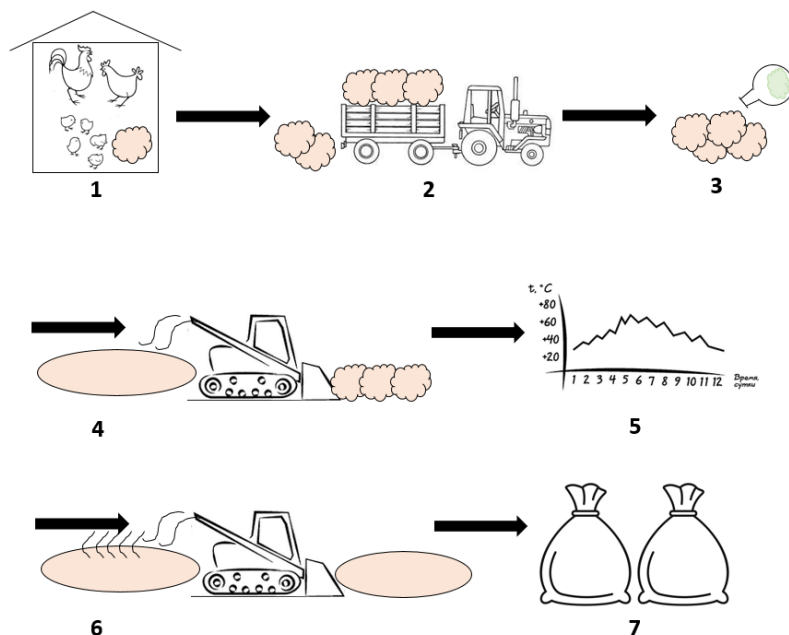
подстилки (солома, торф, опилки и т. д.) в закрытых буртах при температуре +60–70 °С ([Седых, Карауш, 2010](#); [Rynk et al., 2022](#)). Такие высокие температуры позволяют уничтожить семена сорных растений, вредных беспозвоночных животных и патогенные микроорганизмы ([Guerra- Rodríguez et al., 2003](#)). При биотермическом компостировании можно также использовать модификацию с добавлением культур микроорганизмов, которые позволяют проводить более быстрое и глубокое компостирование (рис. 2)

*Термическое компостирование* проводят при температуре +800 °С в вакуумных камерах. При этом выделяется значительное количество энергии, применяемой для обогрева птичников или выработки электричества. После сжигания компоста остается зола, которая химически стабильна, стерильна, а также проста в обращении и транспортировке ([Kelleher et al., 2002](#)). Однако данный способ весьма энергозатратен, и при его использовании теряются многие ценные питательные вещества. Альтернативным методом переработки куриного помета служит пиролиз при относительно невысоких температурах (обычно ниже +700 °С) в анаэробных условиях, в результате чего образуется биочар, который можно также вносить в почву ([Meier et al., 2017](#)).



**Рис. 1.** Технологии компостирования куриного помета.

**Fig. 1.** Technologies for chicken manure composting.



**Рис. 2.** Схема компостирования куриного помета с помощью биотермического метода в модификации с добавлением культур микроорганизмов. Цифрами обозначено: 1 – накопление помета в курятнике; 2 – доставка помета на площадку компостирования и формирование буртов; 3 – внесение в свежий помет биопрепаратов культур микроорганизмов (как дополнительная модификация метода); 4 – ворошение и перемешивание буртов помета для уничтожения патогенов; 5 – процесс термофильной ферментации помета; 6 – повторное ворошение и переворачивание помета для обогащения кислородом и выпаривания лишней влаги, созревание компоста; 7 – готовая продукция (зрелый компостированный помет).

**Fig. 2.** Scheme of chicken manure composting using the biothermal method. The numbers indicate: 1 – the accumulation of wastes in the chicken coop; 2 – delivery of manure to the composting site and formation of piles; 3 – introduction of biological preparations with cultures of microorganisms into fresh wastes; 4 – tedding and mixing piles of manure to kill pathogens; 5 – the process of thermophilic fermentation of manure; 6 – repeated tedding and turning of manure to enrich oxygen and evaporate excess moisture (maturation of compost); 7 – final product (mature composted manure).

Также существует компостирование помета путем гидролиза серной кислотой (*гидролитическое компостирование*) и последующим внесением в фугат биопрепаратов для ферментации ([Седых, Карауш, 2010](#); [Wan et al., 2020](#)). К сожалению, данный прием связан с большими рисками при несоблюдении техники безопасности и необходимостью подготовки квалифицированных кадров, имеющих разрешение на работу с опасными химическими реактивами.

Еще один способ компостирования заключается в обработке помета глинистым сорбентом (цеолит, морденит, вермикулит и др.) – *сорбентное компостирование* – для сокращения эмиссии аммиака, выделяющегося при минерализации, на 30–40% ([Jiang et al., 2021](#); [Kacprzak, Sobik-Szołtysek, 2022](#)). При определенной концентрации добавленной глины (2–4%) в компосте может происходить значительное снижение количества генов антибиотикорезистентности за счет сукцессионных изменений в бактериальном сообществе ([Awasthi et al., 2019](#)). Однако есть сведения о низкой эффективности данного метода при использовании такого компоста в качестве органического удобрения ([Еськов и др., 2001](#); [Kelleher et al., 2002](#)). В то же время основным недостатком перечисленных методов является большая длительность компостирования, а также наличие значительной территории ([Седых, Карауш, 2010](#)).

С учетом недостатков вышеупомянутых методик, а также благодаря развитию биотехнологий, для компостирования помета все чаще применяют *микробиологические* методы, основанные на использовании бактериальных препаратов и позволяющие не только уничтожать вредные микроорганизмы в исходном материале, но и накапливать в нем биофильные элементы в доступных для растений формах ([Мерзлая и др., 1991](#); [Wan et al., 2020](#); [Zainudin et al., 2022](#)). В качестве таких микроорганизмов используются бактерии родов *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Endomycopsis* и *Pseudomonas* ([Kelleher et al., 2002](#); [Gurmessa et al., 2021](#)). Представители перечисленных родов бактерий быстро размножаются, просты в культивировании, легко адаптируются к разнообразным условиям окружающей среды, ускоряют созревание компоста и ингибируют рост патогенных микроорганизмов, поэтому обычно

становятся доминантами в компостах ([Wu et al., 2022](#)). Для компостирования используют технологию анаэробного сбраживания, которое включает разложение и стабилизацию органического материала в бескислородных условиях. Анаэробное компостирование птичьего помета можно разделить на две стадии. На первом этапе (кислотное брожение) происходит микробиологическая ферментация и гидролиз сложных компонентов, включая жиры, белки и полисахариды, до органических кислот и спиртов с простомой новой микробной биомассы. Второй этап (метановое брожение) включает преобразование продуктов гидролиза в газы (в основном  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ) несколькими видами облигатных анаэробных бактерий. В результате содержание метана в итоговой газовой смеси может достигать 60%, поэтому его можно использовать как топливо в качестве альтернативы природному газу ([Kelleher et al., 2002](#); [Rubežius et al., 2020](#); [Zainudin et al., 2022](#)).

Наряду с микробиологическим методом, эффективным способом переработки куриного помета в органическое удобрение является *вермикомпостирование*. Этот процесс включает симбиотическое взаимодействие между дождевыми червями (например, *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* и *Perionyx excavatus*) и микроорганизмами для получения стабильного однородного гумусоподобного конечного продукта, иногда называемого “биогурусом” ([Lim et al., 2015](#)). Дождевые черви кондиционируют субстрат и увеличивают его биологическую активность для дальнейшего процесса биохимической трансформации органического вещества микроорганизмами ([Zhou et al., 2022](#)). Считается, что вермикомпост по многим физическим и химическим показателям лучше традиционного компоста благодаря высокой степени его гумификации ([Lim et al., 2015](#); [Zhou et al., 2022](#)). Другим преимуществом данного способа переработки помета является увеличение концентрации питательных элементов по сравнению с продуктами других способов компостирования ([Lim et al., 2015](#)). С другой стороны, чрезмерное количество вермикомпоста может привести к засолению почвы, поэтому данный вид органических удобрений следует вносить на сельскохозяйственные поля в умеренных дозах ([Еськов и др., 2001](#); [Lim et al., 2015](#); [Zhou et al., 2022](#)). Кроме того, техноло-

гия вермикомпостирования относительно сложна и нестабильна по сравнению с другими способами переработки помета.

Компостирование помета перед внесением в почву существенно (50–70%) снижает количество остаточных антибиотиков и генов антибиотикорезистентности, что уменьшает риск заражения сельскохозяйственных культур, животных и человека ([Subirats et al., 2021](#); [Wu et al., 2022](#)). Наиболее эффективным методом переработки куриного помета в данном контексте считается аэробное компостирование, поскольку наличие в его технологии высокотемпературной фазы приводит к деградации генов антибиотикорезистентности ([Wu et al., 2022](#); [Ezugworie et al., 2021](#)). В то же время исследования в области изучения влияния компостирования на долю антибиотикорезистентных форм микроорганизмов часто дают противоречивые результаты ([Ezugworie et al., 2021](#)). Поэтому для того, чтобы дать качественные рекомендации по компостированию как средству снижения риска заражения сельскохозяйственных культур патогенными микроорганизмами и генами антибиотической резистентности, важно выяснить состав и структуру микробиома куриного помета в ходе данного процесса ([Wu et al., 2022](#)). При этом подобные исследования предпочтительнее проводить в условиях реальных полевых опытов, чем в лабораторных условиях ([Subirats et al., 2021](#)).

Обычно в составе бактериального сообщества куриного помета доминируют классы *Bacilli*, *Actinobacteria* и *Clostridia* ([Chen, Jiang, 2014](#); [Crippen et al., 2021](#)). При длительном хранении (более 10 недель) на открытом воздухе относительное обилие класса *Bacilli* снижается, увеличивается обилие классов Alpha- и Gammaproteobacteria ([Crippen et al., 2021](#)). Компостированный куриный помет содержит существенно меньшее разнообразие вредных микроорганизмов, но стимулирует развитие бактерий родов *Thermicanus* и *Tepidimicrobium*, синтезирующих органические соединения, химически близкие гуминовым и фульвокислотам ([Li et al., 2021](#)). За 60 дней компостирования куриного помета количество грибов-патогенов животных снижалось с 12.5% до 1.2%, в то время как численность грибов-сапротрофов значительно возросла ([Gurmessa et al., 2021](#)). *Clostridiales* Family XI, доминировавшая на первых этапах компостирования, сменилась представителями

семейства *Bacillaceae* на высокотемпературной стадии ([Mao et al., 2020](#)).

В целом компостирование является эффективным способом переработки и обеззараживания птичьего помета. Единственным существенным минусом компостирования является потеря азота, что снижает коммерческую и практическую ценность удобрения, а также может приводить к увеличению эмиссии парниковых газов и эвтрофикации водоемов. Для правильного выбора технологии компостирования важно учитывать ряд параметров: соотношение углерода и азота (C/N), биологическую (микробиологическую) активность, активность прорастания семян сорных растений, емкость катионного обмена компоста, содержание гуминовых веществ, концентрацию водорастворимого углерода, количество лабильного органического вещества ([Еськов и др., 2001](#); [Azim et al., 2017](#)). Наибольшая эффективность компостирования достигается путем мониторинга баланса питательных веществ, влажности и аэрации субстрата. Например, во время фаз аэробного брожения соотношение C/N не должно превышать 25–30, а низкие его значения приводят к существенным потерям азота в форме аммиака. Содержание влаги существенно зависит от физической структуры и изменения размера частиц во время компостирования, поэтому влажность и аэрация компоста взаимосвязаны ([Gigliotti et al., 2012](#)). Для правильной технологии компостирования важно следить за содержанием кислорода в сырье, которое зависит от пористости, размера и формы частиц компоста. Потребность в кислороде крайне высока (15–20% от объема компоста) на первом этапе компостирования из-за экспоненциального роста биомассы микроорганизмов. На более поздних стадиях компостирования потребность в кислороде уменьшается до 5–10%, а при достижении фазы созревания – до 2–3% ([Razmjoo et al., 2015](#)).

Весь процесс компостирования происходит при повышенных температурах благодаря гидролизу углеродных связей в процессе микробиологической ферментации. Поэтому высокие значения данного показателя косвенно свидетельствуют об успешном ходе компостирования ([Panda et al., 2019](#)). Первая фаза компостирования проходит при температурах +30–50 °C, когда осуществляется инициация ферментации мезофильными микроорганизма-

ми ([Tuomela, 2000](#)). Затем наступает термофильная фаза, когда температура компоста колеблется в диапазоне +50–60 °С ([Panda et al., 2019](#)). После этого компост созревает при температурах ниже +50 °С. Контроль температуры является одним из критических факторов технологии компостирования куриного помета, поскольку необходимо поддерживать баланс между относительно высокими (обеззараживание субстрата, но одновременное обезвоживание и уничтожение полезных микроорганизмов) и низкими значениями (сохранение влаги, но высокая частота загнивания компоста) ([Tuomela, 2000](#)). Температуру компоста регулируют с помощью аэрации и перемешивания.

В зависимости от технологии, куриный помет компостируют в широком диапазоне pH от 3 до 11, однако оптимальными являются значения от 5.5 до 8 ([Tripetchkul et al., 2012](#)). Допустимо снижение pH на первой стадии компостирования, поскольку при ферментации субстрата выделяется много органических кислот. На второй (термофильной) стадии компостирования pH растет благодаря разложению белков до аммиака ([Herbert, 2010](#); [Tripetchkul et al., 2012](#)). Для последних стадий компостирования характерно повторное снижение pH ввиду активной нитрификации ([Herbert, 2010](#)). Созревший компост имеет нейтральную реакцию среды.

Существует 2 подхода к определению зрелости компоста. Первый основан на оценке лабильности/стабильности органического вещества (если органическое вещество стабильно, то компост зрелый), а второй – на степени повреждения компостом растений (если компост не повреждает растения, то он зрелый). В целом зрелый компост не имеет аммиачного запаха, структурирован, его pH варьирует от 7 до 9, соотношение C/N менее 15–20, соотношение  $C_{тк}/C_{фк}$  увеличено ([Еськов и др., 2001](#); [Wichuk and McCartney, 2013](#)).

## ВЛИЯНИЕ КУРИНОГО ПОМЕТА/КОМПОСТА НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

Длительное внесение куриного помета и компоста на его основе значительно улучшает физические свойства почв ([Васильев и др., 1984](#); [Потапов, Фролов, 2021](#); [Amanullah et al.,](#)

[2007](#); [Ojeniyi, 2008](#); [Wang et al., 2022](#)). В первую очередь повышается ее структурная устойчивость, пористость, содержание доступной воды, гидравлическая проводимость и аэрация (табл. 1). Плотность сложения почвы при этом снижается ([Feng et al., 2019](#); [Потапов, Фролов, 2021b](#)). По сравнению с куриным пометом, использование высоких доз компоста (2–4% от массы почвы) приводит к большей насыщенности основаниями, пористости (с 18 до 30%) и числу водостойких агрегатов (с 52 до 72%), но к снижению доступной воды (с 16 до 11%). Внесение в почву обоих видов данного удобрения улучшает структуру, агрегированность, водно-воздушные (в первую очередь водопроницаемость) и теплофизические свойства почвы, и, как следствие, повышает плодородие ([Васильев и др., 1984](#); [Islam et al., 2021](#)). При применении пеллетизированного куриного помета в течение 4 лет на легкосуглинистой почве увеличилась ее водоудерживающая способность и уменьшилась плотность ([Feng et al., 2019](#)).

Внесение куриного помета и компоста значительно улучшает химические свойства почв (табл. 1). При применении куриного помета в качестве удобрения повышается содержание доступного фосфора ([Мерзлая и др., 1991](#); [Azeez, Van Averbek, 2010](#); [Ashworth et al., 2021](#); [Chen et al., 2022](#)). Куриный помет в большей степени, по сравнению с другими органическими удобрениями, увеличивает содержание разных форм неорганического и органического фосфора ([Васильев и др., 1984](#); [Фисинин и др., 2013](#); [Wei et al., 2022](#)). Помимо этого, внесение куриного помета способствует увеличению содержания обменного калия и суммы поглощенных оснований ([Чекаев, 2009](#); [Качикаев и др., 2020](#)). Однако последствие этих эффектов может не наблюдаться, что, по видимому, связано с процессами минерализации органического вещества, внесенного с куриным пометом, а также выносом кальция и магния с урожаем.

Куриный помет и компост на его основе увеличивают количество органического углерода и азота в почве ([Васильев и др., 1984](#)).

**Таблица 1.** Влияние куриного помета и компоста на его основе на функции и свойства почв

**Table 1.** Effect of chicken manure and its compost on soil functions and properties

| Почвенная функция/свойство       | Куриный помет | Компост на основе куриного помета |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| <b>Питательная</b>               | +             | ++                                |
| С <sub>орг</sub> , %             | ↑             | ↑↑                                |
| N, %                             | ↑↑            | ↑                                 |
| P, %                             | ↑↑            | ↑                                 |
| K, %                             | ↑↑            | ↑                                 |
| pH                               | ↑             | ↑                                 |
| Засоление                        | ↑             | ↑                                 |
| <b>Санитарная</b>                | --            | + / 0                             |
| Патогенные микроорганизмы        | ↑↑            | ↑                                 |
| Семена сорняков                  | ↑ / 0         | 0                                 |
| Гены антибиотикорезистентности   | ↑↑            | ↑                                 |
| Супрессивность почв              | ↑ / 0         | ↑                                 |
| <b>Биоресурсная</b>              | ++            | +                                 |
| Разнообразие микробиома          | ↑             | ↑                                 |
| Биомасса микроорганизмов         | ↑↑            | ↑                                 |
| <b>Углеродтрансформирующая</b>   | +             | ++                                |
| Биологическая активность         | ↑↑            | ↑                                 |
| Секвестрация углерода            | ↑             | ↑↑                                |
| Эмиссия парниковых газов         | ↑↑            | ↑                                 |
| <b>Опорная (средообразующая)</b> | +             | ++                                |
| Пористость                       | ↑             | ↑↑                                |
| Аэрированность                   | ↑             | ↑↑                                |
| Плотность                        | ↓             | ↓                                 |

**Примечание.** Влияние данных органических удобрений на почву оценено качественно в баллах от двух минусов (заметное ухудшение возможности почвы поддерживать функцию) до двух плюсов (существенное улучшение функционирования почвы). Свойства охарактеризованы с точки зрения значительного и очень значительного

увеличения/уменьшения.

**Note.** The effect of these organic fertilisers on the soil was qualitatively assessed with scores ranging from two minuses (marked deterioration in the soil's ability to maintain function) to two pluses (significant improvement in soil function). Properties are characterised in terms of significant and very significant increases/decreases.

По мере увеличения доз внесения (от 0 до 4%) этих удобрений возрастает содержание органического углерода (с 0.94% до 2.5%), общего азота (с 0.15% до 0.3%), pH (с 7.60 до 7.87) и электропроводности (с 0.7 до 2.6 дСм/м) в почве ([Ashworth et al., 2021](#); [Потапов, Фролов, 2021a](#)). Компост на основе куриного помета повышает содержание органического углерода в большей мере, чем чистый помет ([Islam et al., 2021](#)). При внесении низких доз (до 2%) обоих типов удобрения доля общего азота и значения pH выше в вариантах с компостом, а при заделывании относительно высоких доз (3–4%) – в почвах со свежим пометом.

Также по сравнению с компостом свежий куриный помет в 2–2.5 раза больше увеличивает электропроводность почв ([Потапов, Фролов, 2021a](#)). Длительное применение компоста куриного помета в качестве удобрения приводит к значительному увеличению содержания и устойчивости ПОВ в микроагрегатах ([Мерзлая и др., 1991](#); [Ashworth et al., 2021](#)). За 10 лет применения компоста в дозе 12 т/га увеличение запасов органического углерода выросло на 110% в почве отвалов ([Huang et al., 2019](#)).

Несмотря на положительное влияние куриного помета и компоста на содержание общего углерода в почве, остается открытым вопрос, как внесение этого органического удобрения сказывается на качестве ПОВ, а именно на величине и соотношении структурных и процессных пулов ПОВ – ОВ твердых органических частиц, минерально-связанном ОВ и потенциально-минерализуемом ОВ, которые ответственны за секвестрирующую, депонирующую и эмиссионную функции почвы ([Семенов и др., 2023](#)). Научный и практический интерес представляют вопросы изменения химического состава соединений, входящих в состав ПОВ, которые определяются методами ИК-спектроскопии, пиролиза, термохимического анализа и масс-спектрометрии. Не рассмотрены во-

просы влияния куриного помета и компоста на гидрологическую функцию почв, архитектуры и связанности порового пространства.

## ВЛИЯНИЕ КУРИНОГО ПОМЕТА/КОМПОСТА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

При удобрении куриным пометом или компостом на его основе происходит привнесение большого количества доступного органического вещества и микроорганизмов, что оказывает многостороннее влияние на нативный микробиом почвы ([Фисинин и др., 2013](#); [Urra et al., 2019](#)). Многие микроорганизмы, находящиеся в почве в покое, могут быть активированы поступлением органического вещества и могут конкурировать с микробиотой, привнесенной с навозом или пометом ([Semenov et al., 2021](#); [Minkina et al., 2022](#)). Кроме того, внесение органических удобрений оказывает ключевое влияние на таксономический состав ризосферного бактериома и микобиома, перекрывая фактор самого растения, и тем самым определяя не только качество почвы, но и здоровье и развитие растений ([Семенов и др., 2019](#); [Semenov et al., 2022](#)). Согласно двум метаанализам, удобрение почвы свежим или компостированным куриным пометом приводит к увеличению углерода микробной биомассы на 25–75% ([Ren et al., 2019](#); [Guo et al., 2022](#)). Во многих исследованиях отмечается повышение  $\alpha$ -разнообразия микробного сообщества при применении куриного помета и компоста на его основе ([Yang et al., 2019](#); [Gurmessa et al., 2021](#); [Zhu et al., 2022](#)). После заделывания куриного помета в почву наблюдается рост ферментативной активности: щелочной (с 0.38 до 4.94 мг/г почвы) и кислой фосфатаз (с 0.42 до 3.02 мг/г почвы), каталаз (с 1.32 до 6.77 мг/г почвы) и уреаз (0.72 до 3.90 мг/г почвы) ([Minkina et al., 2022](#)).

В компостах на основе куриного помета и удобренных им почвах доминируют бактерии филумов Firmicutes (роды *Cerasibacillus*, *Atopostipes* и *Bacillus*) и Actinobacteria (роды *Thermobifida*, *Actinomadura* и *Nocardiopsis*), а обилие патогенных родов *Helicobacter*, *Staphylococcus*, *Acinetobacter*, *Streptococcus*, *Mycobacterium* и *Enterococcus* составляет менее 1% ([Wan et al., 2020](#); [Wang et al., 2020](#); [Zainudin et al., 2022](#)). Тем не менее в насто-

ящее время недостаточно данных о разных эколого-трофических группах бактерий и грибов (например, сахаролитических, копрофильных, эпифитных и фитопатогенных видов) в составе микробиома куриного помета, в том числе в процессе его компостирования. Необходимо изучение токсинообразующих, аллергенных и термофильных видов грибов, представляющих опасность для здоровья человека, возможности оценки готовности компоста для внесения в почву в качестве биоудобрения с учетом данных по микобиоте, которые выполняются, например, для коровьего навоза ([Кураков, Биланенко, 2023](#)).

При заделывании куриного помета в почву отмечается значительное увеличение (на 60–100%) в верхнем 20-сантиметровом слое численности бактерий филумов Firmicutes, Bacteroidetes и Actinobacteria; родов *Bacillus*, *Bifidobacterium*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Eubacterium*, *Prevotella*, *Pseudomonas*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Megasphaera*, *Fusobacterium*; видов *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* ([Barbour et al., 2002](#); [Iqbal et al., 2020](#); [Наумова, 2021](#); [Zhang et al., 2021](#); [Minkina et al., 2022](#)). В трехлетних опытах на двух полях с контрастными по физико-химическим свойствам почвами при выращивании спаржи было выявлено, что в почве после внесения компостированного куриного помета в 2–4 раза выросло обилие филума Bacteroidetes, в том числе классов Flavobacteriia (роды *Fluviicola* и *Flavobacteriia*) и Sphingobacteriia (род *Pedobacter*) ([Наумова и др., 2021](#)). Применение ферментированного куриного помета (совместно с коровьим навозом) изменило микробиом ризосферы арбуза, значительно повысив микробное разнообразие, а также снизив обилие грибов рода *Fusarium*, многие из которых являются патогенами растений ([Zhao et al., 2017](#)).

В удобренной куриным пометом почве нередко обнаруживаются такие патогенные для животных и человека бактерии, как *Clostridium* spp., *Escherichia coli*, *Campylobacter* spp. и *Salmonella* spp., а также патогенные вирусы, микромицеты, простейшие и гельминты, которые способны длительное время сохраняться в почве ([Gurmessa et al., 2021](#); [Наумова, 2021](#)). Например, сальмонеллы способны выживать в удобренной куриным пометом почве более ста дней ([Hrubý et al., 2018](#)). Ввиду возможной конкуренции

между нативным почвенным микробиомом и привнесенными с куриным пометом/компостом микроорганизмами следует внимательно оценивать риски негативных последствий (в т. ч. попадания патогенных микроорганизмов в сельскохозяйственную продукцию), особенно для почв с низкой биологической активностью.

Изучение влияния куриного помета на биологические свойства почв ограничивается, главным образом, исследованиями по изменению таксономического разнообразия прокариот. На данный момент не рассмотрено воздействие куриного помета и компоста на его основе на разнообразие и эколого-трофическую структуру микробиома и протистов почв, а также на соотношение представителей микробного сообщества с разными экологическими стратегиями, например, г- и К-стратегиями ([Semenov et al., 2019](#); [Li et al., 2021](#); [Yang et al., 2022](#)). Проведение таких исследований позволит получить полноценное представление о влиянии компостов на основе куриного помета на таксономическое и функциональное разнообразие почв, а также на микробные драйверы секвестрации углерода.

## ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА И КОМПОСТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Дозы внесения свежего помета варьируют от 4 до 20 т/га, компостированного помета – от 2 до 70 т/га ([Лазарев и др., 2018](#); [Лысенко и др., 2018](#); [Мерзлая и др., 2018](#); [Наумова и др., 2021](#); [Ненайденко, 2010](#); [Потапов, Фролов, 2021](#); [Сопельченко и др., 2018](#); [Турчин и др., 2017](#); [Чекаев и др., 2017](#); [Cayci et al., 2017](#); [Dani et al., 2021](#)). Куриный помет обычно используется в производстве зерновых, кормовых и технических культур в качестве органических удобрений ([Васильев и др., 1984](#)). Избыточное внесение куриного помета может привести к ряду негативных последствий: эвтрофикации и засолению почвы, усилению эмиссии парниковых газов (метан, аммиак, углекислый газ), химическим ожогам растений, а также к загрязнению окружающей среды кишечной микрофлорой ([Kelleher et al., 2002](#); [Barbour et al., 2002](#); [Amanullah et al., 2007](#); [Ojeniyi, 2008](#); Oagile, Namasiku, 2010; [Jiang et al., 2021](#); Liu et al., 2020; [Minkina et al., 2022](#)). В целом, нормы использования куриного помета и удобрений на его основе недо-

статочно хорошо разработаны ([Kelleher et al., 2002](#); [Седых, Караш, 2010](#); [Фисинин и др., 2013](#)).

В России действует международный ГОСТ 33830-2016 о стандартах органических удобрений на основе отходов животноводства, к которым относятся компостированный, свежий, подстилочный и бесподстилочный птичий помет. Вносимые удобрения по показателям безопасности должны соответствовать следующим требованиям: содержание свинца – не более 130 мг/кг сухого вещества, кадмия – не более 2.0 мг/кг, ртути – не более 2.1 мг/кг, мышьяка – не более 10 мг/кг. Остаточные количества пестицидов (ГХЦГ, ДДТ) должны составлять менее 0.1 мг/кг сухого вещества. Не допускается присутствие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, в том числе энтеробактерий (патогенных серовариантов кишечной палочки, сальмонелл, протеи), энтерококков, стафилококков, клостридий, бацилл, энтеровирусов; жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, в том числе нематод (аскарид, трихоцефалов, стронгилят, стронгилоидов), трематод, цестод; цист кишечных патогенных простейших, личинок и куколок синантропных мух.

В странах Европейского союза обращение с птичьим пометом и подстилкой регулируют несколько регламентов ([Regulation \(EC\) No 1069/2009](#)). Для этих субстратов рекомендуется минимизировать время хранения перед применением, хранить на специальных площадках вдали от возможного стока в водоемы, не допускать доступа животных. При применении в качестве удобрения следует создавать буферные зоны у водоемов (5–10 м), не использовать свежий помет под культуры, употребляемые в пищу в сыром виде, и обязательно запахивать удобрение в почву с использованием вспашки с оборотом пласта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Куриный помет и компосты на его основе являются ценными органическими удобрениями, которые повышают плодородие почв и значительно повышают урожаи сельскохозяйственных культур. Внесение этих удобрений в почву благоприятно сказывается на ее структуре, способствуя удержанию влаги и улучшению воздухообмена, повышает содержание органического вещества, а

также увеличивает биологическую активность почвы. Использование компостированного куриного помета в качестве удобрения позволяет решить проблему его утилизации с птицефабрик. Однако необходима разработка технологий компостирования и внесения данного удобрения на сельскохозяйственные поля, чтобы не допустить пересыщения почвы азотом и другими питательными веществами, а также ее заражения патогенами человека и животных.

Помимо решения технологических вопросов применения компостов на основе куриного помета необходимо более детальное изучение воздействия этого удобрения на физические, химические и биологические свойства почвы. По-прежнему остается неизученным влияние внесения куриного помета на величины и соотношение структурных и процессных пулов ПОВ, химический состав ПОВ, архитектуру порового пространства почвы. Также необходимо более детальное исследование воздействия помета и компостов на его основе на эколого-трофическую структуру и функциональный потенциал почвенного микробиома, что будет способствовать секвестрации углерода и повышению плодородия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобренко И.А., Кормин В.П., Гоман Н.В. Эффективность применения органического удобрения на основе куриного помета под капусту белокочанную // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (28). С. 13–19.
2. Васильев В.А., Лукьяненко И.И., Минеев В.Г. Органические удобрения в интенсивном земледелии. М.: Колос, 1984. 303 с.
3. Васильев В.А., Филиппова Н.В. Справочник по органическим удобрениям. М.: Россельхозиздат, 1988. 255 с.
4. ГОСТ 33830-2016. Межгосударственный стандарт. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия; введ. 2018–01–01. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
5. Еськов А.И., Мерзлая Г.Е. и др. Справочная книга по производству и применению органических удобрений. Владимир: РАСХН, ВНИПТИОУ, 2001. 495 с.
6. Качикаев Р.Р., Фирсова А.С., Лечицкая Т.В. Влияние разных доз куриного помета на физико-химические свойства чернозема выщелоченного. Сборник материалов Всероссийской (национальной)

научно-практической конференции. Том I. Пенза, 2020. С. 90–94.

7. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139.

8. *Кураков А.В., Биланенко Е.Н.* Динамика микобиоты при компостировании коровьего навоза и соломы // Почвоведение. 2023. № 4. С. 464–481.

9. *Лазарев В.И., Стифеев А.И., Черников П.П.* Эффективность гранулированного компоста из куриного помета на посевах ярового ячменя в условиях черноземных почв Курской области // Научное обеспечение агропромышленного производства. 2018. С. 76–80.

10. *Лысенко В.П., Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А.* Биопрепараты для компостирования птичьего помета // Птицеводство. 2014. № 3. С. 39–44.

11. *Мерзлая Г.Е., Володарская Н.И., Полунин С.Ф.* и др. Научные основы и рекомендации по эффективному применению органических удобрений. М.: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1991. 216 с.

12. *Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А., Кирсанов Г.А., Коваленко А.А., Степанов А.И.* Эффективное применение органических удобрений на основе птичьего помета // Научно-технологическое развитие АПК как драйвер экономического роста ЕАЭС. 2018. С. 212–221.

13. *Наумова Н.Б., Ручко Е.Н., Савенков О.А., Плевакова В.И.* Микробиом почвы и сельскохозяйственных культур при внесении компоста куриного помета // Почвы и окружающая среда. 2021. № 4 (1). С. 35–49.

14. *Ненайденко Г.Н., Рябов Д.А., Тарасов А.Л.* Агрохимическая оценка куриного опилочного компоста // Владимирский земледелец. 2010. № 4. С. 31–33.

15. *Потапов М.А., Фролов Д.И.* Внесение куриного помета и компоста на его основе на химический состав почвы // Инновационная техника и технология. 2021a. № 8 (4). С. 60–64.

16. *Потапов М.А., Фролов Д.И.* Влияние куриного помета на физические характеристики почвы // Инновационная техника и технология. 2021b. № 8 (3). С. 56–60.

17. *Седых В.А., Карауш П.Ю.* Перспективы создания органических удобрений с заданными свойствами на основе птичьего помета (обзор) // Плодородие. 2010. № 6. С. 14–16.

18. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., де Гереню В.О.Л., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н.* Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 1. e199–e199.

19. *Семенов М.В., Никитин Д.А., Степанов А.Л., Семенов В.М.* Структура бактериальных и грибных сообществ ризосферного и внекорневого

локусов серой лесной почвы // Почвоведение. 2019. № 3. С. 355–369.

20. Сопельченко О.А., Каменев Р.А., Турчин В.В. Экономическая оценка применения компоста из куриного помета под кукурузу на черноземе южном Ростовской области // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2018. № 2. С. 98–103.

21. Сычев В.Г., Мерзлая Г.Е., Петрова Г.В., Филиппова А.В., Попов В.И., Мищенко В.Н. Эколого-агрохимические свойства и эффективность верми- и биокomпостов. М.: ВНИИА, 2017. 276 с.

22. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Экология применения органических удобрений. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии Д.Н. Прянишникова, 2017. 336 с.

23. Теучеж А.А. Применение птичьего помета в качестве органического удобрения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 128. С. 914–931.

24. Турчин В.В., Сисин А.В., Баленко Е.Г. Действие компоста из куриного помета на урожайность и качество семян подсолнечника // Вестник Мичуринского ГАУ. 2017. № 4. С. 14.

25. Фисинин В.И., Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Лысенко В.П., Мерзлая Г.Е. и др. Использование птичьего помета в земледелии (научно-методическое руководство). М.: ООО НИПКЦ Восход-А, 2013. 272 с.

26. Чекаев Н.П. Агроэкологическая оценка применения куриного помета в качестве удобрения // Плодородие. 2009. № 3. С. 13–14.

27. Чекаев Н.П., Куликова Е.Г., Леснов А.В. Действие птичьего помета и известкового мелиоранта на кислотно-основные свойства чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур // Нива Поволжья. 2020. № 3 (56). С. 65–72.

28. Ajwa H.A., Tabatabai M.A. Decomposition of different organic materials in soils // Biol. Fertil. Soils. 1994. Vol. 18. No. 3. P. 175–182.

29. Amanullah M.M., Somasundaram E., Vaiyapuri K., Sathyamoorthi K. Poultry manure to crops: A Review // Agricultural reviews-agricultural research communications centre India. 2007. Vol. 28 (3). P. 216.

30. Ashworth A.J., Chastain J.P., Moore P.A. Nutrient characteristics of poultry manure and litter // Animal manure: production, characteristics, environmental concerns, and management. 2020. Vol. 67. P. 63–87. DOI: [10.2134/asaspecpub67.c5](https://doi.org/10.2134/asaspecpub67.c5).

31. Awasthi M.K., Liu T., Chen H., Verma S., Duan Y., Awasthi S.K., Wang Q., Ren X., Zhao J., Zhang Z. The behavior of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community during poultry manure composting // Bioresour. Technol. 2019. Vol. 280. P. 70–78. DOI:

[10.1016/j.biortech.2019.02.030](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.030).

32. Azeez J.O., Van Averbeke W. Fate of manure phosphorus in a weathered sandy clay loam soil amended with three animal manures // *Bioresour. Technol.* 2010. Vol. 101. P. 6584–6588. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.03.073](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.073).
33. Azim K., Soudi B., Boukhari S., Perissol C., Roussos S., Thami Alami I. Composting parameters and compost quality: a literature review // *Organic agriculture*. 2018. Vol. 8. P. 141–158. DOI: [10.1007/s13165-017-0180-z](https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z).
34. Barbour E.K., Hussein S.A., Farran M.T., Itani D.A., Houalla R.H., Hamadeh S.K. Soil solarization: a sustainable agriculture approach to reduce microorganisms in chicken manure-treated soil // *Journal of Sustainable Agriculture*. 2002. Vol. 19 (4). P. 95–104. DOI: [10.1300/J064v19n04\\_09](https://doi.org/10.1300/J064v19n04_09).
35. Cayci G., Temiz C., Sozudogru O.S. The effects of fresh and composted chicken manures on some soil characteristics // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2017. Vol. 48 (13). P. 1528–1538. DOI: [10.1080/00103624.2017.1373794](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373794).
36. Chang R., Li Y., Chen Q., Gong X., Qi Z. Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting // *PloS one*. 2020. Vol. 15 (9). P. e0229880. DOI: [10.1371/journal.pone.0229880](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229880).
37. Chen Z.; Jiang X. Microbiological Safety of Chicken Litter or Chicken Litter-Based Organic Fertilizers: A Review // *Agric.* 2014. Vol. 4. P. 1–29. DOI: [10.3390/agriculture4010001](https://doi.org/10.3390/agriculture4010001).
38. Chen G., Yuan J., Chen H., Zhao X., Wang S., Zhu Y., Wang Y. Animal manures promoted soil phosphorus transformation via affecting soil microbial community in paddy soil // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 831. P. 154917. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.154917](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154917).
39. Crippen T.L., Sheffield C.L., Singh B., Byrd J.A., Beier R.C., Anderson R.C. Poultry litter and the environment: Microbial profile of litter during successive flock rotations and after spreading on pastureland // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 780. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.146413](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146413).
40. Dani U., Budiarti A.N.S., Wijaya A.A. Application of Chicken manure Dosage and Plant Growth Promoting *Rhizobacteria* on the Growth and Yield of Shallot Plants (*Allium ascalonicum* L.) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 748 (1). P. 012044. DOI: [10.1088/1755-1315/748/1/012044](https://doi.org/10.1088/1755-1315/748/1/012044).
41. Dikinya O., Mufwanzala N. Chicken manure-enhanced soil fertility and productivity: Effects of application rates // *Journal of soil science and environmental management*. 2010. Vol. 1 (3). P. 46–54.
42. Drózd D., Wystalska K., Malińska K., Grosser A., Grobelak A., Kacprzak M. Management of poultry manure in Poland – Current state and future perspectives // *J. Environ. Manage.* 2020. Vol. 264. P. 110327. DOI:

[10.1016/j.jenvman.2020.110327](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327).

43. *Ezugworie F.N., Igbokwe V.C., Onwosi C.O.* Proliferation of antibiotic-resistant microorganisms and associated genes during composting: An overview of the potential impacts on public health, management and future // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 784. P. 147191. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147191](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147191).

44. *Feng G., Adeli A., Read J., McCarty J., Jenkins J.* Consequences of pelletized poultry litter applications on soil physical and hydraulic properties in reduced tillage, continuous cotton system // *Soil Tillage Res*. 2019. Vol. 194. P. 104309. DOI: [10.1016/j.still.2019.104309](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104309).

45. *Guo Z., Lv L., Liu D., He X., Wang W., Feng Y., Islam M.S., Wang Q., Chen W., Liu Z., Wu S., Abied A.* A global meta-analysis of animal manure application and soil microbial ecology based on random control treatments // *PLoS One*. 2022. Vol. 17. P. 1–17. DOI: [10.1371/journal.pone.0262139](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262139).

46. *Herbert.* Bases of composting *National Engineering Handbook // Environmental Engineering Chapter 2 Composting*. 2010. P. 637.

47. *Hruby C.E., Soupier M.L., Moorman T.B., Pederson C., Kanwar R.* *Salmonella* and Fecal Indicator Bacteria Survival in Soils Amended with Poultry Manure // *Water, Air, Soil Pollut*. 2018. Vol. 229. P. 1–14. DOI: [10.1007/s11270-017-3667-z](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3667-z).

48. *Huang X., Jia Z., Guo J., Li T., Sun D., Meng H., Yu G., He X., Ran W., Zhang S., Hong J., Shen Q.* Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol // *Geoderma*. 2019. Vol. 355. P. 113880. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.113880](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113880).

49. *Gigliotti G., Proietti P., Said-Pullicino D., Nasini L., Pezzolla D., Rosati L., Porceddu P.R.* Co-composting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality // *International biodeterioration & biodegradation*. 2012. Vol. 67. P. 8–14. DOI: [10.1016/j.ibiod.2011.11.009](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.11.009).

50. *Guerra-Rodríguez E., Vázquez M., Díaz-Raviña M.* Dynamics of the co-composting of barley waste with liquid poultry manure // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2003. Vol. 83 (3). P. 166–172. DOI: [10.1002/jsfa.1302](https://doi.org/10.1002/jsfa.1302).

51. *Gurmessa B., Ashworth A. J., Yang Y., Savin M., Moore P.A., Ricke S.C., ... & Cocco S.* Variations in bacterial community structure and antimicrobial resistance gene abundance in cattle manure and poultry litter // *Environmental Research*. 2021. Vol. 197. P. 111011. DOI: [10.1016/j.envres.2021.111011](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111011).

52. *Guo Z., Lv L., Liu D., He X., Wang W., Feng Y., Islam M.S., Wang Q., Chen W., Liu Z. et al.* A global meta-analysis of animal manure application and soil microbial ecology based on random control treatments // *PLoS One*. 2022. Vol. 17. P. 1–17. DOI: [10.1371/journal.pone.0262139](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262139).

53. *Islam M.S., Kasim S., Alam K.M., Amin A.M., Geok Hun T., Haque M.A.* Changes in chemical properties of banana pseudostem, mushroom media waste, and chicken manure through the co-composting process // *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (15). P. 8458. DOI: [10.3390/su13158458](https://doi.org/10.3390/su13158458).
54. *Iqbal Y., Cottrell J.J., Suleria H.A.R., Dunshea F.R.* Gut Microbiota-Polyphenol Interactions in Chicken: A Review // *Animals*. 2020. Vol. 10 (8). P. 1391. DOI: [10.3390/ani10081391](https://doi.org/10.3390/ani10081391).
55. *Jiang J., Stevenson D.S., Uwizye A., Tempio G., Sutton M.A.* A climate-dependent global model of ammonia emissions from chicken farming // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18 (1). P. 135–158. DOI: [10.5194/bg-18-135-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-135-2021).
56. *Kacprzak M.J., Sobik-Szolysek J.* The opoka-rock in N and P of poultry manure management according to circular economy // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 316. P. 115262. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115262](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115262).
57. *Kelleher B.P., Leahy J.J., Henihan A.M., O'dwyer T.F., Sutton D., Leahy M.J.* Advances in poultry litter disposal technology – a review // *Bioresource technology*. 2002. Vol. 83 (1). P. 27–36. DOI: [10.1016/S0960-8524\(01\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X).
58. *Li H., Yang S., Semenov M.V., Yao F., Ye J., Bu R., Ma R., Lin J., Kurganova I., Wang X., Deng Y., Kravchenko I., Jiang Y., Kuzyakov Y.* Temperature sensitivity of SOM decomposition is linked with a K- selected microbial community // *Global Change Biology*. 2021. Vol. 27 (12). P. 2763–2779.
59. *Li M.X., He X.S., Tang J., Li X., Zhao R., Tao Y.Q., Wang C., Qiu Z.P.* Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting // *Chemosphere*. 2021. Vol. 264 (2). P. 128549. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.128549](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549).
60. *Lim S.L., Wu T.Y., Lim, P.N., Shak K.P.Y.* The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015. Vol. 95 (6). P. 1143–1156. DOI: [10.1002/jsfa.6849Awasthia](https://doi.org/10.1002/jsfa.6849Awasthia).
61. *Mao H., Wang K., Wang Z., Peng J., Ren N.* Metabolic function, trophic mode, organics degradation ability and influence factor of bacterial and fungal communities in chicken manure composting // *Bioresour. Technol.* 2020. Vol. 302. P. 122883. DOI: [10.1016/j.biortech.2020.122883](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122883).
62. *Meier S., Curaqueo G., Khan N., Bolan N., Cea M., Eugenia G. M., Cornejo P., Ok Y.S., Borie F.* Chicken-manure-derived biochar reduced bioavailability of copper in a contaminated soil // *Journal of Soils and Sediments*. 2017. Vol. 17. P. 741–750.
63. *Minkina T., Sushkova S., Delegan Y., Bren A., Mazanko M.,*

- Kocharovskaya Y., Filonov A., Rajput V.D., Mandzhieva S., Rudoy D., Prazdnova E.V., Vereshak E., Zelenkova G., Ranjan A. Effect of chicken manure on soil microbial community diversity in poultry keeping areas // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. P. 1–17. DOI: [10.1007/s10653-022-01447-x](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01447-x).
64. Neher D.A., Limoges M.A., Weicht T.R., Sharma M., Millner P.D., Donnelly C. Bacterial Community Dynamics Distinguish Poultry Compost from Dairy Compost and Non-Amended Soils Planted with Spinach // *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. P. 1601. DOI: [10.3390/microorganisms8101601](https://doi.org/10.3390/microorganisms8101601).
65. Ojeniyi S.O. Effect of poultry manure on selected soil physical and chemical properties, growth, yield and nutrient status of tomato. *African Journal of Agricultural Research*. 2008. Vol. 3 (9). P. 612–616.
66. Panda A.K., Bisht S.S., De Mandal S., Kumar N.S. Microbial diversity of thermophiles through the lens of next generation sequencing / Microbial diversity in the genomic era. Academic Press. 2019. P. 217–226. DOI: [10.1016/B978-0-12-814849-5.00013-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814849-5.00013-7).
67. Razmjoo P., Pourzamani H., Teiri H., Hajizadeh Y. Determination of an empirical formula for organic composition of mature compost produced in Isfahan-Iran composting plant in 2013. *International Journal of Environmental Health Engineering*. 2015. Vol. 4 (1). P. 3. DOI: [10.4103/2277-9183.153988](https://doi.org/10.4103/2277-9183.153988).
68. Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002 (Animal by-products Regulation).
69. Ren F., Sun N., Xu M., Zhang X., Wu L., Xu M. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A meta-analysis // *Soil Tillage Res*. 2019. Vol. 194. P. 104291. DOI: [10.1016/j.still.2019.06.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.008).
70. Rubežius M., Bleizgys R., Venslauskas K., Navickas K. Influence of biological pretreatment of poultry manure on biochemical methane potential and ammonia emission // *Biomass and Bioenergy*. 2020. P. 142. DOI: [10.1016/j.biombioe.2020.105815](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105815).
71. Rynk R., Cooperband L., Oshins C., Wescott H., Bonhotel J., Schwarz M., Sherman R., Brown S. Why compost? // *The Composting Handbook*. Academic Press. 2022. P. 1–26. DOI: [10.1016/B978-0-323-85602-7.00001-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85602-7.00001-7).
72. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., van Bruggen A.H. Long-term fertilization rather than plant species shapes rhizosphere and bulk soil prokaryotic communities in agroecosystems // *Applied Soil Ecology*. 2020. Vol. 154. P. 103641.
73. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., Ksenofontova N.A., Zinyakova N.B., van Bruggen A.H.C. Does fresh farmyard manure introduce

- surviving microbes into soil or activate soil-borne microbiota? // J. Environ. Manage. 2021. Vol. 294. P. 113018. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113018](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113018).
74. *Semenov M. V., Krasnov G. S., Semenov V. M., van Bruggen A.* Mineral and organic fertilizers distinctly affect fungal communities in the crop rhizosphere // Journal of Fungi. Vol. 8 (3). P. 251.
75. *Subirats J., Murray R., Yin X., Zhang T., Topp E.* Impact of chicken litter pre-application treatment on the abundance, field persistence, and transfer of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 801. P. 149718. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149718](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149718).
76. *Tripetchkul S., Pundee K., Koonsrisuk S., Akeprathumchai S.* Co-composting of coir pith and cow manure: initial C/N ratio vs physico-chemical changes // International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 2012. Vol. 1. P. 1–8. DOI: [10.1186/2251-7715-1-15](https://doi.org/10.1186/2251-7715-1-15).
77. *Tuomela M., Vikman M., Hatakka A., Itävaara M.* Biodegradation of lignin in a compost environment: a review // Bioresource technology. 2000. V. 72(2). P. 169-183. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)
78. *Urra J., Alkorta I., Lanzén A., Mijangos I., Garbisu C.* The application of fresh and composted horse and chicken manure affects soil quality, microbial composition and antibiotic resistance // Applied Soil Ecology. 2019. Vol. 135. P. 73–84. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.11.005](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.005).
79. *Wan L., Wang X., Cong C., Li J., Xu Y., Li X., Hou F., Wu Y., Wang L.* Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw // Bioresour Technol. 2020. Vol. 301. P. 122730. DOI: [10.1016/j.biortech.2019.122730](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122730).
80. *Wang Y., Gong J., Li J., Xin Y., Hao Z., Chen C., Li H., Wang B., Ding M., Li W., Zhang Z., Xu P., Xu T., Ding G.C., Li J.* Insights into bacterial diversity in compost: Core microbiome and prevalence of potential pathogenic bacteria // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 718. P. 137304. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137304](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137304).
81. *Wang D., Lin J.Y., Sayre J.M., Schmidt R., Fonte S.J., Rodrigues J.L.M., Scow K.M.* Compost amendment maintains soil structure and carbon storage by increasing available carbon and microbial biomass in agricultural soil – A six-year field study // Geoderma. 2022. Vol. 427. P. 116117. DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116117](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116117).
82. *Wei L.L., Chen S., Cui J., Ping H., Yuan C., Chen Q.* A meta-analysis of arable soil phosphorus pools response to manure application as influenced by manure types, soil properties, and climate // J. Environ. Manage. 2022. Vol. 313. P. 115006. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115006](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115006).
83. *Wichuk K.M., McCartney D.* Compost stability and maturity evaluation – a literature review // Journal of Environmental Engineering and Science. 2013.

Vol. 8 (5). P. 601–620. DOI: [10.1139/L10-101](https://doi.org/10.1139/L10-101).

84. Wu Z., Zhang L., Lin H., Zhou S. Enhanced removal of antibiotic resistance genes during chicken manure composting after combined inoculation of *Bacillus subtilis* with biochar // Journal of Environmental Sciences. 2022. Vol. 135. P. 274–284. DOI: [10.1016/j.jes.2022.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.12.002).

85. Yang Q., Zhang H., Guo Y., Tian T. Influence of chicken manure fertilization on antibiotic-resistant bacteria in soil and the endophytic bacteria of pakchoi // International journal of environmental research and public health. Vol. 13 (7). P. 662. DOI: [10.3390/ijerph13070662](https://doi.org/10.3390/ijerph13070662).

86. Yang S., Wu H., Wang Z., Semenov M.V., Ye J., Yin L., Wang X., Kravchenko I., Semenov V., Kuzyakov Y., Jiang Y., Li H. Linkages between the temperature sensitivity of soil respiration and microbial life strategy are dependent on sampling season // Soil Biology and Biochemistry. 2022. Vol. 172. P. 108758.

87. Zainudin M.H.M., Zulkarnain A., Azmi A.S., Muniandy S., Sakai K., Shirai Y., Hassan M.A. Enhancement of agro-industrial waste composting process via the microbial inoculation: a brief review // Agronomy. 2022. Vol. 12 (1). P. 198. DOI: [10.3390/agronomy12010198](https://doi.org/10.3390/agronomy12010198).

88. Zhang D., Cheng H., Hao B., Li Q., Wu J., Zhang Y., Cao A. Fresh chicken manure fumigation reduces the inhibition time of chloropicrin on soil bacteria and fungi and increases beneficial microorganisms // Environmental Pollution. 2021. Vol. 286. P. 117460. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.117460](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117460).

89. Zhao X., Wang J., Zhu L., Ge W., Wang J. Environmental analysis of typical antibiotic-resistant bacteria and ARGs in farmland soil chronically fertilized with chicken manure // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 593. P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.062>.

90. Zhou Y., Xiao R., Klammsteiner T., Kong X., Yan B., Mihai F.C., Liua T., Zhanga Z., Kumar M., Awasthi M.K. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: A review // Bioresource Technology. 2022. P. 127591. DOI: [10.1016/j.biortech.2022.127591](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127591).

91. Zhu L., Lian Y., Lin D., Huang D., Yao Y., Ju F., Wang M. Insights into microbial contamination in multi-type manure-amended soils: The profile of human bacterial pathogens, virulence factor genes and antibiotic resistance genes // J. Hazard. Mater. 2022. Vol. 437. P. 129356. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2022.129356](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129356).

## REFERENCES

1. Bobrenko I.A., Kormin V.P., Goman N.V., Effektivnost' primeneniya organicheskogo udobreniya na osnove kurinogo pometa pod kapustu belokochannuyu (The effectiveness of the use of organic fertilizer based on

- chicken manure for white cabbage), *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, Vol. 4 (28), pp. 13–19.
2. Vasiliev V.A., Lukyanenko I.I., Mineev V.G., *Organicheskie udobreniya v intensivnom zemledelii* (Organic fertilizers in intensive farming), Moscow: Kolos, 1984, 303 p.
3. Vasiliev V.A., Filippova N.V., *Spravochnik po organicheskim udobreniyam* (Handbook of organic fertilizers), Moscow: Rosselkhozizdat, 1988, 255 p.
4. GOST 33830-2016, Interstate standard. Organic fertilizers based on animal waste. Specifications; input. 2018–01–01, Moscow: Standartinform, 2016. 23 p.
5. Eskov A.I., Merzlaya G.E., *Spravochnaya kniga po proizvodstvu i primeneniyu organicheskikh udobrenii* (Reference book on the production and use of organic fertilizers), Vladimir: RAAS, VNIPTIOU, 2001, 495 p.
6. Kachikaev R.R., Firsova A.S., Lechitskaya T.V., Vliyanie raznykh doz kurinogo pometa na fiziko-khimicheskie svoystva chernozema vyshchelochennogo (Influence of different doses of chicken manure on the physicochemical properties of leached chernozem), *Proc. of the All-Russian (national) Sci. and Pract. Conf.*, 2020, Vol. I, Penza, pp. 90–94.
7. Kiryushin V.I., The management of soil fertility and productivity of agroecosystems in adaptive-landscape farming systems, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 1137–1145.
8. Kurakov A.V., Bilanenko E.N., Dynamics of mycobiota during composting of cow manure and straw, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 4, pp. 464–481.
9. Lazarev V.I., Stifeev A.I., Chernikov P.P., Effektivnost' granulirovannogo komposta iz kurinogo pometa na posevakh yarovogo yachmenya v usloviyakh chernozemnykh pochv Kurskoi oblasti (Efficiency of granulated compost from chicken manure on spring barley crops in the conditions of chernozem soils of the Kursk region), *Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo proizvodstva*, 2018, pp. 76–80.
10. Lysenko V.P., Merzlaya G.E., Afanasiev R.A., Biopreparaty dlya kompostirovaniya ptich'ego pometa (Biological products for composting bird droppings), *Ptitsevodstvo*, 2014, Vol. 3, pp. 39–44.
11. Merzlaya G.E., Volodarskaya N.I., Polunin S.F. et al., *Nauchnye osnovy i rekomendatsii po effektivnomu primeneniyu organicheskikh udobrenii* (Scientific bases and recommendations for the effective use of organic fertilizers), Moscow: VASKhNIL, VIUA, 1991, 216 p.
12. Merzlaya G.E., Afanasiev R.A., Kirsanov G.A., Kovalenko A.A., Stepanov A.I., Effektivnoe primeneniye organicheskikh udobrenii na osnove ptich'ego pometa (Effective use of organic fertilizers based on bird droppings),

*Nauchno-tekhnologicheskoye razvitiye APK kak drayver ekonomicheskogo rosta YEAEs*, 2018, pp. 212–221.

13. Naumova N.B., Ruchko E.N., Savenkov O.A., Pleshakova V.I., *Mikrobiom pochvy i sel'skokhozyaistvennykh kul'tur pri vnesenii komposta kurinogo pometa* (Microbiome of soil and agricultural crops during the application of chicken manure compost), *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2021, Vol. 4 (1), pp. 35–49.

14. Nenaidenko G.N., Ryabov D.A., Tarasov A.L., *Agrokhimicheskaya otsenka kurinogo opilochnogo komposta* (Agrochemical assessment of chicken sawdust compost), *Vladimirskiy zemledelets*, 2010, Vol. 4, pp. 31–33.

15. Potapov M.A., Frolov D.I., *Vnesenie kurinogo pometa i komposta na ego osnove na khimicheskii sostav pochvy* (The introduction of chicken manure and compost based on it on the chemical composition of the soil), *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2021a, Vol. 8 (4), pp. 60–64.

16. Potapov M.A., Frolov D.I., *Vliyanie kurinogo pometa na fizicheskie kharakteristiki pochvy* (Influence of chicken manure on the physical characteristics of the soil), *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2021b, Vol. 8 (3), pp. 56–60.

17. Sedykh V.A., Karaush P.Yu., *Perspektivy sozdaniya organicheskikh udobrenii s zadannymi svoystvami na osnove ptich'ego pometa (obzor)* (Prospects for the creation of organic fertilizers with desired properties based on bird droppings (review)), *Fertility*, 2010, Vol. 6, pp. 14–16.

18. Semenov V.M., Lebedeva T.N., de Gerenyu V.O.L., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N., *Puly i fraktsii organicheskogo ugleroda v pochve: struktura, funktsii i metody opredeleniya* (Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination), *The Journal of Soils and Environment*, 2023, Vol. 6 (1), e199–e199.

19. Semenov M.V., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Semenov V.M., *The structure of bacterial and fungal communities in the rhizosphere and root-free loci of gray forest soil*, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 319–332.

20. Sopolchenko O.A., Kamenev R.A., Turchin V.V., *(Economic evaluation of the use of compost from chicken manure for corn on the southern chernozem of the Rostov region)*, *Bulletin of Michurinsky State Agrarian University*, 2018, Vol. 2, pp. 98–103.

21. Sychev V.G., Merzlaya G.E., Petrova G.V., Filippova A.V., Popov V.I., Mishchenko V.N., *Ekonomicheskaya otsenka primeneniya komposta iz kurinogo pometa pod kukuruzu na chernozeme yuzhnom Rostovskoi oblasti* (Ecological and agrochemical properties and efficiency of vermi- and biocomposts), Moscow: VNIIA, 2017, 276 p.

22. Sychev V.G., Sokolov O.A., Zavalin A.A., Shmyreva N.Ya., *Ekologo-agrokhimicheskie svoystva i effektivnost' vermi- i biokompostov* (Ecology of

the use of organic fertilizers), Moscow: All-Russian Research Institute of Agrochemistry D.N. Pryanishnikova, 2017, 336 p.

23. Teuchezh A.A., *Ekologiya primeneniya organicheskikh udobrenii* (The use of bird manure as an organic fertilizer), *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, Vol. 128, pp. 914–931.

24. Turchin V.V., Sisin A.V., Balenko E.G., *Deistvie komposta iz kurinogo pometa na urozhainost' i kachestvo semyan podsolnechnika* (The effect of compost from chicken manure on the yield and quality of sunflower seeds), *Vestnik Michurinskogo GAU*, 2017, Vol. 4, p. 14.

25. Fisinin V.I., Sychev V.G., Afanasiev R.A., Lysenko V.P., Merzlaya G.E. et al., *Ispolzovanie ptich'ego pometa v zemledelii (nauchno-metodicheskoe rukovodstvo)* (The use of bird droppings in agriculture (scientific and methodological guide)), Moscow: OOO NIPKTS Voskhod-A, 2013, 272 p.

26. Chekaev N.P., *Agroekologicheskaya otsenka primeneniya kurinogo pometa v kachestve udobreniya* (Agroecological assessment of the use of chicken manure as a fertilizer), *Plodorodiye*, 2009, Vol. 3, pp. 13–14.

27. Chekaev N.P., Kulikova E.G., Lesnov A.V., *Deistvie ptich'ego pometa i izvestkovogo melioranta na kislотно-osnovnye svoystva chernozema vyshchelochennogo i urozhainost' sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (The effect of bird droppings and lime ameliorant on the acid-base properties of leached chernozem and the productivity of agricultural crops), *Niva Povolzh'ya*, 2020, Vol. 3 (56), pp. 65–72.

28. Ajwa H.A., Tabatabai M.A., *Decomposition of different organic materials in soils*, *Biol. Fertil. Soils*, 1994, Vol. 18, No. 3, pp. 175–182.

29. Amanullah M.M., Somasundaram E., Vaiyapuri K., Sathyamoorthi K., *Poultry manure to crops: A Review*, *Agricultural reviews-agricultural research communications centre India*, 2007, Vol. 28 (3), p. 216.

30. Ashworth A.J., Chastain J.P., Moore P.A., *Nutrient characteristics of poultry manure and litter*, *Animal manure: production, characteristics, environmental concerns, and management*, 2020, Vol. 67, pp. 63–87, DOI: [10.2134/aspectpub67.c5](https://doi.org/10.2134/aspectpub67.c5).

31. Awasthi M.K., Liu T., Chen H., Verma S., Duan Y., Awasthi S.K., Wang Q., Ren X., Zhao J., Zhang Z., *The behavior of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community during poultry manure composting*, *Bioresour. Technol.*, 2019, Vol. 280, pp. 70–78, DOI: [10.1016/j.biortech.2019.02.030](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.030).

32. Azeez J.O., Van Averbek W., *Fate of manure phosphorus in a weathered sandy clay loam soil amended with three animal manures*, *Bioresour. Technol.*, 2010, Vol. 101, pp. 6584–6588, DOI: [10.1016/j.biortech.2010.03.073](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.073).

33. Azim K., Soudi B., Boukhari S., Perissol C., Roussos S., Thami Alami I., Composting parameters and compost quality: a literature review, *Organic agriculture*, 2018, Vol. 8, pp. 141–158, DOI: [10.1007/s13165-017-0180-z](https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z).
34. Barbour E.K., Hussein S.A., Farran M.T., Itani D.A., Houalla R.H., Hamadeh S.K., Soil solarization: a sustainable agriculture approach to reduce microorganisms in chicken manure-treated soil, *Journal of Sustainable Agriculture*, 2002, Vol. 19 (4), pp. 95–104, DOI: [10.1300/J064v19n04\\_09](https://doi.org/10.1300/J064v19n04_09).
35. Cayci G., Temiz C., Sozudogru O.S., The effects of fresh and composted chicken manures on some soil characteristics, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, Vol. 48 (13), pp. 1528–1538, DOI: [10.1080/00103624.2017.1373794](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373794).
36. Chang R., Li Y., Chen Q., Gong X., Qi Z., Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting, *PloS one*, 2020, Vol. 15 (9), pp. e0229880, DOI: [10.1371/journal.pone.0229880](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229880).
37. Chen, Z.; Jiang, X., Microbiological Safety of Chicken Litter or Chicken Litter-Based Organic Fertilizers: A Review, *Agric.*, 2014, Vol. 4, pp. 1–29, DOI: [10.3390/agriculture4010001](https://doi.org/10.3390/agriculture4010001).
38. Chen G., Yuan J., Chen H., Zhao X., Wang S., Zhu Y., Wang Y., Animal manures promoted soil phosphorus transformation via affecting soil microbial community in paddy soil, *Sci. Total Environ.*, 2022, Vol. 831, pp. 154917, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.154917](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154917).
39. Crippen T.L., Sheffield C.L., Singh B., Byrd J.A., Beier R.C., Anderson R.C., Poultry litter and the environment: Microbial profile of litter during successive flock rotations and after spreading on pastureland, *Sci. Total Environ.*, 2021, Vol. 780, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.146413](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146413).
40. Dani U., Budiarti A.N.S., Wijaya A.A., Application of Chicken manure Dosage and Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Growth and Yield of Shallot Plants (*Allium ascalonicum* L.), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 748 (1), pp. 012044, DOI: [10.1088/1755-1315/748/1/012044](https://doi.org/10.1088/1755-1315/748/1/012044).
41. Dikinya O., Mufwanzala N., Chicken manure-enhanced soil fertility and productivity: Effects of application rates, *Journal of soil science and environmental management*, 2010, Vol. 1 (3), pp. 46–54.
42. Drózd D., Wystalska K., Malińska K., Grosser A., Grobelak A., Kacprzak M., Management of poultry manure in Poland - Current state and future perspectives, *J. Environ. Manage*, 2020, Vol. 264, pp. 110327, DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110327](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327).
43. Ezugworie F.N., Igbokwe V.C., Onwosi C.O., Proliferation of antibiotic-resistant microorganisms and associated genes during composting: An overview of the potential impacts on public health, management and future,

*Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 784, pp. 147191, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147191](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147191).

44. Feng G., Adeli A., Read J., McCarty J., Jenkins J., Consequences of pelletized poultry litter applications on soil physical and hydraulic properties in reduced tillage, continuous cotton system, *Soil Tillage Res.*, 2019, Vol. 194, pp. 104309, DOI: [10.1016/j.still.2019.104309](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104309).

45. Guo Z., Lv L., Liu D., He X., Wang W., Feng Y., Islam M.S., Wang Q., Chen W., Liu Z.; Wu S., Abied A., A global meta-analysis of animal manure application and soil microbial ecology based on random control treatments, *PLoS One*, 2022, Vol. 17, pp. 1–17, DOI: [10.1371/journal.pone.0262139](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262139).

46. Herbert, Bases of composting National Engineering Handbook, *Environmental Engineering*, Chapter 2, Composting, 2010, 637 p.

47. Hruby C.E., Soupir M.L., Moorman T.B., Pederson C., Kanwar R., Salmonella and Fecal Indicator Bacteria Survival in Soils Amended with Poultry Manure, *Water. Air. Soil Pollut.*, 2018, Vol. 229, pp. 1–14, DOI: [10.1007/s11270-017-3667-z](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3667-z).

48. Huang X., Jia Z., Guo J., Li T., Sun D., Meng H., Yu G., He X., Ran W., Zhang S., Hong J., Shen Q., Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol, *Geoderma*, 2019, Vol. 355, pp. 113880, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.113880](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113880).

49. Gigliotti G., Proietti P., Said-Pullicino D., Nasini L., Pezzolla D., Rosati L., Porceddu P.R., Co-composting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality, *International biodeterioration & biodegradation*, 2012, Vol. 67, pp. 8–14, DOI: [10.1016/j.ibiod.2011.11.009](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.11.009).

50. Guerra-Rodríguez E., Vazquez M., Díaz-Raviña M., Dynamics of the co-composting of barley waste with liquid poultry manure, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, Vol. 83 (3), pp. 166–172, DOI: [10.1002/jsfa.1302](https://doi.org/10.1002/jsfa.1302).

51. Gurmessa B., Ashworth A. J., Yang Y., Savin M., Moore P.A., Ricke S.C., et al., Variations in bacterial community structure and antimicrobial resistance gene abundance in cattle manure and poultry litter, *Environmental Research*, 2021, Vol. 197, pp. 111011, DOI: [10.1016/j.envres.2021.111011](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111011).

52. Guo Z., Lv L., Liu D., He X., Wang W., Feng Y., Islam M.S., Wang Q., Chen W., Liu Z. et al., A global meta-analysis of animal manure application and soil microbial ecology based on random control treatments, *PLoS One*, 2022, Vol. 17, pp. 1–17, DOI: [10.1371/journal.pone.0262139](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262139).

53. Islam M.S., Kasim S., Alam K.M., Amin A.M., Geok Hun T., Haque M.A., Changes in chemical properties of banana pseudostem, mushroom media waste, and chicken manure through the co-composting process,

Sustainability, 2021, Vol. 13 (15), pp. 8458, DOI: [10.3390/su13158458](https://doi.org/10.3390/su13158458).

54. Iqbal Y., Cottrell J.J., Suleria H.A.R., Dunshea F.R., Gut Microbiota-Polyphenol Interactions in Chicken: A Review, *Animals*, 2020, Vol. 10 (8), pp. 1391, DOI: [10.3390/ani10081391](https://doi.org/10.3390/ani10081391).

55. Jiang J., Stevenson D.S., Uwizeye A., Tempio G., Sutton M.A., A climate-dependent global model of ammonia emissions from chicken farming, *Biogeosciences*, 2021, Vol. 18 (1), pp. 135–158, DOI: [10.5194/bg-18-135-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-135-2021).

56. Kacprzak M.J., Sobik-Szołtysek J., The opoka-rock in N and P of poultry manure management according to circular economy, *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 316, pp. 115262, DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115262](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115262).

57. Kelleher B.P., Leahy J.J., Henihan A.M., O'dwyer T.F., Sutton D., Leahy M.J., Advances in poultry litter disposal technology – a review, *Bioresource technology*, 2002, Vol. 83 (1), pp. 27–36, DOI: [10.1016/S0960-8524\(01\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X).

58. Li H., Yang S., Semenov M.V., Yao F., Ye J., Bu R., Ma R., Lin J., Kurganova I., Wang X., Deng Y., Kravchenko I., Jiang Y., Kuzyakov Y., Temperature sensitivity of SOM decomposition is linked with a K- selected microbial community, *Global Change Biology*, 2021, Vol. 27 (12), pp. 2763–2779.

59. Li M.X., He X.S., Tang J., Li X., Zhao R., Tao Y.Q., Wang C., Qiu Z.P., Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting, *Chemosphere*, 2021, Vol. 264 (2), pp. 128549, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.128549](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549).

60. Lim S.L., Wu T.Y., Lim P.N., Shak K.P.Y., The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, Vol. 95 (6), pp. 1143–1156, DOI: [10.1002/jsfa.6849Awasthia](https://doi.org/10.1002/jsfa.6849Awasthia).

61. Mao H., Wang K., Wang Z., Peng J., Ren N., Metabolic function, trophic mode, organics degradation ability and influence factor of bacterial and fungal communities in chicken manure composting, *Bioresour. Technol.*, 2020, Vol. 302, pp. 122883, DOI: [10.1016/j.biortech.2020.122883](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122883).

62. Meier S., Curaqueo G., Khan N., Bolan N., Cea M., Eugenia G. M., Cornejo P., Ok Y.S., Borie F., Chicken-manure-derived biochar reduced bioavailability of copper in a contaminated soil, *Journal of Soils and Sediments*, 2017, Vol. 17, pp. 741–750.

63. Minkina T., Sushkova S., Delegan Y., Bren A., Mazanko M., Kocharovskaya Y., Filonov A., Rajput V.D., Mandzhieva S., Rudoy D., Prazdnova E.V., Vereshak E., Zelenkova G., Ranjan A., Effect of chicken manure on soil microbial community diversity in poultry keeping areas,

*Environmental Geochemistry and Health*, 2022, pp. 1–17, DOI: [10.1007/s10653-022-01447-x](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01447-x).

64. Neher D.A., Limoges M.A., Weicht T.R., Sharma M., Millner P.D., Donnelly C., Bacterial Community Dynamics Distinguish Poultry Compost from Dairy Compost and Non-Amended Soils Planted with Spinach, *Microorganisms*, 2020, Vol. 8, pp. 1601, DOI: [10.3390/microorganisms8101601](https://doi.org/10.3390/microorganisms8101601).

65. Ojeniyi S.O., Effect of poultry manure on selected soil physical and chemical properties, growth, yield and nutrient status of tomato, *African Journal of Agricultural Research*, 2008, Vol. 3 (9), pp. 612–616.

66. Panda A.K., Bisht S.S., De Mandal S., Kumar N.S., Microbial diversity of thermophiles through the lens of next generation sequencing, *Microbial diversity in the genomic era. Academic Press*, 2019, pp. 217–226, DOI: [10.1016/B978-0-12-814849-5.00013-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814849-5.00013-7).

67. Razmjoo P., Pourzamani H., Teiri H., Hajizadeh Y., Determination of an empirical formula for organic composition of mature compost produced in Isfahan-Iran composting plant in 2013, *International Journal of Environmental Health Engineering*, 2015, Vol. 4 (1), pp. 3, DOI: [10.4103/2277-9183.153988](https://doi.org/10.4103/2277-9183.153988).

68. Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002 (Animal by-products Regulation).

69. Ren F., Sun N., Xu M., Zhang X., Wu L., Xu M., Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A meta-analysis, *Soil Tillage Res.*, 2019, Vol. 194, pp. 104291, DOI: [10.1016/j.still.2019.06.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.008).

70. Rubežius M., Bleizgys R., Venslauskas K., Navickas K., Influence of biological pretreatment of poultry manure on biochemical methane potential and ammonia emission, *Biomass and Bioenergy*, 2020, pp. 142, DOI: [10.1016/j.biombioe.2020.105815](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105815).

71. Rynk R., Cooperband L., Oshins C., Wescott H., Bonhotal J., Schwarz M., Sherman R., Brown S., Why compost? In: *The Composting Handbook*, Academic Press, 2022, pp. 1–26, DOI: [10.1016/B978-0-323-85602-7.00001-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85602-7.00001-7).

72. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., van Bruggen A.H., Long-term fertilization rather than plant species shapes rhizosphere and bulk soil prokaryotic communities in agroecosystems, *Applied Soil Ecology*, 2020, Vol. 154, pp. 103641.

73. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., Ksenofontova N.A., Zinyakova N.B., van Bruggen A.H.C., Does fresh farmyard manure introduce surviving microbes into soil or activate soil-borne microbiota? *J. Environ.*

- Manage.*, 2021, Vol. 294, pp. 113018, DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113018](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113018).
74. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., van Bruggen A., Mineral and organic fertilizers distinctly affect fungal communities in the crop rhizosphere, *Journal of Fungi*, Vol. 8 (3), pp. 251.
75. Subirats J., Murray R., Yin X., Zhang T., Topp E., Impact of chicken litter pre-application treatment on the abundance, field persistence, and transfer of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 801, pp. 149718, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149718](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149718).
76. Tripetchkul S., Pundee K., Koonsrisuk S., Akeprathumchai S., Co-composting of coir pith and cow manure: initial C/N ratio vs physico-chemical changes, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2012, Vol. 1, pp. 1–8, DOI: [10.1186/2251-7715-1-15](https://doi.org/10.1186/2251-7715-1-15).
77. Tuomela M., Vikman M., Hatakka A., Itävaara M., Biodegradation of lignin in a compost environment: a review, *Bioresource technology*, 2000, Vol. 72 (2), pp. 169–183, DOI: [10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2).
78. Urrea J., Alkorta I., Lanzén A., Mijangos I., Garbisu C., The application of fresh and composted horse and chicken manure affects soil quality, microbial composition and antibiotic resistance, *Applied Soil Ecology*, 2019, Vol. 135, pp. 73–84, DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.11.005](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.005).
79. Wan L., Wang X., Cong C., Li J., Xu Y., Li X., Hou F., Wu Y., Wang L., Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw, *Bioresour Technol.*, 2020, Vol. 301, pp. 122730, DOI: [10.1016/j.biortech.2019.122730](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122730).
80. Wang Y., Gong J., Li J., Xin Y., Hao Z., Chen C., Li H., Wang B., Ding M., Li W., Zhang Z., Xu P., Xu T., Ding G.C., Li J., Insights into bacterial diversity in compost: Core microbiome and prevalence of potential pathogenic bacteria, *Sci. Total Environ.*, 2020, Vol. 718, pp. 137304, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137304](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137304).
81. Wang D., Lin J.Y., Sayre J.M., Schmidt R., Fonte S.J., Rodrigues J.L.M., Scow K.M., Compost amendment maintains soil structure and carbon storage by increasing available carbon and microbial biomass in agricultural soil – A six-year field study, *Geoderma*, 2022, Vol. 427, pp. 116117, DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116117](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116117).
82. Wei L.L., Chen S., Cui J., Ping H., Yuan C., Chen Q., A meta-analysis of arable soil phosphorus pools response to manure application as influenced by manure types, soil properties, and climate, *J. Environ. Manage.*, 2022, Vol. 313, pp. 115006, DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115006](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115006).
83. Wichuk K.M., McCartney D., Compost stability and maturity evaluation – a literature review, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2013, Vol. 8 (5), pp. 601–620, DOI: [10.1139/L10-101](https://doi.org/10.1139/L10-101).

84. Wu Z., Zhang L., Lin H., Zhou S., Enhanced removal of antibiotic resistance genes during chicken manure composting after combined inoculation of *Bacillus subtilis* with biochar, *Journal of Environmental Sciences*, 2022, Vol. 135, pp. 274–284, DOI: [10.1016/j.jes.2022.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.12.002).
85. Yang Q., Zhang H., Guo Y., Tian T., Influence of chicken manure fertilization on antibiotic-resistant bacteria in soil and the endophytic bacteria of pakchoi, *International journal of environmental research and public health*, Vol. 13 (7), pp. 662, DOI: [10.3390/ijerph13070662](https://doi.org/10.3390/ijerph13070662).
86. Yang S., Wu H., Wang Z., Semenov M.V., Ye J., Yin L., Wang X., Kravchenko I., Semenov V., Kuzyakov Y., Jiang Y., Li H., Linkages between the temperature sensitivity of soil respiration and microbial life strategy are dependent on sampling season, *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, Vol. 172, pp. 108758.
87. Zainudin M.H.M., Zulkarnain A., Azmi A.S., Muniandy S., Sakai K., Shirai Y., Hassan M.A., Enhancement of agro-industrial waste composting process via the microbial inoculation: a brief review, *Agronomy*, 2022, Vol. 12 (1), pp. 198, DOI: [10.3390/agronomy12010198](https://doi.org/10.3390/agronomy12010198).
88. Zhang D., Cheng H., Hao B., Li Q., Wu J., Zhang Y., Cao A., Fresh chicken manure fumigation reduces the inhibition time of chloropicrin on soil bacteria and fungi and increases beneficial microorganisms, *Environmental Pollution*, 2021, Vol. 286, pp. 117460, DOI: [10.1016/j.envpol.2021.117460](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117460).
89. Zhao X., Wang J., Zhu L., Ge W., Wang J., Environmental analysis of typical antibiotic-resistant bacteria and ARGs in farmland soil chronically fertilized with chicken manure, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 593, pp. 10–17, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.03.062](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.062).
90. Zhou Y., Xiao R., Klammsteiner T., Kong X., Yan B., Mihai F.C., Liua T., Zhanga Z., Kumar M., Awasthi M.K., Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: A review, *Bioresource Technology*, 2022, pp. 127591, DOI: [10.1016/j.biortech.2022.127591](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127591).
91. Zhu L., Lian Y., Lin D., Huang D., Yao Y., Ju F., Wang M., Insights into microbial contamination in multi-type manure-amended soils: The profile of human bacterial pathogens, virulence factor genes and antibiotic resistance genes, *J. Hazard. Mater.*, 2022, Vol. 437, pp. 129356, DOI: [10.1016/j.jhazmat.2022.129356](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129356).

УДК 633.15

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-199-223



**Ссылки для цитирования:**

Сафиоллин Ф.Н., Хисматуллин М.М., Лукманов А.А., Габитов Р.Х., Яхин И.Ф. Продуктивность кукурузы Росс 140 в зависимости от уровня химизации зональных почв республики Татарстан // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 199-223. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-199-223

**Cite this article as:**

Safiollin F.N., Khismatullin M.M., Lukmanov A.A., Gabitov R.H., Yakhin I.F., Productivity of corn Ross 140 depending on the level of the chemicalization of zonal soils of the republic of Tatarstan, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 199-223, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-199-223

## **Продуктивность кукурузы Росс 140 в зависимости от уровня химизации зональных почв республики Татарстан**

© 2023 г. Ф. Н. Сафиоллин<sup>1\*</sup>, М. М. Хисматуллин<sup>2\*\*</sup>,  
А. А. Лукманов<sup>3\*\*\*</sup>, Р. Х. Габитов<sup>1\*\*\*\*</sup>, И. Ф. Яхин<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный аграрный университет, Россия,  
420015, г.Казань, ул. К. Маркса, 65,

\* e-mail: [faik1948@mail.ru](mailto:faik1948@mail.ru),

\*\*\*\* e-mail: [RanisGabitov@tatar.ru](mailto:RanisGabitov@tatar.ru),

\*\*\*\*\* e-mail: [ildarsuper97@bk.ru](mailto:ildarsuper97@bk.ru).

<sup>2</sup>ФГБУ "Управление "Татмелиоводхоз", Россия,  
420073, Казань, ул. Гвардейская, 15,

\*\* e-mail: [rezi-almet@yandex.ru](mailto:rezi-almet@yandex.ru).

<sup>3</sup>ФГБУ "ЦАС "Татарский", Россия,  
420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 120,

\*\*\* e-mail: [agrohim161@mail.ru](mailto:agrohim161@mail.ru).

Поступила в редакцию 23.05.2023, после доработки 25.05.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** Известно, что из одного и того же кукурузного сырья можно заготовить силос, корнаж, плющенное зерно или зерно на фураж. В каждом виде корма содержится совершенно разное количество

питательных веществ, а валовый сбор комровых единиц варьирует в широком диапазоне. Результаты исследований показывают, что выбор способа использования кукурузы напрямую зависит от зональных особенностей почвенного покрова и существующего уровня химизации сельскохозяйственных формирований Республики Татарстан, которые подробно рассмотрены в настоящей работе. Так, для производства плющеного зерна или корнажа с валовым сбором кормовых единиц 7.94–8.82 т/га и при уровне рентабельности 78.7% на выщелоченных черноземах, на долю которых приходится 38% почв Республики Татарстан, кукурузу рекомендуется возделывать на фоне комплексного применения агромелиорантов и расчетных норм минеральных удобрений. Известкование кислых темно-серых и серых лесных почв с фосфоритованием и внесением цеолита в сочетании с применением NPK обеспечивает повышение валового сбора кормовых единиц в кукурузном силосе от 4.22 до 6.13 и 3.34 до 5.86 т/га соответственно. Высокая эффективность применения агрохимикатов на посевах кукурузы и при заготовке различных видов кормов с учетом зональных особенностей почвенного покрова Республики Татарстан подтверждается и экономическими расчетами. Рентабельность производства плющеного зерна достигает максимальной величины (78.8%) в варианте, где известкование и фосфоритование выщелоченного чернозема сочетается с внесением расчетных минеральных удобрений на планируемую урожайность зеленой массы 35 т/га. Вместе с тем на темно-серых и серых лесных почвах по мере повышения урожайности зеленой массы под действием агромелиорантов общие затраты на заготовку силоса увеличиваются на 13.1 и 16.5 тыс. руб/га по сравнению с контрольными вариантами опыта (без агрохимикатов). Однако себестоимость производства 1 000 кормовых единиц снижается до 9.9 и 10.4 тыс. руб. соответственно при условной цене реализации 14 тыс. рублей.

**Ключевые слова:** агромелиоранты, корнаж, силос, плющенное зерно, рентабельность, себестоимость, условно-чистый доход.

## **Productivity of corn Ross 140 depending on the level of the chemicalization of zonal soils of the republic of Tatarstan**

© 2023 F. N. Safiollin<sup>1\*</sup>, M. M. Khismatullin<sup>2\*\*</sup>,  
A. A. Lukmanov<sup>3\*\*\*</sup>, R. H. Gabitov<sup>1\*\*\*\*</sup>, I. F. Yakhin<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Agrarian University,  
65 K. Marks Str., Kazan 420015, Russian Federation,

\*e-mail: [faik1948@mail.ru](mailto:faik1948@mail.ru),  
\*\*\*\*e-mail: [RanisGabitov@tatar.ru](mailto:RanisGabitov@tatar.ru),  
\*\*\*\*\*e-mail: [ildarsuper97@bk.ru](mailto:ildarsuper97@bk.ru).

<sup>2</sup>FGBU “Department “Tatmeliovodkhoz”,  
15 Gvardeyskaya Str., Kazan 420073, Russian Federation,  
\*\*e-mail: [rezi-almet@yandex.ru](mailto:rezi-almet@yandex.ru).

<sup>3</sup>FGBU “Center of Agrochemical Service “Tatarsky”,  
120 Orenburgsky Trakt, Kazan 420059, Russian Federation,  
\*\*\*e-mail: [agrohim161@mail.ru](mailto:agrohim161@mail.ru).

Received 23.05.2023, Revised 25.05.2023, Accepted 27.06.2023

**Abstract:** It is known that one and the same corn plant material can be used to produce silage, cornage, milled grain, or grain for fodder. Each of them contains completely different amounts of nutrients and a wide range of gross yield of fodder units. The results of the research show the direct dependence of the choice of corn use on zonal features of the soil cover and the existing level of chemicalization of agricultural formations of the Republic of Tatarstan, which are considered in detail in this paper. Thus, in order to produce the ploughed grain or corn with the gross harvest of fodder units 7.94–8.82 t/ha and profitability of 78.7% on leached chernozems, which account for 38% of soils of the Republic of Tatarstan, it is recommended to cultivate corn using the complex application of agromeliorants and calculated norms of mineral fertilizers. Liming of acidic dark gray and gray forest soils with phosphorite and zeolite application in combination with NPK provides increase in gross harvest of fodder units of corn silage from 4.22 to 6.13 and 3.34 to 5.86 t/ha respectively. The high efficiency of agrochemicals application on corn crops and forage harvesting of different types of fodder taking into account zonal features of soil cover of the Republic of Tatarstan is also confirmed by economic indicators. The profitability of production of rolled grain reaches the maximum value (78.8%) in the variant with liming and phosphating of leached chernozem combined with the application of mineral fertilizers in rates calculated for obtaining the planned 35 t/ha of green mass. At the same time, on dark gray and gray forest soils as the yield of green mass increases under the influence of agromeliorants the total costs of silage production increases by 13.1 and 16.5 thousand rubles/ha compared with the control variants of the experiment (without agrochemicals). However, the costs of production of 1 000 fodder units are reduced to 9.9 and 10.4 thousand rubles respectively, provided that the sale price is about 14 thousand rubles.

**Keywords:** agromeliorants, cornage, silage, rolled corn grain, profitability, production costs, net income.

## ВВЕДЕНИЕ

Кукуруза является самой универсальной культурой в мире. Кукурузное зерно широко используется в питании человека в виде муки, крупы, крахмала, растительного масла и алкогольных напитков ([Шакиров и др., 2017](#); [Крупин и др., 2021](#)). В США и Бразилии из зерна кукурузы вырабатывают этиловый спирт в качестве альтернативного источника дизельному топливу ([Иванов, Столбовой, 2022](#); [Вафин и др., 2018](#)), в КНР кукуруза используется для производства грубой бумаги ([Вафин и др., 2018](#); [Иванов и др., 2021](#); [Vafina, Safiollin, 2021](#)). Однако основным потребителем кукурузы исторически было и остается животноводство, поскольку урожайность и питательность зеленой массы и валовые сборы кормовых единиц в 2–3 раза выше, чем у других силосных культур (однолетние травы, кормосмеси, подсолнечник на силос и др.). Более того, в настоящее время существенно расширены способы использования кукурузы на кормовые цели. Так, разработаны технологии заготовки и хранения плющеного зерна, измельченного корнажа и качественного силоса с использованием современных биопрепаратов ([Иванов, 2019](#); [Сотченко и др., 2017](#)). Однако для получения таких высоких результатов необходимо разработать и внедрить приемы оптимизации химической мелиорации земель с учетом почвенно-климатических условий Республики Татарстан, провести сравнительную оценку качества различных видов кукурузных кормов и рассчитать их экономические показатели, что стало целью наших исследований.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной цели двухфакторный полевой опыт проводился в 2018–2022 гг. на трех типах почв: выщелоченные черноземы в СХПК “Ембулатово” Буинского, темно-серые (АПК “Продпрогномма”) Мамадышского и серые лесные почвы (СХПК “Нур”) Тетюшского муниципальных районов Республики Татарстан, – в звене полевого севооборота: чистый пар с известкованием, фосфоритованием и внесением цеолита (2018 г.) – озимая рожь на зерно (2019 г.) – яровая пшеница (2020 г.) – ячмень на фураж (2021 г.) – кукуруза (2022 г.). В целях упрощения методики

изложения результатов исследований в настоящей работе рассматривается только урожайность и качество различных видов кормов, заготовленных из кукурузы.

В качестве минеральных удобрений использовали аммиачную селитру с содержанием азота 34.5%, двойной суперфосфат (49%  $P_2O_5$ ) и калийную соль (40%  $K_2O$ ). Известкование проводили известью местных карьеров с содержанием влаги 9.4–10.6%, кальция и магния 89.8–93.5% среднего помола, которые соответствовали ТУ 2015.79-016-5934001-2017. Фосфоритная мука содержало 22%  $P_2O_5$  и влаги 15 процентов.

Цеолит Татарско-Шатранского месторождения использовали в качестве пролонгатора фосфоритной муки, минеральных удобрений и извести. Кроме того, в составе цеолита содержатся калий, кальций, натрий и комплекс микроэлементов ([Сотченко и др., 2017](#); [Иванов, Столбовой, 2019](#)).

Методика проведения исследований была общепринятой для кормовых культур ([Чекмарев и др., 2017](#)), повторность опыта – четырехкратная, размещение делянок – систематическое. Технология возделывания районированной гибридной кукурузы двойного назначения (силос и зерно) Росс 140 была общепринятой (дискование после уборки предшественника (ячмень) с последующей плоскорезной обработкой почвы на глубину 24 см, весной закрытие влаги в 2 следа, внесение расчетных норм минеральных удобрений, предпосевная культивация, посев с прикатыванием во второй декаде мая с нормой высева 71.5 тыс. шт./га всхожих семян с шириной междурядий 70 см и расстоянием в рядах 20 см. Экономическая эффективность рассчитана общепринятым методом – путем сопоставления общих затрат со стоимостью кормовых единиц в средних ценах за последние 4 года – 14 тыс. руб./т.

Агрометеорологические условия вегетационного периода 2022 г. существенно отличались от среднемноголетних показателей: в мае выпало 70.8–78.4 мм осадков, что в 2 раза больше нормы, июнь и август сопровождались высокими термическими ресурсами в сочетании с дефицитом влаги. В критический период потребления воды кукурузой (июль) выпало 62–65 мм осадков, что стало основой формирования высокопродуктивных агроценозов объекта исследований во всех зонах проведения исследований,

хотя ГТК за май–сентябрь составил 0.85–0.96 против среднемноголетнего значения равного 1.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сочетание двух благоприятных факторов внешней среды (высокая обеспеченность влагой в начале вегетации и в критический период водопотребления, термические ресурсы) с оптимизацией условий питания кукурузы обеспечили формирование биомассы выше планируемой величины (табл. 1).

В контрольном варианте опыта прибавка от почвенного покрова выщелоченного чернозема (без применения агромелиорантов и минеральных удобрений) превышает таковую серых лесных почв на 7.2 т/га зеленой массы кукурузы и имеет тенденцию к снижению до 5.2 т/га под действием комплексного применения агромелиорантов и минеральных удобрений (NPK + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га).

В то же время прибавка урожая за счет известкования, фосфатирования, применения цеолита и внесения расчетных норм минеральных удобрений на серых лесных почвах достигает максимального значения 12.6 т/га биомассы, что на 53.8% выше, чем в контрольном варианте, по сравнению с 19.2% (табл. 1). Неслучайно ведущие агрохимики ([Лукманов и др., 2021](#); [Шайтанов и др., 2018](#); [Таланов и др., 2015](#)) утверждают, что среднегодовое поступление NPK в почву должно быть не менее среднегодового поступления извести.

Следует также особо подчеркнуть высокую эффективность комплексного применения агрохимикатов и на выщелоченных черноземах Республики Татарстан. Несмотря на 5-летнюю давность известкования, фосфоритования, применения цеолита, внесение NPK с расчетом получения 35 т/га зеленой массы было получено 10.6 т/га дополнительной продукции, что выше контроля на 34.6%. В этом варианте опыта агромелиоранты обеспечили получение 41.2 т/га зеленой массы против 33.8 т/га, полученных с внесением азотных, фосфорных и калийных удобрений без предварительного известкования и фосфоритования в сочетании с применением пролонгатора (цеолита) из расчета 0.5 т/га.

**Таблица 1.** Влияние почвенного покрова и агрохимикатов на урожайность биомассы гибридной кукурузы Росс 140

**Table 1.** Effect of soil cover and agrochemicals on biomass yield of hybrid corn Ross 140

| Фактор А<br>(почвенный покров) | Фактор В (агромелиоранты и минеральные удобрения)      | Урожайность зеленой массы, т/га | Прибавка от агрохимикатов |      | Прибавка от почвенного покрова |      |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------|--------------------------------|------|
|                                |                                                        |                                 | т/га                      | %    | т/га                           | %    |
| Выщелоченный чернозем          | Контроль (без удобрений)                               | 30.6                            | -                         | -    | 7.2                            | 30.8 |
|                                | НРК на 35 т/га зеленой массы                           | 33.8                            | 3.2                       | 10.5 | 5.9                            | 21.1 |
|                                | НРК + известкование 5 т/га                             | 35.7                            | 5.1                       | 16.7 | 5.6                            | 18.6 |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 38.9                            | 8.3                       | 27.1 | 5.3                            | 15.8 |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 41.2                            | 10.6                      | 34.6 | 5.2                            | 14.4 |
| Темно-серые лесные почвы       | Контроль (без удобрений)                               | 26.4                            | -                         | -    | 3.0                            | 12.8 |
|                                | НРК на 35 т/га зеленой массы                           | 30.7                            | 4.3                       | 16.3 | 2.8                            | 10.4 |
|                                | НРК + известкование 6 т/га                             | 32.5                            | 6.1                       | 23.1 | 2.4                            | 8.0  |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 35.0                            | 9.6                       | 36.4 | 2.4                            | 7.1  |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 38.3                            | 11.9                      | 45.1 | 2.3                            | 6.4  |

**Продолжение таблицы 1**  
**Table 1 continued**

| Фактор А<br>(почвенный покров) | Фактор В (агромелиоранты и минеральные удобрения)      | Урожайность зеленой массы, т/га | Прибавка от агрохимикатов |      | Прибавка от почвенного покрова |   |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------|--------------------------------|---|
|                                |                                                        |                                 | т/га                      | %    | т/га                           | % |
| Серые лесные почвы (контроль)  | Контроль (без удобрений)                               | 23.4                            | -                         | -    | -                              | - |
|                                | НРК на 35 т/га зеленой массы                           | 27.9                            | 4.5                       | 19.2 | -                              | - |
|                                | НРК + известкование 7 т/га                             | 30.1                            | 6.7                       | 28.6 | -                              | - |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 33.6                            | 10.2                      | 43.6 | -                              | - |
|                                | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 36.0                            | 12.6                      | 53.8 | -                              | - |
| НСР <sub>0.5</sub>             | А                                                      | 1.41                            |                           |      |                                |   |
|                                | В                                                      | 1.82                            |                           |      |                                |   |
|                                | АВ                                                     | 2.14                            |                           |      |                                |   |

Тем не менее, эффективность комплексного применения агрохимикатов на серых лесных почвах (прибавка урожайности зеленой массы кукурузы 58.8%) превышает таковую на выщелоченных черноземах (прибавка 34.6%), а темно-серые лесные почвы занимают промежуточное положение с прибавкой урожайности биомассы изучаемой культуры 45.1% по сравнению с контрольным вариантом опыта (без удобрений и агроメリорантов).

В отличие от 80-х годов прошлого столетия в настоящее время задача возделывания кукурузы коренным образом изменилась в сторону получения не рекордно высокой урожайности зеленой массы, а высокопитательного корма с початками в молочно-восковой или восковой спелости зерна. В связи с этим республиканская программа “Три по сто” предусматривает ежегодное выращивание кукурузы на зерно на площади 100 тыс. га, включая по 100 тыс. га подсолнечника и ярового рапса для производства масличного сырья, в качестве высокомаржинальных сельскохозяйственных культур. Решение данной архиважной проблемы возможно на основе химической мелиорации земель в сочетании с внесением минеральных удобрений с учетом зональных особенностей почвенного покрова Республики Татарстан (табл. 2).

На черноземах формирование плотного агроценоза (от 52 до 61 тыс. шт./га продуктивных стеблей) с двумя крупными початками и содержанием от 280 до 368 шт. семян массой от 60 до 82 г обеспечило получение от 5.64 до 8.82 т/га зерна при 35%-ной влажности в зависимости от применения минеральных удобрений и агроメリорантов в технологии возделывания основной кормовой культуры Татарстана – кукурузы. При этом прибавка урожая от химизации возрасла от 1.16 т/га в варианте применения NPK без агроメリорантов до 3.18 т/га зерна в последнем варианте опыта (NPK + известкование + фосфоритование + внесение цеолита).

В тех же агрометеорологических условиях, при абсолютно одинаковой технологии возделывания изучаемой культуры на серых лесных почвах было получено 2.48–5.01 т/га зерна той же гибридной кукурузы Росс 140 соответственно по сравниваемым вариантам опыта.

**Таблица 2.** Урожайность зерна гибридной кукурузы Росс 140 в зависимости от уровня химизации зональных почв Республики Татарстан

**Table 2.** Grain yield of hybrid corn Ross 140 depending on the level of chemicalization of zonal soils in the Republic of Tatarstan

| Фактора А<br>(почвенный покров) | Фактора В (агромелиоранты и минеральные удобрения)     | Урожай-<br>ность<br>зерна, т/га | Прибавка от агрохимика-<br>тов |      | Прибавка от почвенного покрова |       |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------|
|                                 |                                                        |                                 | т/га                           | %    | т/га                           | %     |
| Выщелоченный чернозем           | Контроль (без удобрений)                               | 5.64                            | -                              | -    | 3.16                           | 117.4 |
|                                 | NPK на 35 т/га зеленой массы                           | 6.80                            | 1.16                           | 20.6 | 3.35                           | 97.1  |
|                                 | NPK + известкование 5 т/га                             | 7.65                            | 2.01                           | 35.6 | 3.49                           | 83.9  |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 8.34                            | 2.70                           | 47.9 | 3.67                           | 78.6  |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 8.82                            | 3.18                           | 56.4 | 3.81                           | 76.0  |
| Темно-серые лесные почвы        | Контроль (без удобрений)                               | 3.12                            | -                              | -    | 0.64                           | 25.8  |
|                                 | NPK на 35 т/га зеленой массы                           | 4.21                            | 1.09                           | 34.9 | 0.76                           | 22.0  |
|                                 | NPK + известкование 6 т/га                             | 4.68                            | 1.56                           | 50.0 | 0.52                           | 12.5  |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 5.15                            | 2.03                           | 65.1 | 0.48                           | 10.3  |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 5.45                            | 2.33                           | 74.7 | 0.44                           | 8.9   |

**Продолжение таблицы 2**  
**Table 2 continued**

| Фактора А<br>(почвенный покров) | Фактора В (агромелиоранты и минеральные удобрения)     | Урожай-<br>ность<br>зерна, т/га | Прибавка от агрохимикатов |       | Прибавка от почвенного покрова |   |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------|--------------------------------|---|
|                                 |                                                        |                                 | т/га                      | %     | т/га                           | % |
| Серые лесные почвы (контроль)   | Контроль (без удобрений)                               | 2.48                            | -                         | -     | -                              |   |
|                                 | NPK на 35 т/га зеленой массы                           | 3.45                            | 0.97                      | 39.1  | -                              |   |
|                                 | NPK + известкование 7 т/га                             | 4.16                            | 1.68                      | 67.7  | -                              | - |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование 1 т/га            | 4.67                            | 2.19                      | 88.3  | -                              | - |
|                                 | NPK + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га | 5.01                            | 2.58                      | 102.0 | -                              | - |
| HCP <sub>0.5</sub>              | А                                                      | 0.63                            |                           |       |                                |   |
|                                 | В                                                      | 0.85                            |                           |       |                                |   |
|                                 | АВ                                                     | 1.08                            |                           |       |                                |   |

На темно-серых лесных почвах комплексное применение агрохимикатов, так же, как и на серых лесных почвах, сглаживает разницу между ними и выщелоченными черноземами. Например, преимущество выщелоченного чернозема, по сравнению с серыми лесными почвами, снизилось от 127.4% в контроле (без удобрений) до 76.0% в последнем варианте опыта, что характерно и для темно-серых лесных почв – от 80.1 до 61.8%.

Несмотря на весьма высокие прибавки урожайности зерна кукурузы (39.1–102.0%) в вариантах с применением минеральных удобрений и агромелиорантов на серых лесных почвах, ее физическая величина составляет всего 3.45–5.01 т/га, по сравнению с 6.80–8.82 т/га на выщелоченных черноземах, что необходимо учитывать при выборе способа использования выращенной продукции (табл. 3; рис. 1, 2, 3).

Сравнительная оценка валового сбора кормовых единиц в зависимости от способов заготовки кукурузных кормов показывает весьма противоречивые закономерности. Во-первых, валовой сбор кормовых единиц кукурузы, убранной для заготовки фуражного зерна, во всех зональных почвах и во всех вариантах опыта был ниже, если сравнить с закладкой кукурузы на силос и с консервацией в виде плющеного зерна. На серых лесных почвах данная разница в пользу силоса составила 1.96 т/га ( $3.74 - 1.78 = 1.96$  т/га), что также характерно для плющеного зерна и корнажа. Такое противоречие объясняется сроками уборки и влажностью зерна кукурузы. Максимальное содержание кормовых единиц в зерне кукурузы достигается при влажности 35% (восковая спелость), а для закладки на фуражное зерно требуется ее снижать до 15%. Другими словами, валовой сбор кормовых единиц в зерне автоматически уменьшается на 20%. Кроме того, при сушке снижается содержание белка, суммы сахаров, аминокислот и других питательных веществ ([Хисматуллин, Сафиоллин, 2019](#); [Хисматуллин, 2010](#)). В то же время уборка кукурузы на зерно даже в самые поздние сроки (конец октября) в почвенно-климатических условиях нашей республики не обеспечивает снижение его влажности ниже 32%.

**Таблица 3.** Сравнительная оценка эффективности заготовки различных видов кормов из гибридной кукурузы Росс 140, т/га кормовых единиц

**Table 3.** Comparative evaluation of the efficiency of various fodder conservation types, hybrid corn Ross 140 being used, t/ha of fodder units

| <b>Фактор А<br/>(почвенный покров)</b> | <b>Фактор В (агромелиоранты и минеральные удобрения)</b> | <b>Силос</b> | <b>Зерно на фураж</b> | <b>Плющенное зерно</b> | <b>Корнаж</b> |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| Выщелоченный чернозем                  | Контроль (без удобрений)                                 | 4.90         | 4.06                  | 5.08                   | 5.64          |
|                                        | НРК на 35 т/га зеленой массы                             | 5.41         | 4.90                  | 6.12                   | 6.80          |
|                                        | НРК + известкование 5 т/га                               | 5.71         | 5.51                  | 6.89                   | 7.65          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га              | 6.22         | 6.01                  | 7.51                   | 8.34          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га   | 6.59         | 6.35                  | 7.94                   | 8.82          |
| Темно-серые лесные почвы               | Контроль (без удобрений)                                 | 4.22         | 2.25                  | 2.81                   | 3.12          |
|                                        | НРК на 35 т/га зеленой массы                             | 4.91         | 3.03                  | 3.79                   | 4.21          |
|                                        | НРК + известкование 6 т/га                               | 5.20         | 3.37                  | 4.21                   | 4.68          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га              | 5.76         | 3.71                  | 4.64                   | 5.15          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га   | 6.13         | 3.93                  | 4.91                   | 5.45          |

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

| <b>Фактор А<br/>(почвенный покров)</b> | <b>Фактор В (агромелиоранты и минеральные удобрения)</b> | <b>Силос</b> | <b>Зерно на фураж</b> | <b>Плющенное зерно</b> | <b>Корнаж</b> |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| Серые лесные почвы (контроль)          | Контроль (без удобрений)                                 | 3.74         | 1.78                  | 2.23                   | 2.48          |
|                                        | НРК на 35 т/га зеленой массы                             | 4.64         | 2.49                  | 3.11                   | 3.45          |
|                                        | НРК + известкование 7 т/га                               | 4.82         | 2.99                  | 3.74                   | 4.16          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование 1 т/га              | 5.38         | 3.36                  | 4.20                   | 4.67          |
|                                        | НРК + известкование + фосфоритование + цеолит 0.5 т/га   | 5.76         | 3.61                  | 4.51                   | 5.01          |



**Рис. 1.** Плющенное зерно кукурузы в полиэтиленовых рукавах.  
**Fig. 1.** Rolled corn grain in polyethylene sleeves.



**Рис. 2.** Комбайн для уборки кукурузы на зерно.  
**Fig. 2.** Corn grain harvester.



**Рис. 3.** Кукурузный силос.  
**Fig. 3.** Corn silage.

Во-вторых, на выщелоченных черноземах результаты исследований показывают явное преимущество заготовки плющеного зерна и закладки его в полиэтиленовые рукава для зимнего хранения, по сравнению с закладкой на силос с початками в стадии молочной спелости, особенно в последнем варианте опыта с высокой химизацией (валовой сбор кормовых единиц в кукурузном силосе 6.59, а в плющеном зерне – 7.94 т/га).

На темно-серых и серых лесных почвах Татарстана наибольший сбор кормовых единиц обеспечивает кукурузный силос: на темно-серых почвах – 4.22–6.13 т/га, на серых лесных почвах – 3.74–5.76 т/га, по сравнению с 2.81–4.91 и 2.23–4.51 т/га кормовых единиц соответственно в плющеном зерне этой культуры.

И, наконец, следует особо остановиться на заготовке корнажа. Его отличие заключается в том, что при помощи специальной жатки, которая устанавливается на силосоуборочный комбайн, отдельно убирают початки кукурузы при 35%-ной влажности и

измельчают. В дальнейшем измельченная масса также закладывается в полиэтиленовые рукава ([Агиева и др., 2020](#); [Миннуллин и др., 2011](#); [Хисматуллин и др., 2022](#)).

Его преимущество заключается в сборе не только зерна, но и початка целиком с листообразными обертками. Более того, исключается процесс плющения, что значительно снижает затраты на электроэнергию. В результате при меньших затратах валовой сбор кормовых единиц на выщелоченных черноземах достигает максимальных величин (5.64–8.82 т/га) по сравнению с заготовкой кукурузного силоса (4.9–6.59 т/га), кукурузного фуражного зерна (4.06–7.94 т/га) (табл. 3).

Высокая эффективность применения агрохимикатов на посевах кукурузы и при заготовке различных видов кормов с учетом зональных особенностей почвенного покрова Республики Татарстан подтверждается экономическими расчетами (табл. 4).

Прежде чем приступить к анализу экономических показателей производства кукурузных кормов следует отметить, что известкование и фосфоритование в Республике Татарстан проводится по принципу 80 : 20 (80% затрат – за счет бюджетных средств и 20% затрат – конкретного хозяйства). Более того, 20% затрат делится на 5 культур полевого севооборота. Основные затраты приходятся на выполнение технологических операций, прежде всего это расходы на ГСМ, ежегодное применение минеральных удобрений и фонд заработной платы.

Так общие затраты по мере повышения валового сбора кормовых единиц в плющеном кукурузном зерне с 5.08 т/га в контрольном варианте опыта до 7.94 т/га в варианте комплексного применения агрохимикатов (известкование + фосфоритование + NPK + цеолит) увеличивается с 45.3 до 63.3 тыс. руб./га. Однако рентабельность производства плющеного зерна достигает максимальной величины (78.7%) именно в варианте, где известкование и фосфоритование сочетается с внесением расчетных норм минеральных удобрений. Из этой общей закономерности (рентабельность 75.7%) выпадает лишь вариант с использованием цеолита, поскольку ООО “Цеолиты Поволжья” реализует его по цене 60 тыс. руб./т, и дотация со стороны государства отсутствует.

**Таблица 4.** Экономические показатели производства различных видов кормов из кукурузы в зависимости от уровня химизации зональных почв Республики Татарстан

**Table 4.** Economic indicators of production of different types of corn fodder depending on the level of chemicalization of zonal soils of the Republic of Tatarstan

| Фактор А<br>(почвенный покров) | Фактор В (агромелиоран-<br>ты и минеральные удоб-<br>рения)  | Стоимость<br>вал. про-<br>дукции,<br>тыс. руб./га | Общие<br>затра-<br>ты, тыс.<br>руб./га | Условно<br>чистый<br>доход,<br>тыс.<br>руб./га | Рента-<br>бель-<br>ность,<br>% | Себесто-<br>имость,<br>тыс.<br>руб./т<br>корм. ед. |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|
| <i>Плющенное зерно</i>         |                                                              |                                                   |                                        |                                                |                                |                                                    |
| Выщелоченный<br>чернозем       | Контроль (без удобрений)                                     | 71.1                                              | 45.3                                   | 25.8                                           | 56.9                           | 9.0                                                |
|                                | НРК на 35 т/га зеленой мас-<br>сы                            | 85.7                                              | 51.1                                   | 34.6                                           | 67.7                           | 8.3                                                |
|                                | НРК + известкование 5 т/га                                   | 96.5                                              | 55.7                                   | 40.8                                           | 73.2                           | 8.1                                                |
|                                | НРК + известкование +<br>фосфоритование 1 т/га               | 105.1                                             | 58.8                                   | 46.3                                           | 78.7                           | 7.8                                                |
|                                | НРК + известкование +<br>фосфоритование + цеолит<br>0.5 т/га | 111.2                                             | 63.3                                   | 47.9                                           | 75.7                           | 8.0                                                |

**Продолжение таблицы 4**

**Table 4 continued**

| <b>Фактор А<br/>(почвенный<br/>покров)</b> | <b>Фактор В<br/>(агромелиоранты и<br/>минеральные удобрения)</b> | <b>Стоимость<br/>вал. про-<br/>дукции,<br/>тыс. руб./га</b> | <b>Общие<br/>затра-<br/>ты, тыс.<br/>руб./га</b> | <b>Условно<br/>чистый<br/>доход,<br/>тыс.<br/>руб./га</b> | <b>Рента-<br/>бель-<br/>ность,<br/>%</b> | <b>Себесто-<br/>имость,<br/>тыс.<br/>руб./т<br/>корм. ед.</b> |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <i><b>Кукуруза на силос</b></i>            |                                                                  |                                                             |                                                  |                                                           |                                          |                                                               |
| Темно-серые<br>почвы                       | Контроль (без удобрений)                                         | 59.1                                                        | 48.4                                             | 10.7                                                      | 22.1                                     | 11.5                                                          |
|                                            | НРК на 35 т/га зеленой массы                                     | 68.7                                                        | 52.6                                             | 16.1                                                      | 30.6                                     | 10.7                                                          |
|                                            | НРК + известкование 6 т/га                                       | 72.8                                                        | 54.9                                             | 17.9                                                      | 32.6                                     | 10.6                                                          |
|                                            | НРК + известкование + фос-<br>форитование 1 т/га                 | 80.6                                                        | 57.1                                             | 23.5                                                      | 41.2                                     | 9.9                                                           |
|                                            | НРК + известкование + фос-<br>форитование + цеолит 0.5 т/га      | 85.8                                                        | 61.5                                             | 24.3                                                      | 39.5                                     | 10.0                                                          |
| Серые лес-<br>ные почвы<br>(контроль)      | Контроль (без удобрений)                                         | 52.4                                                        | 44.1                                             | 8.3                                                       | 18.8                                     | 11.8                                                          |
|                                            | НРК на 35 т/га зеленой массы                                     | 65.0                                                        | 51.8                                             | 13.2                                                      | 25.5                                     | 11.2                                                          |
|                                            | НРК + известкование 7 т/га                                       | 67.5                                                        | 52.4                                             | 15.1                                                      | 28.8                                     | 10.9                                                          |
|                                            | НРК + известкование + фос-<br>форитование 1 т/га                 | 75.3                                                        | 56.0                                             | 19.3                                                      | 34.4                                     | 10.4                                                          |
|                                            | НРК + известкование + фос-<br>форитование + цеолит 0.5 т/га      | 80.6                                                        | 60.9                                             | 19.7                                                      | 32.3                                     | 10.6                                                          |

Вторым важнейшим экономическим показателем является себестоимость производства корма из кукурузы, так как она оказывает прямое влияние на стоимость молочной и мясной продукции в розничной торговле (Сафиоллин и др., 2017). Себестоимость производства кукурузного силоса на темно-серых и серых лесных почвах Республики Татарстан при одинаковых уровнях минерального питания и применения агроулучшителей превышает производство плющеного зерна на 2.6–2.8 тыс. руб. Данное противоречие связано с огромными затратами на перевозку более 30 т/га биомассы кукурузы в силосную яму в сравнении с 7–9 т/га зерна этой культуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для производства плющеного зерна с валовым сбором кормовых единиц 7.94–8.82 т/га и рентабельностью 76–79% на выщелоченных черноземах Республики Татарстан кукурузу рекомендуется возделывать на фоне комплексного применения агроулучшителей и расчетных норм минеральных удобрений, исходя из планируемой урожайности биомассы кукурузы 35 т/га.

Известкование и фосфоритование кислых темно-серых и серых лесных почв в сочетании с применением NPK обеспечивает повышение валового сбора кормовых единиц в кукурузном силосе с 4.22 до 6.13 и 3.34 до 5.86 т/га соответственно, и снижение себестоимости на 1.4–2.0 тыс. руб./т кормовых единиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азиева Г.Н., Нижегородцева Л.С., Диабанкана Р.Ж.К., Абрамова А.А., Сафин Р.И., Хисматуллин М.М. Приемы повышения эффективности применения биологических препаратов в растениеводстве // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 4(60). С. 5–9.
2. Вафин Ф.Р., Бикчантаев И.Т., Шакиров Ш.К., Балакирев Н.А. Эффективность применения различных биологических препаратов при силосовании кукурузы // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2018. С. 77–83.

3. *Иванов А.Л.* Научно-технологическое развитие землепользования с использованием цифровых технологий в земледелии // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 522–524.
4. *Иванов А.Л., Кулинцев В.В., Дридигер В.К., Белобров В.П.* О целесообразности освоения системы прямого посева на черноземах России // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 4. С. 8–16.
5. *Иванов А. Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185–202. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).
6. *Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Интегральная цифровая платформа: “Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ” / Отв. редакторы С.А. Шоба, И.Ю. Савин, Е.М. Лаптева // Почвы – стратегический ресурс России: Материалы пленарных докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Часть 1. Москва-Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2022. С. 105–109.
7. *Крупин Е.О., Шакиров Ш.К., Казеева Н.А.* Тенденции изменения энергетической и протеиновой питательности силоса кукурузного в Республике Татарстан // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2021. Т. 246. № 2. С. 107–111.
8. *Лукманов А.А.* Ресурсный потенциал выщелоченных чернозёмов Среднего Поволжья. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. 266 с.
9. *Миннуллин Г.С., Вафина Л.Т., Сафиоллин Ф.Н.* Химический состав и питательность кормов из многолетних трав в зависимости от фона минерального питания и сроков их уборки // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2011. Т. 6. № 1(19). С. 160–162.
10. *Сафиоллин Ф.Н., Миннуллин Г.С., Хисматуллин М.М., Сочнева С.В.* Фоны минерального питания люцерновых агроценозов и урожайность последующей культуры полевого севооборота – яровой пшеницы ЭКАДА 70 на серых лесных почвах Республики Татарстан // Зерновое хозяйство России. 2017. № 2(50). С. 29–33.
11. *Сотченко Ю.В., Сотченко В.С., Шайтанов О.В., Хуснуллин М.И.* Промежуточные итоги испытаний перспективных селекционных образцов кукурузы для условий Республики Татарстан, 2012–14 гг. // Нива Татарстана. 2017. № 1–2. С. 33–36.

12. *Таланов И.П., Михайлова М.Ю., Каримова Л.З.* Отзывчивость гибридов кукурузы на внесения расчетных доз минеральных удобрений в условиях Предволжья РТ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 2(36). С. 123–127.
13. *Хисматуллин М.М.* Агроэнергетическая и экономическая эффективность поверхностного улучшения пойменных лугов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2010. Т. 5. № 1(15). С. 120–122.
14. *Хисматуллин М.М., Валиев А.Р., Хисматуллин М.М., Мухаметгалиев Ф.Р., Асадуллин Н.М., Уллах Р.* Противозерозионная мелиорация в Республике Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 2(66). С. 47–54.
15. *Хисматуллин М.М., Хисматуллин М.М., Сафиоллин Ф.Н.* Практические приемы частичной замены минеральных удобрений листовой подкормкой многолетних трав на серых лесных почвах Среднего Поволжья // Кормопроизводство. 2019. № 7. С. 12–18.
16. *Чекмарев П.А., Фомин В.Н., Турнин С.Д.* Влияние сорта и удобрений на урожайность кукурузы при возделывании на зерно // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 9. С. 22–24.
17. *Шайтанов О.Л., Тагиров М.Ш., Каримов Х.З.* Итоги экологических испытаний новых гибридов кукурузы в экстремальных условиях 2017 г. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13. № 4(51). С. 96–102.
18. *Шакиров Ш.К., Шайтанов О.В., Хазипов Н.Н.* Кукуруза: технология выращивания, консервирования, хранения, переработки и использования в молочном скотоводстве РТ. Казань: ООО “Центр инновационных технологий”, 2017. 104 с.
19. *Яхин И.Ф., Габитов Р.Х., Хисматуллин М.М., Трофимов Н.В.* Влияние расчетных норм минеральных удобрений на урожайность орошаемой кормовой кукурузы на серых лесных почвах Республики Татарстан // Агробιοтехнологии и цифровое земледелие. 2022. Т. 1. № 4(4). С. 45–50.
20. *Vafina L.T., Safiollin F.N.* Comparative evaluation of productivity of ryegrass and ryegrass-goatling grass stands affected by different mineral and organomineral nutrition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Pric. Conf. AgroCON-2019. 2021. ID 012109.

## REFERENCES

1. *Agieva G.N., Nizhegorodtseva L.S., Diabankana R.Zh.K., Abramova A.A., Safin R.I., Khismatullin M.M., Priemy povysheniya effektivnosti primeneniya biologicheskikh preparatov v rastenievodstve (Methods for*

increasing the efficiency of the application of biological pesticides in crop management), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2020, Vol. 15, No. 4(60), pp. 5–9.

2. Vafin F.R., Bikchantaev I.T., Shakirov Sh.K., Balakirev N.A., *Effektivnost' primeneniya razlichnykh biologicheskikh preparatov pri silosovanii kukuruzy* (Efficiency of application of various biological preparations at corn silage), *Veterinariya, zootekhnika i biotekhnologiya*, 2018, pp. 77–83.

3. Ivanov A.L., Scientific-technological development of land use on the basis of digital technologies in agriculture, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89, No. 5, pp. 199–200.

4. Ivanov A.L., Kulintsev V.V., Dridiger V.K., Belobrov V.P., Feasibility of a direct sowing system on the Russian chernozems, *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*, 2021, Vol. 35, No. 4, pp. 8–16.

5. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., The Initiative “4 per 1000” – a new global challenge for the soils of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 185–202, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).

6. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Integral'naya tsifrovaya platforma: “Pochvennye resursy sel'skokhozyaistvennykh ugodii RF” (Integral digital platform: “Soil resources of agricultural lands of the Russian Federation”), In: S.A. Shoba, I.Yu. Savin, E.M. Lapteva (Eds) *Pochvy – strategicheskii resurs Rossii* (Soils are the strategic resource of Russia), Proc. of the VIII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev and School of young scientists on morphology and classification of soils. Part 1. Moscow–Syktyvkar: Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS, 2022, pp. 105–109.

7. Krupin E.O., Shakirov Sh.K., Kazeeva N.A., Trends of change in energy and protein value of corn silage in the Republic of Tatarstan, *Scientific notes, Kazan Bauman State Academy of veterinary medicine*, 2021, Vol. 246, No. II, pp. 107–111.

8. Lukmanov A.A., *Resource potential of leached chernozem of Middle Volga region*. Kazan: Kazan State Agrarian University, 2021, 266 p.

9. Minnullin G.S., Vafina L.T., Safiollin F.N., Khimicheskii sostav i pitatel'nost' kormov iz mnogoletnikh trav v zavisimosti ot fona mineral'nogo pitaniya i srokov ikh uborki (Chemical composition and nutritiveness of forages from perennial grasses depending on the background of mineral nutrition and the timing of their harvesting), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2011, Vol. 6, No. 1(19), pp. 160–162.

10. Safiollin F.N., Minnullin G.S., Khismatullin M.M., Sochneva S.V., Fony mineral'nogo pitaniya lyutsernovykh agrotsenozov i urozhaistost'

posleduyushchei kul'tury polevogo sevooborota – yarovoi pshenitsy EKADA 70 na serykh lesnykh pochvakh Respubliki Tatarstan (Backgrounds of mineral nutrition of alfalfa agrocenosis and yield of the subsequent crop in field rotation – spring wheat ECADA 70 on gray forest soils of the Republic of Tatarstan), *Zernovoe khozyaistvo Rossii*, 2017, No. 2(50), pp. 29–33.

11. Sotchenko Yu.V., Sotchenko V.S., Shaitanov O.V., Khusnullin M.I., Promezhutochnye itogi ispytaniy perspektivnykh selektsionnykh obraztsov kukuruzy dlya uslovii Respubliki Tatarstan, 2012–14 gg. (Intermediate results of tests of promising breeding samples of corn for the conditions of the Republic of Tatarstan, 2012–2014), *Niva Tatarstana*, 2017, No. 1–2, pp. 33–36.

12. Talanov I.P., Mikhailova M.Yu., Karimova L.Z., Otzyvchivost' gibridov kukuruzy na vneseniya raschetnykh doz mineral'nykh udobrenii v usloviyakh Predvolzh'ya RT (Responsiveness of corn hybrids to the introduction of calculated doses of mineral fertilizers under the conditions of Predvolga region of RT), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2015, Vol. 10, No. 2(36), pp. 123–127.

13. Khismatullin M.M., Agroenergeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost' poverkhnostnogo uluchsheniya poimennykh lugov (Agro-energetic and economic efficiency of surface improvement of floodplain meadows), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2010, Vol. 5, No. 1(15), pp. 120–122.

14. Khismatullin M.M., Valiev A.R., Khismatullin M.M., Mukhametgaliev F.R., Asadullin N.M., Ullakh R., Protivoerozionnaya melioratsiya v Respublike Tatarstan (Erosion control reclamation in the Republic of Tatarstan), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2022, Vol. 17, No. 2(66), pp. 47–54.

15. Khismatullin M.M., Khismatullin M.M., Safiollin F.N., Partial substitution of mineral fertilizers by foliar preparations for perennial grasses on gray forest soil in the Middle Volga region, *Kormoproizvodstvo*, 2019, No. 7, pp. 12–18.

16. Chekmarev P.A., Fomin V.N., Turnin S.D., Influence of variety and fertilizers on corn productivity at cultivation for grain, *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*, 2017, Vol. 31, No. 9, pp. 22–24.

17. Shaitanov O.L., Tagirov M.Sh., Karimov Kh.Z., Itogi ekologicheskikh ispytaniy novykh gibridov kukuruzy v ekstremal'nykh usloviyakh 2017 g. (Results of ecological tests of new corn hybrids under extreme conditions in 2017), *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2018, Vol. 13, No. 4(51), pp. 96–102.

18. Shakirov Sh.K., Shaitanov O.V., Khazipov N.N., Kukuruza: tekhnologiya vyrashchivaniya, konservirovaniya, khraneniya, pererabotki i ispol'zovaniya v

*molochnom skotovodstve RT* (Corn: technology of growing, preserving, storage, processing and use in dairy cattle breeding in RT), Kazan': OOO "Tsentr innovatsionnykh tekhnologii", 2017, 104 p.

19. Yakhin I.F., Gabitov R.Kh., Khismatullin M.M., Trofimov N.V., Vliyanie raschetnykh norm mineral'nykh udobrenii na urozhainost' oroshaemoi kormovoi kukuruzy na serykh lesnykh pochvakh Respubliki Tatarstan (Effect of calculated rates of mineral fertilizers on the yield of irrigated fodder maize on gray forest soils of the Republic of Tatarstan), *Agrobiotekhnologii i tsifrovoe zemledelie*, 2022, Vol. 1, No. 4(4), pp. 45–50.

20. Vafina L.T., Safiollin F.N., Comparative evaluation of productivity of ryegrass and ryegrass-goatling grass stands affected by different mineral and organomineral nutrition, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*: Pric. Conf. AgroCON-2019, 2021, ID 012109.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института  
имени В.В. Докучаева

Выпуск 115

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Почвенный институт имени В.В. Докучаева  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2  
<https://bulletin.esoil.ru>  
e-mail: [bulletin@esoil.ru](mailto:bulletin@esoil.ru)

Сдано в набор 25.03.20223 г.  
Подписано в печать 25.03.2023 г.  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 13,1 Тираж 75 экз. Заказ №

Цена договорная.

Отпечатано с готового макета по заказу  
Почвенного института имени В.В. Докучаева  
ИП Ерховой И.М. (ОГРНИП 319774600080241)  
Тел. (495) 799-48-85  
e-mail: [apr-rpa@list.ru](mailto:apr-rpa@list.ru)