

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 116

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 116

**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

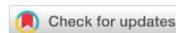
Задачи оптимизации землепользования в России <i>Кирюшин В.И.</i>	5
Трансформация почвенного покрова при прокладке высоковольтной линии электропередач <i>Захарова М.К., Моргач Ю.Р. Сухачева Е.Ю.</i>	26
Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения <i>Доброхотов А.В., Козырева Л.В.</i>	43
Оценка барьерной функции чернозема и серой почвы в рамках экспериментального загрязнения ионами меди <i>Иовчева А.Д., Семенов И.Н.</i>	76
Влияние кремнийорганического адсорбента на содержание подвижных форм тяжелых металлов и рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом и медью <i>Скурихина П.Д.</i>	109
Таксономическая и функциональная характеристика ксеротолерантного культивируемого прокариотного сообщества серозема пустыни Негев <i>Белов А.А., Четцов В.С.</i>	129
Винодельческий терруар – ориентир при выборе сортов подвоев винограда для почв с разными характеристиками <i>Аверьянов А.А., Андросова Е.Д., Русаков А.В.</i>	155

CONTENTS

The goals of land use optimization in Russia <i>Kiryushin V.I.</i>	5
Soil cover transformation after the laying of a high-voltage power line <i>Zakharova M.K., Morgach Yu.R., Sukhacheva E.Yu.</i>	26
Influence of the biochar application on the thermal properties of soddy-podzolic soil and on the energy balance fluxes of spring wheat in the Leningrad region under various soil moisture conditions <i>Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V.</i>	43
Assessment of the barrier function of Chernozem and Luvisol under their experimental contamination by copper ions <i>Iovcheva A.D., Semenov I.N.</i>	76
Effect of organosilicon adsorbent on the content of mobile forms of heavy metals and growth of test-crop under conditions of soil contamination with lead and copper <i>Skurikhina P.D.</i>	109
Taxonomic and functional characteristics of xerotolerant culturable bacterial community of Negev desert soil <i>Belov A.A., Cheptsov V.S.</i>	129
Winemaking terroir – the guideline for choosing of grape rootstocks for soils with different characteristics <i>Averianov A.A., Androsova E.D., Rusakov A.V.</i>	155

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-5-25



Ссылки для цитирования:

Кiryushin В.И., Задачи оптимизации землепользования в России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 5-25. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-5-25

Cite this article as:

Kiryushin V.I., The goals of land use optimization in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 5-25, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-5-25

Задачи оптимизации землепользования в России¹

© 2023 г. В. И. Кiryushin

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

<https://orcid.org/0000-0002-3766-1932>, e-mail: vkiryushin@rambler.ru.

Поступила в редакцию 02.01.2023, принята к публикации 27.06.2023

Резюме: Земельная реформа 90-х годов создала определенные экономические и экологические предпосылки для эффективного землепользования. Однако они не реализуются вследствие полной либерализации рынка и устраненности государства от управления земельными ресурсами, прекращения государственного землеустройства. Как исходное условие упорядочения землепользования и дальнейших преобразований рассматриваются корректировка экономического курса и стратегическое планирование. В качестве инструментария планирования предлагается внедрение региональных моделей агропромышленного производства в развитие ранее практиковавшихся систем ведения сельского хозяйства на основе разработки региональных ГИС агроэкологической оценки земель и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в М 1 : 100 000. Для этого разработана система комплексной оценки земель, обобщен опыт землеустроительного проектирования, ландшафтного планирования и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия. На основе

¹ Опубликовано по материалам ЧЕТВЕРТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ ОТКРЫТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “ПОЧВЕННЫЕ И ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ: СОСТОЯНИЕ, ОЦЕНКА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ” (к 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева).

его интеграции предполагается развитие нового землеустройства на ландшафтной основе, а в дальнейшем проектирование сельскохозяйственных ландшафтов.

Ключевые слова: земельные ресурсы, стратегическое планирование, адаптивно-ландшафтные системы земледелия, землеустройство, проектирование сельскохозяйственных ландшафтов.

The goals of land use optimization in Russia¹

© 2023 V. I. Kiryushin

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-3766-1932>, e-mail: vkiryushin@rambler.ru.*

Received 02.01.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The land reform of the 1990s created certain economic and environmental prerequisites for efficient land use. However, they are not implemented due to the complete liberalization of the market and the disengagement of the State from land management, the termination of state land administration. Adjustment of the economic course and strategic planning are considered as the initial condition for land use rationalization and further transformations. As a planning tool, it is proposed to implement regional models of agro-industrial production in development of previously used agricultural management systems based on the development of regional GIS for agroecological land assessment and projecting of adaptive landscape farming systems in M 1 : 100 000. For this purpose, a system of integrated land assessment has been developed, and the experience of land administration projecting, landscape planning, and projecting of adaptive landscape farming systems has been generalized. On the basis of its integration, it is planned to develop new land administration on a landscape basis, and, subsequently, agricultural landscapes projecting.

Keywords: land resources, strategic planning, adaptive landscape farming systems, land administration, agricultural landscapes projecting.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема рационального использования земельных ресур-

¹ *Proceedings of the IV RUSSIAN OPEN CONFERENCE “SOIL AND LAND RESOURCES: SOILS STATUS, ASSESSMENT, UTILISATION” (dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute).*

сов страны, в значительной мере подвергшихся различным процессам деградации, становится главным приоритетом. Решение этой проблемы было одной из задач земельной реформы 90-х годов, которая должна была положить конец шаблонной эксплуатации земель и обеспечить переход к биосферной парадигме природопользования. Обретенная крестьянами в результате реформы частная собственность на землю и средства производства, соответственно, заинтересованность в результатах своего труда, и отношения рынка создали предпосылки для развития новой экономики. К сожалению, эти экономические свободы не были в должной мере реализованы из-за экспансии и эйфории фетишизированного рынка. Либеральная политика, ориентированная на свободный рынок, повела сельское хозяйство в новый тупик, в противоположную крайность. Государственный диктат сменился неуправляемостью, усугубилась социально-демографическая и экологическая обстановка, поскольку рынок определяет только отношения прибыли. В результате отказа от государственного землеустройства и регулирования землепользования ухудшилась эколого-экономическая обстановка, массово проявляются всевозможные пороки – парцеляризация земель, дальнотелье, чересполосица, вкрапления, вклинивания и др. Причины земельного неблагополучия выстраиваются в длинный ряд:

- Отсутствие адекватной государственной земельной политики и механизмов ее реализации.
- Бессистемность в решении задач земельной реформы.
- Отсутствие единого органа государственной власти по управлению земельными ресурсами.
- Неурегулированность земельных отношений.
- Отсутствие системы планирования использования и охраны земель.
- Правовая неупорядоченность сельскохозяйственного природопользования.
- Латифундизм. Концентрация субсидий и дотаций в холдингах.
- Отсутствие ограничений размеров земельных участков в собственности.
- Неоформленность и невостребованность значительной ча-

сти долевой собственности граждан.

- Игнорирование ресурсно-комплексного подхода к развитию сельских территорий в процессе земельных трансформаций.
- Отсутствие информации о качественном состоянии, правовом статусе, местоположении используемых сельскохозяйственных угодий.
- Незаконное расходование средств от земельных платежей, предназначенных для земельных преобразований.

Сложилась необходимость создания новой социально-экономической системы. К сожалению, государство в данном отношении пока не определилось. Лозунг минимизации участия государства в управлении экономикой остается. В науке разброс позиций находится в диапазоне от либерализма до реставрации социализма. Отсюда неопределенность государственной аграрной политики или ее отсутствие.

Представляется, что задачи развития АПК и механизмы его управления должны решаться как часть проблемы оптимизации сельскохозяйственного природопользования по экологическим и экономическим условиям на основе рыночных отношений, регулируемых государственной политикой. Инструменты регулирования должны разрабатываться как компромиссы трудносогласующихся отношений рынка и государства в социально-экономической политике, интенсификации и экологизации производства, в агротехнологической политике. Непременным условием решения этой проблемы является упорядочение землепользования и создание условий для оптимизации использования земельных ресурсов. Для этого имеются необходимые предпосылки, созданные земельной реформой: многоукладное землепользование, многообразие форм собственности, платное землепользование, развитие оборота земельных участков. Задача в том, чтобы включить государственные механизмы регулирования земельных отношений и рынка.

ОБОСНОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ЗЕМЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ

Представляется необходимой корректировка экономическо-

го курса в плане регулирования рыночных отношений, нахождения компромиссов между рынком и государственным регулированием экономики, развитие стратегического и индикативного планирования. Мировой опыт, а теперь уже и отечественный, свидетельствует о необходимости более активного участия государства в регулировании экономики, начиная с организации стратегического планирования, требующего адекватного институционального и нормативно-правового обеспечения. Основой последнего является Федеральный закон от 28 июня 2014 г № 172 – ФЗ “О государственном стратегическом планировании в Российской Федерации”. В организации стратегического планирования необходимы: сопряженность его по вертикали (федеральный, региональный и муниципальный уровни), координация стратегий и планов как отраслевого, так и территориального развития на всех уровнях управления, определение сети специализированных институтов развития. Одним из центральных элементов системы стратегического планирования и его нормативно-правового обеспечения является разработка долгосрочной стратегии аграрной политики и определение задач среднесрочного и краткосрочного характера. Стратегическое планирование должно выступать в качестве интегратора государственных программ и проектов отраслевого и регионального уровня.

С учетом задач экологизации сельскохозяйственного производства стратегическое сельскохозяйственное планирование должно включать обоснование рационального природопользования, в том числе: определение природно-ресурсного потенциала регионов; варианты специализации производства; возможные уровни интенсификации производства и ограничения; экологические риски; демографические и социально-инфраструктурные условия; конфликты природопользования. В системе мер по совершенствованию пространственной организации сельского хозяйства особо выделяются создание высокотехнологичных специализированных зон по производству отдельных видов сельскохозяйственной продукции, развитие межрегионального обмена, ликвидация замыкания производственного сектора на уровне отдельного региона.

Роль государства особенно возрастает в разрешении эколо-

гических противоречий природопользования. Все чаще высказывается мнение, что формирование управленческой парадигмы устойчивого развития России возможно только на уровне государственного управления.

В качестве инструментария регулирования аграрной экономики целесообразна разработка региональных моделей агропромышленного производства. Эта проблема имеет поучительную предысторию в виде региональных систем ведения сельского хозяйства ([Системы ведения..., 1999](#)). В советское время регулярно издававшиеся для каждой области книги под таким названием отражали государственную аграрную политику в региональном ее преломлении с учетом местных природных и производственных условий. Эти документы, в разной степени детализированные, служили руководством для организации сельскохозяйственного производства на уровне крупных административных подразделений. В качестве методологии формирования систем агропромышленного производства была предложена разработка моделей хозяйствования на всех уровнях от предприятия до областного и республиканского АПК. К сожалению, эта работа была вытеснена иллюзиями либеральной экономики. Теперь она должна получить развитие на новой основе. Создание таких моделей должно стать основной задачей зональных НИИ по сельскому хозяйству и сельскохозяйственных ВУЗов под методическим руководством головных институтов.

При этом следует разработать методическое руководство по формированию этих моделей с учетом современных условий и на альтернативной основе, чтобы товаропроизводители могли выбирать мотивированные решения по земледелию, животноводству, переработке сельскохозяйственной продукции и структурной организации этих производств.

Региональные системы агропромышленного производства должны включать:

1. Оценку природных ресурсов сельского хозяйства.
2. Обоснование специализации производства.
3. Системы земледелия и животноводства.
4. Обоснование мелиорации земель.
5. Обоснование системы машин для сельского хозяйства.

6. Переработка сельскохозяйственной продукции.
7. Формирование продовольственных рынков.
9. Развитие кооперации.
10. Охрана природы.
11. Научное, инновационное и образовательное обеспечение.

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ И ЭКОНОМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ

Управление земельными ресурсами включает прогнозирование, планирование и проектирование использования земель. Прогнозирование как этап, предшествующий планированию, имеет целью создание научных предпосылок для принятия плановых решений и включает:

- природно-сельскохозяйственное районирование;
- экологическое, экономическое, социальное, демографическое районирование;
- обоснование региональных агрокомплексов, систем земледелия и животноводства по зональным провинциям;
- прогноз изменения агроклиматических условий, климатических рисков, их вероятности;
- прогноз развития материально-технической базы сельского хозяйства;
- прогноз экологизации и интенсификации сельского хозяйства.

В виде особого методического руководства должны разрабатываться региональные АгроГИС по оценке земель и проектированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий в М 1 : 100 000 вместо традиционных книг “Зональные системы земледелия”, затем “Адаптивно-ландшафтные системы земледелия”. АгроГИС должна включать:

1. Природно-сельскохозяйственное районирование, создание тематических электронных карт (геоморфологии, литологии, гидрогеологии, почвенного покрова, свойств почв, эрозии и др.) и ин-

тегральные карты агроэкологических групп земель, М 1 : 100 000.

2. Агроэкологическое обоснование группировки земель.

3. Разработка адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ) с пакетами агротехнологий.

4. Обоснование мелиораций.

5. Разработка реестров видов земель и их продуктивности.

6. Создание регистров агротехнологий.

7. Создание реестров сортов сельскохозяйственных культур.

На основании прогнозных материалов осуществляется планирование использования земель, в частности: определение состава и структуры организационно-территориальных, земельно- и природоохранных мероприятий; территориальная привязка всей системы организационно-территориальных и природоохранных мероприятий; развитие инфраструктуры земельного рынка; упорядочение землевладений и землепользований.

На основе этих материалов проводится земельное проектирование, которое включает:

- образование новых землепользований, преобразование существующих землепользований;
- организация и устройство угодий;
- проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия;
- размещение производственных центров, магистральных, внутрихозяйственных дорог;
- организация и размещение природоохранных мероприятий.

ОЦЕНКА ЗЕМЕЛЬНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АГРОПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА РОССИИ

Центральной задачей этого направления является развитие комплексной оценки земель, удовлетворяющей задачам планирования сельскохозяйственного производства; проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий; защитного лесоразведения; решения кадастровых, селитебных, рекреационных и других задач.

К сожалению, она оказалась самым узким местом в современной науке и практике. Дело в том, что существующая оценка земель безнадежно устарела и уходит в прошлое вместе с экстенсивным земледелием, которому она кое-как соответствовала. Она сводилась к бонитировке почв, затем к почвенно-экологическим индексам и другим условным показателям. Возможности применения бонитировки почв ограничиваются ареалами экстенсивного земледелия, условностью показателей и поправочных коэффициентов, слабой интегрированностью почвенных характеристик с другими агроэкологическими условиями. До сих пор довольно часто используется почвенно-экологические индексы, начиная с ПЭИ И.И. Карманова ([Карманов, Фриев, 1982](#)). Существует множество его модификаций, но все они весьма условны.

Современная комплексная оценка земель, отвечающая задачам землеустройства, планирования землепользования, формирования систем земледелия и агротехнологий, систем животноводства, защитного лесоразведения, мелиорации, природоохранной деятельности, кадастровым целям, сложилась в процессе разработки, проектирования и освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия и наукоемких агротехнологий ([Кирюшин и др., 2021](#)). Алгоритм ее представлен на рисунке 1.

Она рассматривается в иерархии: природно-сельскохозяйственная зона – провинция – группа земель – вид земель – культура – продуктивность – экономика.

На уровне провинции рассматривается система агроклиматической оценки с учетом динамики изменений климата. В ней должны быть представлены данные динамики лимитирующих метеорологических условий по фазам онтогенеза основных культур, чтобы можно было установить, какой лимитирующий фактор в какую фазу онтогенеза активно влияет на формирование продуктивности, закладка которого происходит в эту фазу. В России дополнительное тепло означает возможность расширения земледельческих территорий на север и повышение интенсификации земледелия в таежно-лесной зоне и в северной лесостепи. Учитывая, что повышение температур в разной мере сопровождается увеличением осадков, важно районировать территорию, особенно в южной лесостепи и северной степи, по приросту осадков.

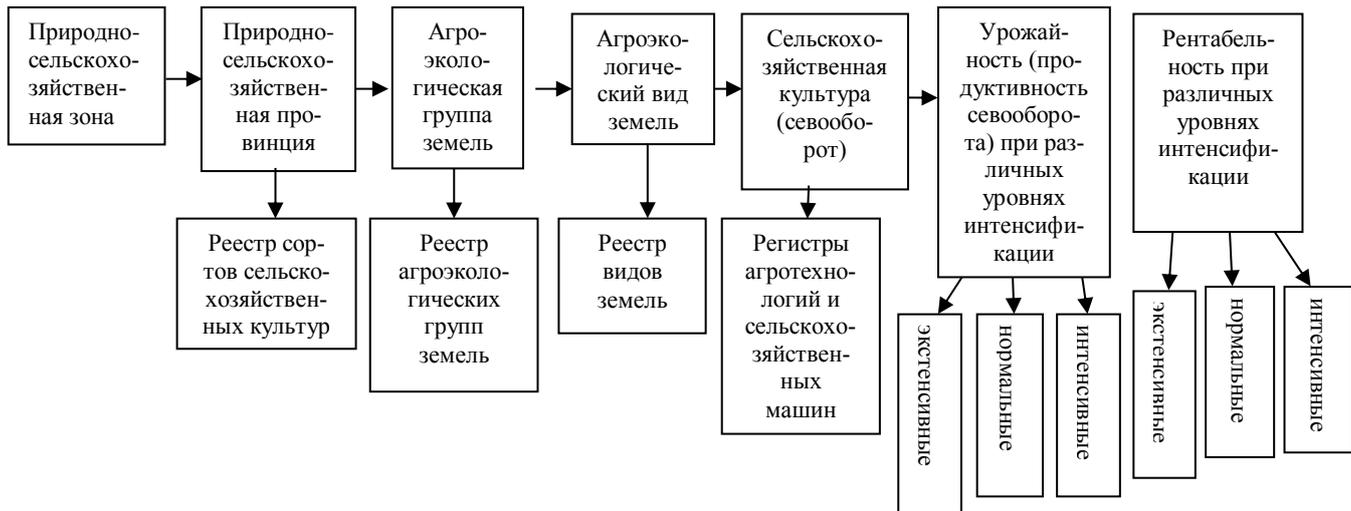


Рис. 1. Алгоритм комплексной оценки сельскохозяйственных земель.
Fig. 1. Algorithm of complex assessment of agricultural lands.

Оценка агроэкологических групп земель производится для обоснования структуры угодий, проектирования севооборотов, противоэрозионной и мелиоративной организации территории, проектирования лесозащитных мероприятий, экологических каркасов территории и в целом для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Оценка агроэкологического вида земель осуществляется по требованиям к агротехнологиям. Наряду с агроэкологическими параметрами вид земель характеризуется продуктивностью при экстенсивном, нормальном и интенсивном уровне и экономическими показателями. Видам земель соответствуют определенные агротехнологии, которые группируются в региональные регистры агротехнологий, и сорта культур, которые представляются в форме зонально-провинциальных реестров сортов. Требуется развитие инструментария комплексной оценки земель и создание региональных баз данных.

РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

В России эта проблема представлена тремя направлениями: землеустроительное проектирование, ландшафтное планирование, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия. В силу ряда причин эти направления сложились обособленно, независимо друг от друга. Большая часть сельскохозяйственной территории страны не обеспечивается никаким планированием и находится во власти рынка. Остро назрела необходимость сформировать общую методологию территориального планирования и проектирования на основе интеграции этих направлений, тем более что они являются взаимодополняющими по отношению друг к другу.

Наиболее давним из них является землеустроительное проектирование, включавшее:

- генеральную схему землеустройства территории;
- схемы землеустройства республик, краев, областей;
- проекты межхозяйственного землеустройства;
- проекты внутрихозяйственного землеустройства;

– рабочие проекты использования и охраны земель.

Теоретически, с агроэкологических позиций, эта схема выглядит безукоризненной. Но фактически землеустройство было инструментом директивной плановой государственной политики с ее унитарностью. Поэтому наряду с важными функциями по организации территории советское землеустройство тиражировало шаблоны. В период либеральной реформы все государственные службы, в том числе землеустроительная, были ликвидированы.

Службу отменили, а функции территориального, экономического, правового и природоохранного регулирования остались (табл. 1). Существенным недостатком землеустройства была весьма слабая приуроченность к условиям ландшафта. В 90-х годах определились работы по экологизации землеустройства. В работах М.И. Лопырева ([Лопырев, 1995](#)), С.Н. Волкова ([Волков, 2002–2009](#)) и др. определились ландшафтные подходы к организации и проектированию землепользования. В целом землеустройство медленно разворачивалось в этом направлении, вместо того чтобы возглавить его. Вперед вышли направления ландшафтного планирования и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Попытка устранения “ландшафтной недостаточности” была предпринята в системе академических институтов и классических университетов.

В начале нулевых годов Институтом географии, его Иркутским филиалом совместно с немецкими специалистами была организована работа по ландшафтному планированию, которая в дальнейшем получила развитие в классических университетах ([Ландшафтное планирование..., 2006](#)). За основу была взята немецкая модель. В задачу ландшафтного планирования входило определение ценности земель, выделение территорий с различными формами использования, режимами охраны; сохранение функций ландшафта как основы жизнеобеспечения; определение его состояния, обеспечивающего оптимальное качество жизни и устойчивое развитие территории.

Таблица 1. Функции землеустройства
Table 1. Functions of the land management system

Территориальное регулирование	Экономическое регулирование	Административно-правовое регулирование	Природоохранное регулирование
Агроэкологическая и кадастровая оценка и типология земель	Обоснование отраслей и специализации производства	Обеспечение гарантий конституционных прав на землю	Агроэкологический мониторинг земель
Инвентаризация земель	Обоснование и планирование социальной инфраструктуры	Обеспечение целевого использования земель и правового режима	Организация экологического каркаса
Ведение государственного земельного кадастра	Система платежей и налогов на землю	Контроль за использованием и оборотом земель	Обеспечение экологической устойчивости агроландшафтов
Планирование, проектирование и организация использования земель	Регулирование земельных отношений	Мониторинг использования земель	Экологическая экспертиза землеустроительных проектов.
Обоснование размещения объектов производственной и социальной сферы			

По результатам изысканий разрабатывались ландшафтные программы для территорий субъектов РФ, рамочные ландшафтные планы для административных районов и крупномасштабные планы для низших подразделений. Это направление как самостоятельная форма не сложилось, хотя в некоторых областях появился определенный опыт.

Параллельно с ландшафтным планированием в системе аграрных НИИ и сельхозвузов развивалось адаптивно-ландшафтное земледелие, инициированное Докучаевской сессией Россельхозакадемии и сессией ООН 1992 г. Оно отличалось четкой направленностью в экологическом и социально-экономическом пространстве и конкретными практическими достижениями.

В частности, в Белгородской области в результате их освоения на большей ее части средняя урожайность зерновых за 10 лет возросла с 3 т/га до 5т/га ([Савченко и др., 2022](#)).

Очевидно, интеграция этих трех направлений должна послужить развитию нового землеустройства, земельного планирования и проектирования на четырех территориальных уровнях (табл. 2). На уровне вида земель должны разрабатываться проекты наукоемких агротехнологий, применительно к группам земель – проекты внутрихозяйственного землеустройства, включающие адаптивно-ландшафтные системы земледелия, на уровне зональных провинций – проекты межхозяйственного землеустройства, на уровне природно-сельскохозяйственной зоны, региона – схемы землеустройства субъектов РФ. Такова методология перевода землеустройства на ландшафтную основу, требующая соответствующего инструментария и развития.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ КАК НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Прошло 30-лет с начала разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Таблица 2. Иерархия проектирования сельскохозяйственных ландшафтов в системе землеустройства
Table 2. Hierarchy of agricultural landscape design in the land management system

Территориальный уровень	Объект проектирования	Категория сельскохозяйственного ландшафта	Почвенный покров	Инструментарий проектирования	Форма землеустройства
Агроэкологические виды земель	Агротехнологии	Элементарные ареалы агроландшафта	Элементарные ареалы и микроструктуры ПП	Реестры агроэкологических видов земель	Рабочие проекты
Агроэкологические группы земель	Адаптивно-ландшафтные системы земледелия, мелиоративные системы, и др.	Агроландшафты, водохозяйственные, мелиоративные, животноводческие и др.	Мезоструктуры ПП	Ландшафтно-экологический анализ территории	Проекты внутрихозяйственного землеустройства
Зональные провинции	Зонально-провинциальные агрокомплексы	Зонально-провинциальная система с.х. ландшафтов,	Фациальные подтипы почв	Региональная ГИС агроэкологической оценки земель и проектирования	Проекты межхозяйственного землеустройства

Сложился определенный опыт их проектирования и освоения. Значительный прорыв на региональном уровне достигнут в Белгородской области, где проекты АЛСЗ разработаны агрохимической службой и освоены на большей части области ([Белгородская модель..., 2019](#)). Дальнейшее совершенствование систем земледелия связано с углублением его ландшафтной дифференциации, противоэрозионной и мелиоративной организации территории. В развитии методологии противоэрозионного проектирования целесообразно использование моделей позиционно-динамической, парагенетической и бассейновой структур в интерпретации Г.И. Швецба ([Методические указания..., 1990](#); [Швецб, 1988](#)). Регулирование энергомассопереноса, в особенности поверхностного и грунтового твердого, жидкого и ионного стока в ландшафте выходит за пределы агросистемы. Соответственно проблема адаптивно-ландшафтного земледелия перерастает в проблему проектирования сельскохозяйственных ландшафтов, включая агроландшафты, животноводческие, водохозяйственные, лесохозяйственные, селитебные и др. ([Кирюшин, 2018](#)). Формирование их должно осуществляться в экологических каркасах территории, интегрированных с полевой инфраструктурой.

Конструирование сельскохозяйственных ландшафтов означает направленное изменение их функций, то есть преобразование в той или иной мере экологических функций в социально-экономические. В качестве инструментария проектирования сельскохозяйственных ландшафтов предложены: система оценки и группировки экологических функций ландшафта, структурно-функциональный анализ ландшафта, идентификация и оценка ландшафтных связей; обоснование и группировка социально-экономических функций ландшафта ([Кирюшин, 2018](#)).

В числе задач по оптимизации сельскохозяйственного природопользования определяющее значение имеет создание ландшафтно-экологической структуры, обеспечивающей оптимальные условия энергомассопереноса, поддержание биоразнообразия и экологическую стабильность территории. Эта задача заключается в создании экологических каркасов территории (ЭКТ), максимально сопряженных с полевой инфраструктурой.

Как показывает мировой и отечественный опыт, достижение максимальной экологической стабильности территории достигается при такой организации ЭКТ, основу которой составляют: базовые резерваты (заповедники, заказники, природные парки, леса первой и второй групп); связывающие их экологические коридоры (долины рек, полосные леса на водоразделах, зеленые коридоры транспортной инфраструктуры, защитные лесополосы); буферные зоны (водоохранные, санитарно-защитные зоны, охранные зоны водосборов); локальные элементы (места обитания ценных видов, энтомологические микрозаказники, изолированные территории с регламентированным природопользованием); территории восстановления природы (деградированные сельхозугодья, овражно-балочный комплекс). Особое природоохранное и одновременно агрономическое значение имеет создание микроразмерных объектов охраны птиц, шмелей, пчел, полезных энтомофагов.

Особую роль в структуре ЭКТ играют защитные лесонасаждения. В данном отношении в стране имеется немалый опыт, в том числе и неблагоприятный, связанный с шаблонами полезащитного лесоразведения. Проектирование полезащитных лесных полос безотносительно к рельефу часто приводило к развитию водной эрозии вдоль полос на склонах вследствие таяния сугробов, образованию мочаров. В результате плохого ухода, загущения и зарастания они нередко превращались в резерваты вредных организмов. Загущенные лесные полосы становятся непродуваемыми и собирают сугробы вместо равномерного распределения снега на поле. Такие полосы работают против земледелия. Требуется объективный анализ имеющегося опыта лесоразведения со времени сталинского плана преобразования природы и новейших достижений, с тем чтобы разработать новую методологию формирования лесных насаждений в системе ЭКТ. При этом приоритеты должны получить стокорегулирующие лесные полосы на пахотных склонах, прибалочные и приовражные, береговые, пескоукрепительные, приканальные, прифермские природоохранные защитные лесонасаждения. Формирование ЭКТ должно быть тесно сопряжено с развитием полевой и сенокосо-пастбищной инфраструктуры (расположение, размеры и конфигурация полей и производственных участков, полосное размещение посевов, растительные

кулисы и т. д.). В процессе упорядочения землепользования целесообразно расширение ООПТ за счет трансформации деградированных земель пашни, перелогов и залежей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Земельная реформа 90-х годов создала определенные экономические и экологические предпосылки для эффективного землепользования, однако они не реализуются в должной мере вследствие полной либерализации рынка и устранимости государства от управления земельными ресурсами, прекращения государственного землеустройства. Сложилась необходимость создания новой социально-экономической системы на принципах оптимизации сельскохозяйственного природопользования по экономическим и экологическим условиям на основании рыночных отношений, регулируемых государственной политикой.

Как исходное условие упорядочения землепользования и дальнейших преобразований рассматриваются корректировка экономического курса и стратегическое планирование. В качестве инструментария планирования предлагается формирование региональных моделей агропромышленного производства в развитие ранее практиковавшихся систем ведения сельского хозяйства на основе разработки региональных ГИС агроэкологической оценки земель и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в М 1 : 100 000. Для этого разработана система комплексной оценки земель, обобщен опыт землеустроительного проектирования, ландшафтного планирования и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия. На базе его интеграции предполагается развитие нового землеустройства на ландшафтной основе, а в дальнейшем проектирование сельскохозяйственных ландшафтов.

Для реализации этих задач требуется создание государственной сельскохозяйственной земельной службы, включающей следующие функции:

- агроэкологический мониторинг и инвентаризация земель;
- агроэкологическое районирование и агроэкологическая оценка земель;
- проектирование агроландшафтов, землеустройство;

- почвенно-ландшафтное картографирование, почвенно-мелиоративные изыскания;
- разработка проектов и технико-экономического обоснования адаптивно-ландшафтных систем земледелия;
- проектирование наукоемких агротехнологий;
- создание системы инновационно-технологического обеспечения земледелия;
- проектирование агролесомелиоративных, лесозащитных и других мелиоративных мероприятий;
- разработка агроэкологических регламентов землепользования и земледелия;
- разработка требований к образовательным программам по земледелию и землепользованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белгородская модель адаптивно-ландшафтного земледелия. Белгород: Константа, 2019. 273 с.
2. *Волков С.Н.* Землеустройство. М.: Колос, 2002–2009. Т. 1–9.
3. *Карманов И.И., Фриев Т.А.* Бонитировка почв на основе почвенно-экологических показателей // Почвоведение. 1982. № 5. С. 13–21.
4. *Кирюшин В.И.* Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. СПб.: ООО “Квадро”, 2018. 568 с.
5. *Кирюшин В.И., Дубачинская Н.Н., Юрова А.Ю.* Комплексная оценка сельскохозяйственных земель на примере Южного Урала // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1363–1375.
6. Ландшафтное планирование с элементами инженерной биологии / под ред. *А.В. Дроздова*. М.: КМК, 2006. 239 с.
7. *Лопырев М.И.* Основы агроландшафтоведения. Воронеж, 1995. 181 с.
8. Методические указания по ландшафтному исследованию для сельскохозяйственных целей / под ред. *Г.И. Швобса, П.Г. Шищенко*. М.: Изд-во РАСХН, 1990. 58 с.
9. *Савченко Е.С., Кирюшин В.И., Лукин С.В.* Опыт биологизации агротехнологий при освоении адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Белгородской области // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 6. (V. 65). С. 658–661.
10. Системы ведения агропромышленного производства (вопросы теории и практики) / *Г.А. Романенко, А.В. Вражнов, Н.К. Долгушкин* и др. М.: АгриПресс. 1999. 351 с.

11. Швебс Г.И. Концепция парагенетических ландшафтов и природопользования // География и практика науки. Л.: Наука, 1988. С. 107–120.

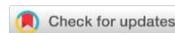
REFERENCES

1. *Belgorodskaya model' adaptivno-landshaftnogo zemledeliya* (Belgorod model of adaptive-landscape farming), Belgorod: Konstanta, 2019, 273 p.
2. Volkov S.N., *Zemleustroistvo* (Land management), Moscow: Kolos, 2002–2009, Vol. 1–9.
3. Karmanov I.I., Friev T.A., Bonitirovka pochv na osnove pochvenno-ekologicheskikh pokazatelei (Soil bonitisation on the basis of soil-ecological indicators), *Pochvovedenie*, 1982, No. 5, pp. 13–21.
4. Kiryushin V.I., *Ekologicheskie osnovy proektirovaniya sel'skokhozyaistvennykh landshaftov* (Ecological bases of designing agricultural landscapes), SPb.: ООО “Kvadro”, 2018, 568 p.
5. Kiryushin V.I., Dubachinskaya N.N., Yurova A.Yu., Kompleksnaya otsenka sel'skokhozyaistvennykh zemel' na primere Yuzhnogo Urala (Integrated assessment of agricultural land on the example of the Southern Urals), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1363–1375.
6. Drozdov A.V. (Ed.), *Landshaftnoe planirovanie s elementami inzhenernoi biologii* (Landscape planning with elements of engineering biology), Moscow: KMK, 2006, 239 p.
7. Lopyrev M.I., *Osnovy agrolandshaftovedeniya* (Fundamentals of agrolandscape science), Voronezh, 1995, 181 p.
8. Shvebs G.I., Shishchenko P.G., *Metodicheskie ukazaniya po landshaftnym issledovaniyam dlya sel'skokhozyaistvennykh tselei* (Methodological guidelines on landscape studies for agricultural purposes), Moscow: Izd-vo RASKhN, 1990, 58 p.
9. Savchenko E.S., Kiryushin V.I., Lukin S.V., Opyt biologizatsii agrotekhnologii pri osvoenii adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya v Belgorodskoi oblasti (Experience of biologisation of agro-technologies in the development of adaptive-landscape farming systems in Belgorod region), *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal*, 2022, No. 6, (Vol. 65), pp. 658–661.
10. Romanenko G.A., Vrazhnov A.V., Dolgushkin N.K. et al., *Sistemy vedeniya agropromyshlennogo proizvodstva (voprosy teorii i praktiki)* (Systems of conducting agro-industrial production (issues of theory and practice)), Moscow: AgriPress, 1999, 351 p.
11. Shvebs G.I., Kontseptsiya parageneticheskikh landshaftov i prirodopol'zovaniya (The concept of paragenetic landscapes and nature

management), In: *Geografiya i praktika nauki* (Geography and the practice of science), Leningrad: Nauka, 1988, pp. 107–120.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-26-42



Ссылки для цитирования:

Захарова М.К., Моргач Ю.Р. Сухачева Е.Ю. Трансформация почвенного покрова при прокладке высоковольтной линии электропередач // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 26-42. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-26-42

Cite this article as:

Zakharova M.K. Morgach Yu.R. Sukhacheva E.Yu., Soil cover transformation after the laying of a high-voltage power line, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 26-42, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-26-42

Трансформация почвенного покрова при прокладке высоковольтной линии электропередач¹

© 2023 г. М. К. Захарова^{1*}, Ю. Р. Моргач^{1**}, Е. Ю. Сухачёва^{2***}

¹Центральный музей почвоведения им. В.В. Докучаева – филиал ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия 199034, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, д. 6,

* <https://orcid.org/0000-0002-0856-018X>, e-mail: 123masha123@mail.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-2422-8638>, e-mail: tima204@yandex.ru.

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 9-11,

*** <https://orcid.org/0000-0003-3612-6265>, e-mail: lenasoil@mail.ru.

Поступила в редакцию 18.01.2023, после доработки 26.01.2023, принята к публикации 27.06.2023

Резюме: В настоящее время скорость антропогенных нарушений почвенного покрова значительно превышает скорость его естественного восстановления. В Ленинградской области, согласно современной цифровой почвенной карте масштаба 1 : 200 000, преобладают антропогенно-измененные подтипы естественных почв, образовавшиеся в результате хозяйственной деятельности человека. В рамках данной

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

работы рассмотрены антропогенные изменения почв и почвенного покрова территории высоковольтной линии электропередач. Участок размером 100×500 м расположен в Тихвинском районе между населенными пунктами Каливец и Новая Усть-Капша. Ландшафт территории относится к озерно-ледниковому равнинному, почвообразующие породы – озерно-ледниковые пески и супеси. Естественные почвы, не затронутые технологическими работами, выявлены только в лесу, за пределами просеки, проложенной при строительстве линии электропередач. Они представлены подзолами, подбурами, торфяно-подбурами, торфяно-подзолами и торфяно-глееземами. Выявлено, что на участке частично или полностью срезаны, турбированы, уплотнены горизонты исходных естественных почв, что привело к формированию их антропогенно-преобразованных подтипов: переуплотненных, абрадированных, турбированных и стратифицированных. Часть срединных горизонтов экспонирована на поверхность и перемещена по участку на десятки метров. После строительства высоковольтной линии в почвенном покрове появились абраземы, погребенные почвы и несколько типов непочвенных образований. Установлено, что для каждой технологической операции (вырубка леса, установка опор ЛЭП, организация мест штабелевки древесины, создание временных дорог) характерны специфические нарушения в почвенном покрове. Таким образом, после строительства ЛЭП на участке просеки не осталось почв с ненарушенным строением. Помимо кардинальной трансформации почвенного покрова, сведена естественная растительность, частично нарушены элементы мезорельефа и практически полностью изменен микрорельеф. Все последствия этих антропогенных нарушений в большей или меньшей степени влияют на качество выполняемых почвами экологических функций. При дальнейшей эксплуатации ЛЭП (расчистка просеки, обновление противопожарных минерализованных полос, обслуживание электросети) нарушения почвенного покрова будут периодически повторяться, не позволяя экосистеме вернуться в ее исходное состояние.

Ключевые слова: лесные почвы, антропогенно-измененные почвы, непочвенные образования, вырубка, ЛЭП.

Soil cover transformation after the laying of a high-voltage power line¹

© 2023 M. K. Zakharova^{1*}, Yu. R. Morgach^{1**},
E. Yu. Sukhacheva^{2***}

¹*V.V. Dokuchaev Central Soil Museum – Branch of the Federal Research
Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,*

6 Birzhevoy proezd, Saint Petersburg 199034, Russian Federation,

** <https://orcid.org/0000-0002-0856-018X>, e-mail: 123masha123@mail.ru,*

*** <https://orcid.org/0000-0002-2422-8638>, e-mail: tima204@yandex.ru.*

²*Saint Petersburg State University,*

7–9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russian Federation,

**** <https://orcid.org/0000-0003-3612-6265>, e-mail: lenasoil@mail.ru.*

Received 18.01.2023, Revised 26.01.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: Today the rate of anthropogenic transformations of the soil cover significantly exceeds the rate of its natural restoration. According to a modern digital soil map at a scale of 1 : 200,000 in the Leningrad Region anthropogenically modified subtypes of natural soils, which were formed as a result of human economic activity, predominate. The article considers anthropogenic changes in soils and soil cover of the territory of the high-voltage power line. The study area of 100×500 meters is located in the Tikhvinsky district between the settlements of Kalivets and Novaya Ust-Kapsha. The landscape of the territory belongs to the lake-glacial plain, the soil-forming rocks are lake-glacial sands and sandy loam. Natural soils that are not affected by technological works are found only in the forest, outside the clearing laid during the construction of the power line. These are Albic Podzol, Entic Podzol, Histic Albic Podzol, Histic Entic Podzol and Histic Gleysol. It was revealed that in the study area, the horizons of the original natural soils are partially or completely cut off, turbated, compacted, which led to the formation of their anthropogenically transformed subtypes: over-compacted, abraded, turbid and stratified. Sometimes soil material is exposed to the surface and moved over the study area by tens of meters. After the construction of the high-voltage line, new formations appeared in the soil cover, such as Podzol Nudispodic, buried soils and several types of non-soil formations. It is revealed that each technological operation (logging,

¹ *Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.*

installation of power transmission line supports, organization of places for technological operations and the creation of temporary roads) is characterized by its own special disturbances in the soil cover. Thus, after the construction of the power line, there were no natural soils with an undisturbed structure in the soil cover. In addition to the fundamental transformation of the soil cover at the site, natural vegetation was reduced, the mesorelief was partially disrupted and the microrelief was almost completely changed. All these anthropogenic transformations will affect the quality of the ecological functions of the soil cover. During the further operation of power transmission lines, such as clearing a cut-out clearing, updating fire-prevention mineralized strips, maintaining the power grid, disturbances of the soil cover will be periodically repeated, preventing the ecosystem from returning to its original state.

Keywords: soil cover, forest soils, anthropogenically transformed soils, non-soil formations, felling, Power Transmission Line.

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая современные масштабы и темпы воздействия человека на почвы, проблема оценки почвенного покрова (ПП) антропогенно-преобразованных территорий приобретает особую актуальность. Вся территория Ленинградской области густо пронизана сетью ЛЭП, общая протяженность которой составляет почти 13 300 км ([Схема ..., 2021](#)). Каждый этап технологического процесса прокладки высоковольтных линий через лесные массивы влияет на почвы и ПП.

В литературе достаточно хорошо освещены вопросы, связанные с изменениями почв под влиянием вырубок ([Бобкова, 2012](#); [Бурова, 2007](#); [Герасимова, 2008](#); [Дымов, 2016](#); [Карпачевский и др., 1986](#); [Лаптева, 2015](#); [Тощева, 1983](#) и др.). Встречаются работы, рассматривающие влияние ЛЭП на отдельные компоненты почв ([Богородская, 2017](#); [Захарченко, 2014](#); [Сарокваша, 2006](#); [Щербаков, 2013](#)). Работ, посвященных оценке изменений почвенного покрова под ЛЭП, – единицы ([Захарченко, 2000, 2016](#)).

Перед строительством ЛЭП осуществляют вырубку просеки, проводят расчистку трассы от древесины, сооружают временные дороги, полигоны для разгрузки и сборки опор, через обводненные участки прокладывают лежневые дороги. Многообразие типов воздействий на ПП обуславливает разнообразие антропоген-

но-измененных естественных почв. Тяжелой техникой уплотняются, срезаются, перемешиваются маломощные поверхностные органо-генные и органо-минеральные горизонты лесных почв. Помимо этого, в результате антропогенного воздействия извлекаются и экспонируются на поверхность минеральные горизонты почв и материал почвообразующих пород. Под толщей насыпного или складированного материала естественные почвы становятся погребенными. Также на территории строительства ЛЭП появляются непочвенные образования (НПО). Это приводит к уменьшению доли эффективно функционирующей поверхности и снижению качества выполняемых ПП экологических функций (Добровольский, 2012; Карпаческий, 2005).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для изучения почв и ПП территории под высоковольтной линией электропередач в лесной зоне был выбран участок свежесрубленной просеки в восточной части Ленинградской области, в Тихвинском районе, между населенными пунктами Каливец и Новая Усть-Капша.

На космо- (рис. 1) и аэрофотоснимках (рис. 2) территория высоковольтной ЛЭП дешифровалась как светло-зеленая полоса с ровными границами на фоне темно-зеленого леса.



Рис. 1. Космоснимок участка (yandex.ru).

Fig. 1. Space image of the site (yandex.ru).



Рис. 2. Аэрофотоснимок территории ЛЭП (DJI Mavic mini).

Fig. 2. Aerial photograph of the power line territory (DJI Mavic mini).

Ландшафт территории относится к озерно-ледниковому равнинному ([Атлас ..., 2022](#)). Почвообразующими породами участка являются озерно-ледниковые пески и супеси. Относительный перепад высот до антропогенного воздействия составлял 4 м, после – 6 м. Естественная растительность прилегающих к участку территорий представлена елово-сосновым лесом на возвышенной части, сосново-еловым на склонах и сосново-еловым с примесью березы в выровненной пониженной части.

Размер исследуемого участка – 100 × 500 м. Он включает в себя вырубленную для целей возведения ЛЭП просеку и небольшие ареалы естественного леса по краям от нее. В соответствии с действующим Лесным кодексом РФ, произведенная вырубка относится к рубкам главного пользования, типу сплошных, подтипу узколесосечных ([Лесной кодекс ..., 2006](#)). При сплошной рубке весь древостой на лесосеке вырубается в один прием. Узколесосечная рубка – рубка, при которой ширина лесосеки не превышает 100 м.

На момент обследования, помимо произведенной рубки, на участке были организованы места штабелевки древесины, заложены противопожарные минерализованные полосы¹ (барьер от распространения огня по поверхности почвы в условиях низового пожара), установлена опора ЛЭП, по заболоченному участку проложена лежневая дорога (рис. 3).

На участке заложено 10 опорных почвенных разрезов, а также полуямы и прикопки, проведена аэрофотосъемка участка с помощью квадрокоптера DJI Mavic mini 2 (рис. 5) и составлена почвенная карта.

¹ **Противопожарная минерализованная полоса** – это искусственно созданная полоса на поверхности земли, очищенная от горючих материалов или обработанная почвообрабатывающими орудиями, либо иным способом до сплошного минерального слоя почвы ([Приказ ..., 2016](#)).

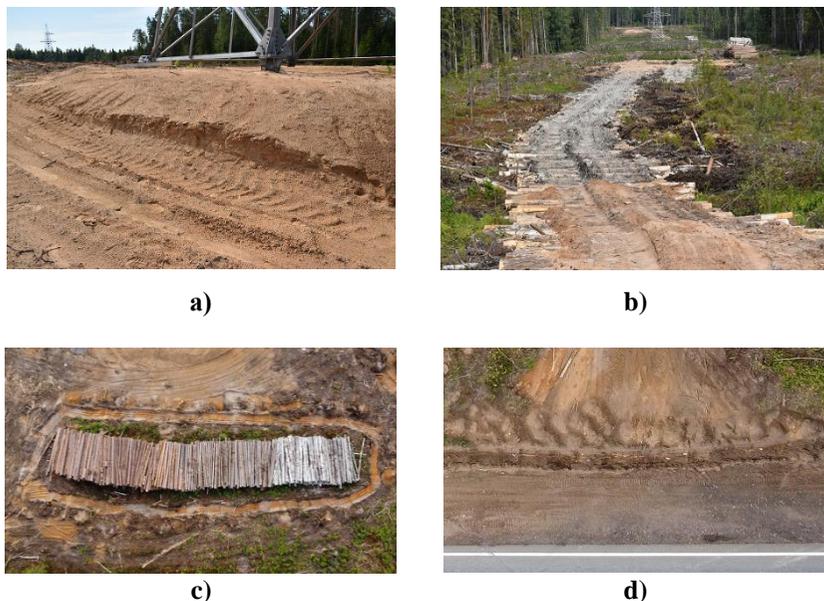


Рис. 3. Антропогенные нарушения естественного почвенного покрова исследуемой территории. **а)** Монтаж опоры ЛЭП. **б)** Лежневая дорога. **в)** Место штабелевки древесины. **д)** Противопожарная минерализованная полоса.

Fig. 3. Anthropogenic transformations of the natural soil cover of the study area. **a)** Installation of power transmission line supports. **b)** Lane road. **c)** Wood stacking areas. **d)** Fire-prevention mineralized strip.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате полевого исследования было выявлено, что естественные ненарушенные почвы на участке сохранились лишь за пределами проложенной для ЛЭП просеки. В южной, наиболее возвышенной части участка и в части северной под естественной растительностью на автоморфных позициях выявлены подзолы и подбуры иллювиально-железистые; у подножий склоновых позиций и в центральной выположенной части – подзолы и подбуры

глеевые; в понижениях – торфяно-глееземы¹ (рис. 6).

Почвенный покров просеки под ЛЭП является полным отражением проводимых при ее строительстве технологических операций. Более половины участка занимают антропогенно-измененные почвы. Почвы с нарушенной верхней частью диагностировали как турбированные, со срезанными и частично срезанными верхними горизонтами – абрадированными и абраземами, и почвы с привнесенным с окружающих территорий минеральным и органогенным материалом – стратифицированными и стратоземами (рис. 4).

Согласно технологическим операциям ([Справочник, 2007](#)), опора ЛЭП закрепляется при помощи фундамента, закапываемого в толщу почвы (грунта). До начала монтажных работ экскаваторами был заложен котлован, который полностью уничтожил естественные почвы. После сборки фундамента и установки опоры котлован был закрыт минеральным материалом. В результате образовалась возвышающаяся над основной поверхностью насыпь высотой 1 м (рис. 3а), которая выделена как контур НПО. Ареал вокруг несущей конструкции ЛЭП занят комбинацией подзолов и подбуров иллювиально-железистых абрадированных, турбированных, стратифицированных.

Помимо контура под опорой ЛЭП, на исследуемом участке выделены и другие типы НПО – лежневая дорога и места штабелевки древесины. Впоследствии при удалении лесоматериала они могут быть изменены на контуры нарушенных естественных почв. По периметру вырубленных и сложенных группами вдоль просеки деревьев заложена противопожарная минерализованная полоса. На ее поверхности хорошо просматриваются фрагменты подзолистого и альфегумусового горизонтов, что свидетельствует о наличии здесь до антропогенного вмешательства подзолов. На момент обследования почвы диагностированы как подзолы абрадированные.

¹ Названия почв даны согласно Классификации и диагностике почв России ([Классификация, 2004](#)).

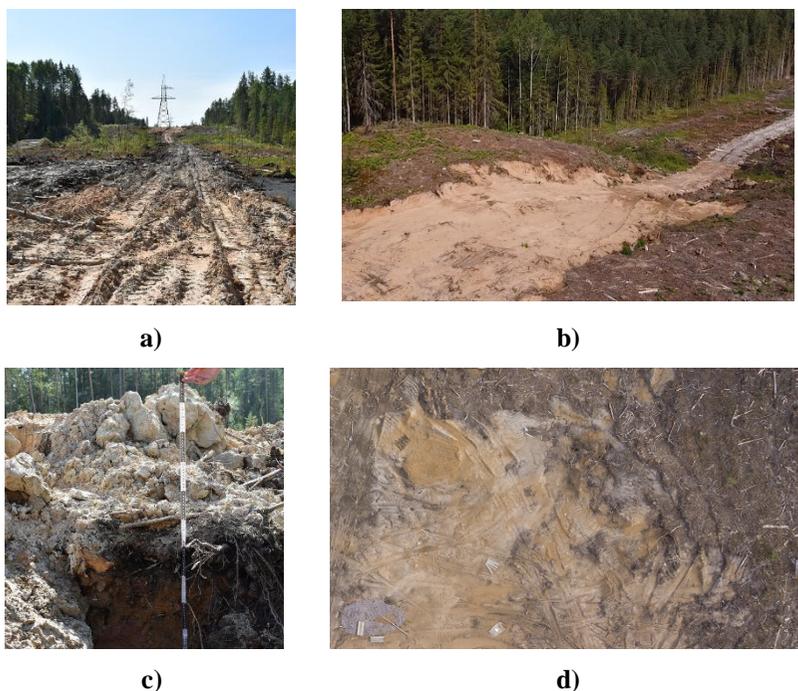


Рис. 4. Примеры антропогенно-нарушенных почв и НПО. **а)** Непочвенное образование. **б)** Абразем. **с)** Стратозем. **д)** Комбинация абрадированных, турбированных и стратифицированных почв.

Fig. 4. Examples of anthropogenically-transformed soils and non-soil formations. **a)** Non-soil formation. **b)** Abrazems. **c)** Stratozems. **d)** Combination of abraded, turbated and stratified soils.

В южной части участка по просеке проходит автомобильная дорога, по обеим сторонам которой во избежание возгораний заложены противопожарные минерализованные полосы. На дне таких полос (канав) выявлены абраземы альфегумусовые, по ее краям – стратоземы на подбурах и подбуры стратифицированные.

В средней низменной части участка, где были выявлены переувлажненные и заболоченные почвы, после строительства ЛЭП диагностированы антропогенно-преобразованные торфяно-подбуры и торфяно-подзолы глеевые иллювиально-железистые, а также торфяно-глееземы. Они представлены абрадированными,

турбированными, стратифицированными подтипами.

В северной части участка вдоль старой дренажной канавы обнаружены подзолы и подбуры окисленно-глеевые абрадированные и турбированные, подзолы и подбуры окисленно-глеевые стратифицированные.

В центре понижения проложена лежневая дорога. Для этого на поверхность почвы были уложены стволы вырубленных на участке деревьев. Далее на лесоматериал была нанесена турбированная масса, состоящая из фрагментов разрушенных горизонтов естественных почв, изъятых с двух сторон от искусственно проложенной дороги. Данный контур выделен как НПО. Ареалы искусственно созданных понижений выделены как абраземы глеевые, ареалы почв с мощной толщей стратифицированного материала – как стратоземы на погребенных почвах.

На почвенной карте отдельным условным знаком выделены ареалы стратифицированных почв. Это антропогенно-преобразованные почвы разных типов и подтипов, на поверхности которых находится минеральный материал (южная часть участка), либо порубочные остатки (центральная и северная части).

Таким образом, после строительства ЛЭП наблюдаются кардинальные изменения в почвенном покрове. Сведение растительности и нарушения строения почв неизбежно ведут к нарушению светового, теплового, воздушного и водного режимов, к смене видового состава растительных и животных сообществ почв.

Микрорельеф автоморфных участков после строительства ЛЭП приобрел отличный от исходного характер. Появилась колеиность, рытвины и микропонижения. На момент обследования на участке уже наблюдалась аккумуляция влаги и органогенного материала в микропонижениях. В ближайшие годы подобные процессы усилятся, что приведет к усложнению структуры почвенного покрова нарушенной территории.

Абрадированные почвы и абраземы склоновых позиций вследствие удаления верхних органогенных горизонтов будут подвержены эрозионным процессам. Не исключено образование промоин.



Рис. 5. Аэрофотоснимок участка.
Fig. 5. Aerial photograph of the site.

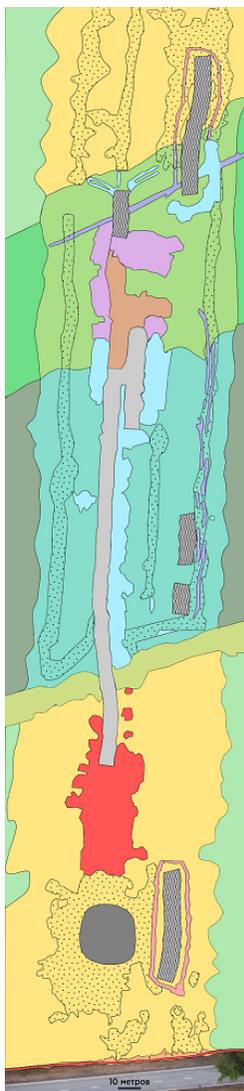


Рис. 6. Почвенная карта участка.
Fig. 6. Soil map of the site.

Условные обозначения

- Комбинация подзолов и подбуров иллювиально-железистых
- Абразмы альфумусовые
- Подбуря иллювиально-железистые стратифицированные и стратоземы
- Подзолы и подбуря иллювиально-железистые абразированные
- Подзолы и подбуря ил-абразированные абразированные и турбированные
- Стратифицированные почвы
- Непочвенные образования
- Непочвенные образования на переуплотненных почвах
- Абразмы глеевые
- Торфяно-глееземы
- Торфяно-глеезема и торфяно-глеезема абразированные и стратифицированные
- Подбуря и подзолы глеевые иллювиально-железистые
- Подбуря и подзолы глеевые окислительно-глеевые абразированные турбированные
- Подбуря и подзолы глеевые и окислительно-глеевые стратифицированные

Прокладка лежневой дороги в значительной степени нарушила мезорельеф центральной части участка. Появились ямы, которые моментально заполнились грунтовой водой, что еще более усложнило гидрологическую обстановку самой обводненной части участка.

В значительной степени снизится эффективность экологических функций почв, временно погребенных под местами штабелевки древесины. В случае если вырубленные стволы деревьев останутся на месте размещения в течение продолжительного времени, функции почв будут утрачены.

Ввиду специфики дальнейшей эксплуатации данной территории (периодическая расчистка просеки под ЛЭП, ежегодное обновление противопожарных полос, обслуживание электросети) полного восстановления ее исходного биогеоценоза не произойдет. На смягчение последствий антропогенных нарушений отдельных участков просеки может потребоваться не менее 20–60 лет ([Тошева, 1983](#); [Захарченко, 2000](#); [Лаптева, 2015](#)). Таким образом, функции, выполняемые почвенным покровом таких территорий, в течение длительного времени не восстановятся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При строительстве ЛЭП сведена естественная растительность, частично изменен мезо- и значительно микрорельеф, уничтожена часть почв.

В пределах вырубленной для высоковольтной ЛЭП просеки почвенный покров повсеместно представлен только антропогенно-измененными почвами и НПО.

На долю НПО, которые в максимальной степени утрачивают свои экологические функции, приходится 15% площади участка.

Преобладающими почвами участка (34%) являются антропогенно-измененные естественные почвы. Площадь абраземов составляет – 5%, абрадированных почв – 4%. Комбинация небольших контуров абрадированных, турбированных и стратифицированных подтипов – 22%.

Доля ареалов естественных почв составляет 20%. Они приурочены к контурам естественного леса, не затронутого технологическими работами на участке.

Вырубка просеки привела к формированию в почвенном покрове турбированных, абрадированных и переуплотненных почв; складирование порубочных остатков – к появлению стратифицированных, организация мест штабелевки древесины – погребенных почв. Установка опор ЛЭП невозможна без полного разрушения определенной площади почв, которая впоследствии образует контур НПО, а окружающие территории – ареалы стратифицированных антропогенно-измененных почв. Создание временных дорог поспособствовало появлению абрадированных почв и абраземов, стратифицированных почв и стратоземов, а также НПО.

При дальнейшей эксплуатации территории ЛЭП полного восстановления ее исходного биогеоценоза и его функций не произойдет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Ленинградской области / гл. ред. *Д.А. Субетто*. СПб: Издательство РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. С. 34–35.
2. *Бобкова К.С., Лиханова Н.В.* Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесочных рубках древостоев ельников средней тайги // *Лесоведение*. 2012. № 6. С. 44–54.
3. *Богородская А.В., Пономарева Т.В., Ефимов Д.Ю., Шишкин А.С.* Трансформация эколого-функциональных параметров микробиоценозов почв на просеках линий электропередач в условиях Средней Сибири // *Почвоведение*. 2017. № 6. С. 731–743.
4. *Бурова Н.В., Феклистов П.А.* Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. ун-та. 2007. 264 с.
5. *Герасимова М.И., Исаченкова Л.Б.* “Короткая память” дерново-подзолистых почв в лесовосстановительных сукцессиях // *Память почв*. М.: Издательство ЛКИ. 2008. С. 638–649.
6. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Издательство Московского университета. 2012. 412 с.
7. *Дымов А.А., Старцев В.В.* Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесочных рубок // *Почвоведение*. 2016. № 5. С. 599–608.
8. *Захарченко А.В.* Антропогенно-измененные почвы просек линий электропередач: Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Томск. 2000. 154 с.
9. *Захарченко А.В.* Вейвлет анализ мощности аккумулятивно-гумусового слоя почвенного покрова под линией электропередачи // *Properties of*

matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines/creation as the factor of evolutionary development and the society's aspiration to perfection. 2014. С. 37–40.

10. *Захарченко А.В., Пасько О.А., Ипатов Д.В., Раудина Т.В.* Антропогенные почвы на лесных землях санитарно-защитной зоны воздушной линии электропередачи сверхвысокого класса напряжения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. №. 11. С. 86–95.

11. *Карпачевский Л.О.* Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.

12. *Карпачевский Л.О., Строганова М.Н., Баранова О.Ю., Тощева, Г.П., Щегольникова Н.М.* Эволюция почвенного покрова при лесовосстановлении // Успехи почвоведения. Советские Почвоведы к XIII Международному конгрессу почвоведов. М.: Наука, 1986. С. 135–142.

13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

14. *Лантева Е.М., Втюрин Г.М., Бобкова К.С., Каверин Д.А., Дымов А.А., Симонов Г.А.* Изменение почв и почвенного покрова еловых лесов после сплошнолесосечных рубок // Сибирский лесной журнал. 2015. №. 5. С. 64–76.

15. Лесной кодекс Российской Федерации (с изменениями на 29 декабря 2022 года). Кодекс РФ от 04 декабря 2006 г. № 200-ФЗ Федеральный закон от 04 декабря 2006 г. № 200-URL: <https://docs.cntd.ru/document/902017047>.

16. Приказ МЧС России от 25.12.2012 N 804 (ред. от 18.07.2016) Об утверждении свода правил “Инфраструктура железнодорожного транспорта. Требования пожарной безопасности” (вместе с “СП 153.13130.2013. Свод правил ...”).

17. *Сароквашиа О.Ю.* Эколого-биохимический мониторинг состава почвы в зоне размещения высоковольтной ЛЭП // Вестник Самарского государственного университета. 2006. №. 7. С. 198–206.

18. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0.4–750 кВ / Е. Гологорский. М.: Изд-во “ЭНАС”, 2007. 292 с.

19. Схема и программа развития электроэнергетики ленинградской области на 2021–2025 годы. Комитет по топливно-энергетическому комплексу ленинградской области. URL:

https://power.lenobl.ru/ru/deiatelnost/osnovnye_napravleniya/elektroenergetika-i-tehnologicheskoe-prisoedinenie-k-elektricheskim-se/shema-i-programma-razvitiya-elektroenergetiki-leningradskoj-oblasti/.

20. Тощева Г.П. Изменение почвенного покрова на вырубках ельников южной тайги: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03. М.: 1983. 24 с.
21. Щербakov И.В. Влияние электромагнитных полей воздушных линий электропередач на почвы лесных насаждений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.02. Екатеринбург, 2013. 19 с.

REFERENCES

1. Subetto D.A. (Ed.), *Atlas Leningradskoi oblasti (Atlas of the Leningrad Region)*, Saint Petersburg: Izdatel'stvo RGPU im. A.I. Gertsena, 2022, pp. 34–35.
2. Bobkova, K.S. Likhanova N.V., Vynos ugleroda i elementov mineral'nogo pitaniya pri sploshnolesochnykh rubkakh drevostoev el'nikov srednei taigi (Removal of carbon and mineral nutrition elements during clear felling of spruce stands in the middle taiga), *Lesovedenie*, 2012, No. 6, pp. 44–54.
3. Bogorodskaya A.V., Ponomareva T.V., Efimov D.Yu., Shishikin A.S., Transformatsiya ekologo-funktsional'nykh parametrov mikrobootsenozov pochv na prosekakh linii elektroperedach v usloviyakh Srednei Sibiri (Transformation of ecofunctional parameters of soil microbial cenoses in clearings for power transmission lines in Central Siberia), *Pochvovedenie*, 2017, No. 6, pp. 731–743.
4. Burova N.V., Feklistov P.A., *Antrorogennaya transformatsiya prigorodnykh lesov* (Anthropogenic transformation of suburban forests), Arkhangel'sk: Izd-vo Arkhang. gos. un-ta, 2007, 264 p.
5. Gerasimova M.I., Isachenkova L.B., “Korotkaya pamyat” dernovo-podzolistykh pochv vlesovostanovitel'nykh suksessiyakh (“Short memory” of soddy-podzolic soils in reforestation successions), *Pamyat' pochv*, Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2008, pp. 638–649.
6. Dobrovol'skii G.V., Nikitin E.D., *Ekologiya pochv (Soil ecology)*. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv, Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2012, 412 p.
7. Dymov A.A., Startsev V.V., *Izmenenie temperaturnogo rezhima podzolistykh pochv v protsesse estestvennogo lesovozobnovleniya posle sploshnolesochnykh rubok* (Changes in the temperature regime of podzolic soils in the course of natural forest restoration after clearcutting), *Pochvovedenie*, 2016, No. 5, pp. 599–608.
8. Zakharchenko A.V., *Anthropogenno-izmenennye pochvy prosek linii elektroperedach: Dis. ... kand. biol. nauk: 03.00.16* (Anthropogenically transformed soils of the glades of power lines, Cand. biol. sci. thesis, 03.00.16), Tomsk, 2000, 154 p.

9. Zakharchenko A.V., Veivlet analiz moshchnosti akkumulyativnogumusovogo sloya pochvennogo pokrova pod liniei elektroperedachi (Wavelet analysis of the thickness of the accumulative-humus layer of the soil cover under the power line), In: *Properties of matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines, Creation as the factor of evolutionary development and the society's aspiration to perfection*, 2014, pp. 37–40.
10. Zakharchenko A.V., Pas'ko O.A., Ipatova D.V., Raudina T.V., Antropogennye pochvy na lesnykh zemlyakh sanitarno-zashchitnoi zony vozdushnoi linii elektroperedachi sverkhvysokogo klassa napryazheniya (Antropogenic soils on forest land of sanitary protection zone of extra high voltage overhead lines), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2016, Vol. 327, No. 11, pp. 86–95.
11. Karpachevskii L.O., Stroganova M.N., Baranova O.Yu., Toshcheva, G.P., Shchegol'nikova N.M., Evolyutsiya pochvennogo pokrova pri lesovostanovlenii (Soil cover evolution during reforestation), *Usp ekhi pochvovedeniya. Sovetskie Pochvovedy k XIII Mezhdunarodnomu kongressu pochvovedov* (Proc. XIII Int. Congress Soil Science achievements. Soviet Soil Scientists), Moscow: Nauka, 1986, pp. 135–142.
12. Karpachevskii L.O., *Ekologicheskoe pochvovedenie* (Ecological soil science), Moscow: GEOS, 2005, 336 p.
13. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
14. Lapteva E.M., Vtyurin G.M., Bobkova K.S., Kaverin D.A., Dymov A.A., Simonov G.A., *Izmenenie pochv i pochvennogo pokrova elovykh lesov posle sploshnolesosechnykh ru-bok* (Changes in soils and soil cover of spruce forests after logging), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2015, No. 5, pp. 64–76.
15. Forest Code of the Russian Federation (changed on December, 29, 2022), Kodeks RF ot 04 dekabrya 2006 g. No. 200-FZ Federal'nyi zakon ot 04 dekabrya 2006 g. No. 200-FZ, URL: <https://docs.cntd.ru/document/902017047>.
16. Prikaz MChS Rossii (Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia), 25.12.2012 No. 804 (ed. 18.07.2016) “Ob utverzhdenii svoda pravil “Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti” (vmeste s “SP 153.13130.2013. Svod pravil...”)) (“Railway transport infrastructure. Fire safety requirements” (along with “SP 153.13130.2013. Code of Regulations ...”).
17. Sarokvasha O.Yu., Ekologo-biokhimicheskii monitoring sostava pochvy v zone razmeshcheniya vysokovol'noi LEP (Ecologo-biochemistry monitoring of structure of ground in zone of accommodation of high-voltage power line), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, No. 7, pp. 198–206.

18. Gologorskii E., *Spravochnik po stroitel'stvu i rekonstruktsii linii elektropredachi napryazheniem 0.4–750 kV* (Handbook on the construction and reconstruction of power lines with a voltage of 0.4–750 kV), Moscow: “ENAS”, 2007, 292 p.

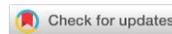
19. Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki lenin-gradskoi oblasti na 2021–2025 gody (Scheme and program for the development of the electric power industry of the Leningrad region for 2021–2025)., URL: https://power.lenobl.ru/ru/deiatel'nost/osnovnye_napravleniya/elektroenergetika-i-tehnologicheskoe-prisoedinenie-k-elektricheskim-se/shema-i-programma-razvitiya-elektroenergetiki-leningradskoj-oblasti/.

20. Toshcheva G.P., *Izmenenie pochvennogo pokrova na vyrubkakh el'nikov yuzhnoi taiga: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 06.01.03*, (Changes in the soil cover on the felling of spruce forests of the southern taiga, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis, 06.01.03), Moscow: 1983, 24 p.

21. Shcherbakov I.V., *Vliyanie elektromagnitnykh polei vozdushnykh linii elektropredach na pochvy lesnykh nasazhdenii: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 06.01.02*, (The influence of electromagnetic fields of overhead power lines on the soils of forest plantations, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis, 06.01.02), Ekaterinburg, 2013, 19 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75



Ссылки для цитирования:

Доброхотов А.В., Козырева Л.В. Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 43-75. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75

Cite this article as:

Dobrokhотов A.V., Kozyreva L.V., Influence of the biochar application on the thermal properties of soddy-podzolic soil and on the energy balance fluxes of spring wheat in the Leningrad region under various soil moisture conditions, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 43-75, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75

Благодарность:

Авторы выражают благодарность Чикишеву Дмитрию Владимировичу и Балашову Евгению Владимировичу за содействие в проведении исследований, Моисееву Кириллу Геннадьевичу за предоставление материалов исследований гранулометрического состава почвы на сельскохозяйственных полях Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института.

Acknowledgments:

The authors would like to thank Dmitry Vladimirovich Chikishev and Evgeny Vladimirovich Balashov for their assistance in conducting the research, Kirill Gennadyevich Moiseev for providing the materials on particle size distribution of soil on agricultural fields of Menkovo experimental station of Agrophysical Research Institute.

Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой

пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения¹

© 2023 г. А. В. Доброхотов^{1,2*}, Л. В. Козырева^{1**}

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

* <https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>, e-mail: dobralexy@gmail.com,

** <https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>, e-mail: 4ludak@gmail.com.

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

Поступила в редакцию 16.01.2023, после доработки 29.03.2023,
принята к публикации 27.06.2023

Резюме: В статье приведены результаты полевого эксперимента по оценке влияния предпосевного внесения биоугля на теплофизические свойства пахотного горизонта дерново-подзолистой супесчаной почвы, составляющие энергетического баланса, температуру подстилающей поверхности и температуру листьев яровой пшеницы сорта “Дарья” при различных условиях почвенного увлажнения в 2022 г. Эксперимент проводился на территории Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института, расположенной в Гатчинском районе Ленинградской области. Эксперимент включал опытный участок с внесением биоугля в дозе 21.9 т га⁻¹ и контрольный участок. Условия почвенного увлажнения и влагообеспеченность пшеницы характеризовались объемной влажностью почвы и суммарным испарением. По результатам полевых экспериментов было обнаружено значимое влияние ($p < 0.05$) внесения биоугля на теплофизические свойства почвы, однако в условиях различного увлажнения влияние было разнонаправленное. При влажности почвы в абсолютно сухом состоянии внесение биоугля уменьшило на 29.7% теплопроводность, уменьшило на 18.5% объемную теплоемкость, уменьшило на 13.7% температуропроводность, уменьшило на 24.3% тепловую инерцию. При значениях влажности почвы, соответствующей наименьшей влагоемкости, внесение биоугля увеличило на 9.4% теплопроводность, уменьшило на 2.6% объемную теплоемкость, увеличило на 12.3% температуропроводность, увеличило на 3.2% тепловую инерцию.

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Внесение биоугля значимо ($p < 0.05$) за счет увеличения температуры подстилающей поверхности (на 6.4%) увеличило турбулентный поток тепла на 35.5%. Вследствие снижения испарения с поверхности почвы внесение биоугля уменьшило на 17.0% скрытый поток тепла и на 13.9% суммарное испарение. Температура листьев характеризует транспирацию растительности, которая может повышаться при внесении биоугля на легких почвах из-за увеличения влагоемкости. В нашем эксперименте внесение биоугля не оказало значимых изменений на температуру листьев растений. Результаты эксперимента подтверждаются многочисленными выводами как зарубежных, так и отечественных исследователей.

Ключевые слова: биоуголь, дерново-подзолистая супесчаная почва, составляющие энергетического баланса, теплофизические свойства почвы, температура подстилающей поверхности, температура листьев, суммарное испарение.

Influence of the biochar application on the thermal properties of soddy-podzolic soil and on the energy balance fluxes of spring wheat in the Leningrad region under various soil moisture conditions¹

© 2023 A.V. Dobrokhotov^{1,2*}, L.V. Kozyreva^{1**}

¹Agrophysical Research Institute,

14 Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg 195220, Russian Federation,
^{*}<https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>, e-mail: dobralexev@gmail.com,
^{**}<https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>, e-mail: 4ludak@gmail.com.

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

Received 16.01.2023, Revised 29.03.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The article presents the results of a field experiment to assess the effect of pre-sowing application of the biochar on the thermal properties of the arable horizon of soddy-podzolic sandy loam soil, on the energy balance components, on the crop surface temperature and on the leaves temperature of spring wheat (variety “Daria”) under various conditions of soil moisture in

¹ Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

2022. The experiment took place at the Menkovo Experimental Station of the Agrophysical Research Institute, located in the Gatchinsky District of the Leningrad Region. The experiment included the plot with the biochar application at the dose of 21.9 t ha⁻¹ and the control plot. The soil thermal properties were measured by the heat pulse method. The components of the energy balance were determined using agrometeorological measurements, radiation balance measurements, crop surface temperature, and phenological measurements. The crop surface temperature was measured by a non-contact method using pyrometers. The soil moisture conditions and available water for wheat were characterized by volumetric soil moisture and evapotranspiration. The volumetric soil moisture was measured using a capacitive soil moisture sensor. The evapotranspiration was determined using the residual term of the energy balance equation through the latent heat flux. According to the results of field experiments, a significant effect ($p < 0.05$) of the biochar application on the soil thermal properties was found, however, under different moisture conditions, the effect was multidirectional. At zero soil moisture, the biochar application reduced thermal conductivity by 29.7%, reduced volumetric heat capacity by 18.5%, reduced diffusivity by 13.7%, and reduced thermal inertia by 24.3%. Under the conditions of field capacity, the biochar application increased thermal conductivity by 9.4%, reduced volumetric heat capacity by 2.6%, increased diffusivity by 12.3%, and increased thermal inertia by 3.2%. The biochar application significantly ($p < 0.05$) increased the turbulent heat flux – by 35.5%, which is due to an increase in the crop surface temperature (by 6.4%). Resulting from the decrease in soil evaporation, the biochar application reduced the latent heat flux by 17.0%, and the evapotranspiration by 13.9%. Leaf temperature is related to transpiration. Transpiration can increase when biochar is applied on light-textured soils due to an increase in soil water capacity. The biochar application did not result in significant changes of leaf temperature. The study results are confirmed by numerous articles of both foreign and Russian researchers.

Keywords: biochar, soddy-podzolic sandy loam soil, soil thermal properties, energy balance components, crop surface temperature, leaf temperature, evapotranspiration.

ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь является продуктом пиролиза биомассы в бескислородной среде. Он имеет пористую структуру и содержит множество различных функциональных групп ([Lehmann, Joseph, 2015](#)). Биоуголь может содержать некоторое количество гумино-

вых веществ ([Lin et al., 2012](#)). Кроме того, его молекулярная структура имеет высокую степень химической и микробиологической стабильности ([Cheng et al., 2008](#)). Физические и химические свойства биоугля сильно зависят от температуры и продолжительности пиролиза, типа исходного сырья ([Joseph et al., 2010](#); [Bruun et al., 2011](#)). В качестве исходного материала для производства биоугля используется широкий спектр сырья, включая древесную щепу, органические отходы, растительные остатки и птичий помет ([Sohi et al., 2010](#)). Элементный состав биоугля обычно включает углерод, азот, водород и вспомогательные питательные элементы, такие как К, Са, Na и Mg ([Zhang et al., 2015](#)). Биоуголь имеет большую удельную площадь поверхности и содержит ряд полярных и неполярных молекул, обладающих сильным сродством к неорганическим ионам, например, к ионам тяжелых металлов, фосфатам и нитратам ([Schmidt et al., 2015](#); [Kammann et al., 2015](#)). Внесение биоугля может улучшить структуру почвы, увеличить пористость, уменьшить плотность и увеличить влагоемкость почвы ([Baiaimonte et al., 2015](#)). Биоуголь может увеличить электропроводность почвы ([Oguntunde et al., 2004](#)) и емкость катионного обмена ([Laird et al., 2010](#)), а также снизить кислотность почвы ([Oguntunde et al., 2004](#)). Кроме того, внесение биоугля способствует увеличению микробной биомассы ([Liang et al., 2010](#)), состава бактериального сообщества почвы ([Grossman et al., 2010](#)), базального дыхания ([Steiner et al., 2008](#)). Секвестрация углерода за счет применения биоугля приводит к повышению плодородия почв с низким содержанием питательных веществ ([Jiang et al., 2012](#); [Liu et al., 2012](#)). Существуют различные механизмы повышения доступности питательных веществ для растений в агроэкосистемах: 1) минерализация лабильной фракции биоугля, которая содержит органически связанные питательные вещества ([Sohi et al., 2010](#); [Lehmann et al., 2012](#)); 2) снижение выщелачивания питательных веществ благодаря физико-химическим свойствам биоугля ([Liang et al., 2006](#)); 3) снижение потерь азота при денитрификации ([Cayuela et al., 2013](#)); 4) удержание азота, фосфора и серы, связанное с усилением биологической активности почвы или изменением бактериального сообщества ([Pietikäinen et al., 2000](#)). Согласно результатам некоторых полевых экспериментов применение био-

угля улучшило качество почвы, увеличило урожайность и способствовало росту растений ([Lehmann et al., 2006](#); [Major et al., 2010](#); [Zhang et al., 2010](#); [Uzoma et al., 2011](#)). Однако в работе (Asai et al., 2009) приводятся данные о снижении урожайности при применении биоугля. Снижение урожайности может быть связано с высоким содержанием летучих, а также токсичных и вредных веществ в биоугле, которые способствуют снижению поглощения питательных веществ, и, как следствие, подавляют рост растений. Таким образом, повышение урожайности может зависеть от свойств биоугля и свойств почвы.

Теплофизические свойства почвы (теплопроводность, объемная теплоемкость и температуропроводность) влияют на энергетический баланс подстилающей поверхности, аккумуляцию и передачу тепла в почве. Внесение биоугля может снижать теплопроводность и температуропроводность почвы ([Zhang et al., 2013](#); [Usovicz et al., 2016](#); [Zhao et al., 2016](#)) и, как следствие, снижать количество тепла, передаваемого через почву (теплопроводность). Терморегулирующий потенциал биоугля выглядит многообещающим, так как внесение биоугля может иметь стратегическое значение для управления климатическими рисками, такими как засухи и волны тепла, которые в последнее время остро ощущаются в Северо-Западном регионе России. Теплофизические свойства почвы в значительной степени коррелируют с другими свойствами почвы, такими как плотность и влажность почвы, содержание органического вещества, концентрация растворенных веществ. Например, теплопроводность почвы может увеличиваться с увеличением плотности и влажности почвы и уменьшаться с увеличением органического вещества почвы и концентрации солей ([Abu-Hamdeh, Reeder, 2000](#); [Zhao et al., 2016](#)). Снижение плотности при применении биоугля может снизить теплопроводность ([Zhang et al., 2013](#)), тогда как увеличение влагоемкости почвы при применении биоугля может увеличить теплопроводность ([Usovicz et al., 2016](#)).

В настоящей работе приведены результаты полевого исследования влияния внесения биоугля, произведенного из отходов деревообрабатывающей промышленности методом медленного пиролиза, на теплофизические свойства пахотного горизонта дер-

ново-подзолистой супесчаной почвы при различных условиях увлажнения и влагообеспеченности посевов яровой пшеницы в Ленинградской области и на составляющие энергетического баланса. Данная работа является актуальной, так как влияние внесения биоугля на теплофизические свойства почвы изучено меньше, чем влияние биоугля на физико-химические свойства и микробиологические показатели. Изменение теплофизических свойств почвы при внесении биоугля может быть различно для почв, отличающихся гранулометрическим составом. Исследования влияния биоугля на теплофизические свойства различных типов почв при разном уровне увлажнения являются важными для задач моделирования роста и развития растений при применении биоугля ([Archontoulis et al., 2016](#)).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые эксперименты проводились во время вегетационного периода 2022 г. на Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института (Гатчинский район Ленинградской области). При проведении экспериментов изучалось влияние внесения биоугля на составляющие энергетического баланса при различных условиях почвенного увлажнения. Возделываемая сельскохозяйственная культура на опытных участках – яровая мягкая пшеница сорта “Дарья” (*Triticum aestivum* L.). Эксперимент включал опытный участок с внесением биоугля в дозе 21.9 т га⁻¹ в пахотный горизонт почвы и контрольный участок. Биоуголь был изготовлен из отходов деревообрабатывающей промышленности методом медленного пиролиза при температуре 600 °С. Биоуголь внесли на поверхность участка и заделали в почву 05.05.2022 г. перед посевом. Посев был произведен 07.05.2022 г. Площадь опытных участков составляла 16 м². Координаты опытного участка с внесением биоугля – 59°25'28.6" с. ш., 30°02'40.3" в. д.; контрольного участка – 59°25'28.6" с. ш., 30°02'39.6" в. д. Перед посевом в почву дополнительно внесли азофоску (NPK) марки 15 : 15 : 15 в количестве 50 кг д. в. по каждому элементу. Полевые измерения проводились с 11 до 16 часов по местному времени в следующие даты: 19.05.2022, 31.05.2022, 09.06.2022, 23.06.2022, 07.07.2022, 21.07.2022, 04.08.2022.

Для анализа метеорологической информации за весь вегетационный период яровой пшеницы были использованы срочные данные близлежащей стандартной метеорологической станции “Белогорка” (WMO ID = 26069). Почва на опытных участках – супесчаная дерново-подзолистая. Гранулометрический состав пахотного горизонта почвы на опытных участках ([Моисеев и др., 2014](#)): 10.08% – физическая глина; 18.80% – пыль; 70.12% – песок; 1.02% – гравий.

Определялись следующие теплофизические свойства почвы: теплопроводность (K , Вт $m^{-1} K^{-1}$), объемная теплоемкость (C , МДж $m^{-3} K^{-1}$), температуропроводность (D , $mm^2 s^{-1}$). Теплофизические свойства почвы измеряли методом линейного импульсного источника теплоты ([He et al., 2018](#); [Brunetti et al., 2022](#)) с помощью сенсора SH-3 прибора TEMPOS. Измерения теплофизических свойств проводились в полевых условиях каждые 15 минут. Период измерений был выбран исходя из времени наступления термодинамического равновесия между сенсором и почвой после изменения расположения сенсора, а также времени измерения прибора. Для опытных участков было рассчитано еще одно комплексное теплофизическое свойство, характеризующее водный и тепловой режим верхнего слоя почвы, – тепловая инерция (ТИ, Дж $m^{-2} K^{-1} s^{-0.5}$), или теплоусвояемость ([De Vries, 1963](#)). Тепловая инерция представляет собой сопротивление почвы изменению температуры ее верхнего слоя (несколько сантиметров). Тепловая инерция широко используется в моделях определения влажности верхнего слоя почвы ([Lu et al., 2009](#)):

$$ТИ = \sqrt{K \cdot C}.$$

Уравнение энергетического баланса подстилающей поверхности формулируется как (Choudhury et al., 1987):

$$LE = R_n - H - G,$$

где LE – скрытый поток тепла (Вт m^{-2}), R_n – радиационный баланс (Вт m^{-2}), H – турбулентный поток тепла (Вт m^{-2}), G – поток тепла в почву (Вт m^{-2}).

Суммарное испарение – сумма испарения почвы и транспирации. Суммарное испарение является важнейшим показателем энерго-массообмена в системе “почва–растение–приземный слой воздуха”. Суммарное испарение (E_T , мм час⁻¹) определялось через скрытый поток тепла (LE , Вт м⁻²). Скрытый поток тепла оценивался как остаточный член в уравнении энергетического баланса с помощью специальных агрометеорологических измерений прибором АМПАК (Efimov et al., 2018).

Радиационный баланс над участком с внесением биоугля измерялся с помощью балансомера (Foken et al., 2021), радиационный баланс для участка без внесения биоугля рассчитывался через изменение уходящего длинноволнового излучения в уравнении радиационного баланса (Brutsaert, 1975).

Турбулентный поток тепла определялся аэродинамическим методом (Liu et al., 2007):

$$H = \frac{\rho_a C_p (T_s - T_a)}{r_{ah}},$$

где ρ_a – плотность воздуха (кг м⁻³); C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении (~ 1013 Дж кг⁻¹ К⁻¹) (Allen, 1998); T_a – температура воздуха на высоте 2 м (°C); T_s – температура подстилающей поверхности (°C); r_{ah} – аэродинамическое сопротивление (с м⁻¹).

Поток тепла в почву оценивался по данным измерений радиационного баланса и проективному покрытию (Su, 2002). Проективное покрытие определялось с помощью фотографий растительности (Bennett et al., 2000). На фотографиях выделялись пиксели, соответствующие растительности, через фильтр преобладания зеленого цвета в матрице RGB. Проективное покрытие рассчитывалось как площадь растительности по отношению к общей площади поверхности:

$$G = R_n \cdot [\Gamma_c + (1 - f_c) \cdot (\Gamma_s - \Gamma_c)],$$

где Γ_c – коэффициент для полностью сомкнутого растительного покрова (= 0.05); Γ_s – коэффициент для оголенной почвы (= 0.315); f_c – проективное покрытие (-).

Температура подстилающей поверхности является интегральной величиной температуры излучения почвы и листьев растений. Интегральную температуру подстилающей поверхности на опытных участках измеряли бесконтактным методом с помощью пирометров Optris CT LT ([Khanal et al., 2017](#)). Измерения температуры подстилающей поверхности проводились с интервалом 90 секунд. Различие температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью Земли и атмосферой. При этом температура листьев растений с учетом состояния атмосферы характеризует водный стресс растений ([Jones, Leinonen, 2003](#)) и интенсивность транспирации ([Zhao et al., 2022](#)). Для определения температуры листьев была проведена съемка тепловизионной камерой Testo 868 в каждый экспериментальный день.

Объемная влажность почвы определялась на участке с внесением биоугля с помощью емкостного датчика влажности почвы через измерения диэлектрической проницаемости почвы Decagon 10HS ([Visconti et al., 2014](#)). Измерения объемной влажности почвы проводились с интервалом 90 секунд.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа информации о погоде за вегетационный период 2022 г. по стандартной метеорологической станции “Белогорка” (рис. 1) было выделено две экспериментальные даты с контрастными метеорологическими условиями:

1) 07.07.2022 г. сложились засушливые погодные условия, которые характеризуются предшествующим длительным периодом высоких температур воздуха без выпадения осадков (17 дней без осадков со среднесуточной температурой 19.7 °C);

2) 04.08.2022 г. отмечается как дата высокого увлажнения, так как за двое суток (02.08.2022 г.) выпало максимальное количество осадков (71.3 мм) за весь вегетационный период.

В таблице 1 представлены осредненные значения параметров микроклимата сельскохозяйственного поля, измеренные при-

бором АМПАК: температура воздуха (T_a), относительная влажность воздуха (RH), атмосферное давление (P), скорость ветра (u); данные объемной влажности почвы (W), измеренной на глубине 10 см сенсором Decagon 10HS; данные фенологических измерений – высота растений (h_c) и оценка проективного покрытия (f_c) по результатам обработки фотографий. Высота растений (h_c) необходима для оценки параметра шероховатости количества движения и потока тепла, которые используются для определения аэродинамического сопротивления (r_{ah}). Данные измерений объемной влажности почвы (W) (табл. 1) согласуются с данными количества осадков, измеренного на метеорологической станции “Белогорка”:

1) 07.07.2022 г. наблюдаются засушливые условия с отсутствием влаги в почве ($W = 0.01 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$);



Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха (°C) и количество осадков (мм) по данным метеорологической станции “Белогорка”.

Fig. 1. Average daily air temperature (°C) and precipitation (mm). Data from the meteorological station “Belogorka”.

2) 04.08.2022 г. наблюдается максимальное за даты проведения экспериментов значение влажности почвы ($W = 0.26 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$).

После предобработки исходных данных и удаления выбросов была получена 91 точка измерений теплофизических свойств пахотного горизонта почвы (50 точек для участка с внесением биоугля и 41 точка для контрольного участка). В целом в течение одного дня теплофизические свойства на обоих участках практически не изменялись, но в измерениях присутствовали выбросы. Сильные выбросы могли происходить из-за наличия камня или гравия в радиусе измерения сенсора. Затем было проведено осреднение за время проведения каждого эксперимента. Были осреднены значения теплопроводности (K), объемной теплоемкости (C), температуропроводности (D), тепловой инерции (ТИ) для участка с внесением биоугля (табл. 2) и контрольного участка (табл. 3).

Таблица 1. Параметры микроклимата сельскохозяйственного поля: температура воздуха (T_a , °C), относительная влажность воздуха (RH, %), атмосферное давление (P, кПа), скорость ветра (u , м с^{-1}); объемная влажность почвы (W , $\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$); высота растений (h_c , м); проективное покрытие (f_c , -) в даты проведения экспериментов

Table 1. Microclimate parameters of an agricultural field: air temperature (T_a , °C), relative air humidity (RH, %), atmospheric pressure (P, kPa), wind speed (u , m s^{-1}); volumetric soil moisture (W , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); crop height (h_c , m); projective cover (f_c , -) on the experiment's dates

	19.05.	31.05.	09.06.	23.06.	07.07.	21.07.	04.08.
T_a	11.7	15.7	19.5	22.2	20.0	24.2	25.3
RH	57	70	64	45	57	60	51
P	101.3	101.1	100.7	101.0	100.6	101.1	101.7
u	2.0	1.7	2.2	1.7	1.6	2.4	1.3
W	0.19	0.25	0.17	0.18	0.01	0.17	0.26
h_c	-	0.07	0.15	0.30	0.60	0.65	0.65
f_c	0	0.15	0.3	0.6	0.7	0.75	0.7

Таблица 2. Осредненные значения теплофизических свойств пахотного горизонта почвы на опытном участке с внесением биоугля: теплопроводность (K , Вт $m^{-1} K^{-1}$), объемная теплоемкость (C , МДж $m^{-3} K^{-1}$), температуропроводность (D , $mm^2 c^{-1}$), тепловая инерция (ТИ, Дж $m^{-2} K^{-1} c^{-0.5}$)

Table 2. Average values of thermal soil properties on the experimental plot with the biochar application: thermal conductivity (K , $W m^{-1} K^{-1}$), volumetric heat capacity (C , $MJ m^{-3} K^{-1}$), diffusivity (D , $mm^2 s^{-1}$), thermal inertia (ТИ, $J m^{-2} K^{-1} s^{-0.5}$)

Дата	$K_{\text{биоуголь}}$	$C_{\text{биоуголь}}$	$D_{\text{биоуголь}}$	ТИ _{биоуголь}
19.05.2022	0.358	1.072	0.334	619.6
31.05.2022	0.435	1.295	0.336	750.5
09.06.2022	0.245	1.014	0.241	498.2
23.06.2022	0.389	1.189	0.327	679.9
07.07.2022	0.158	0.965	0.164	390.2
21.07.2022	0.505	1.210	0.417	781.6
04.08.2022	1.155	1.840	0.628	1457.8

Таблица 3. Осредненные значения теплофизических свойств пахотного горизонта почвы на контрольном участке: теплопроводность (K , Вт $m^{-1} K^{-1}$), объемная теплоемкость (C , МДж $m^{-3} K^{-1}$), температуропроводность (D , $mm^2 c^{-1}$), тепловая инерция (ТИ, Дж $m^{-2} K^{-1} c^{-0.5}$)

Table 3. Average values of thermal soil properties on the control site: thermal conductivity (K , $W m^{-1} K^{-1}$), volumetric heat capacity (C , $MJ m^{-3} K^{-1}$), diffusivity (D , $mm^2 s^{-1}$), thermal inertia (ТИ, $J m^{-2} K^{-1} s^{-0.5}$)

Дата	$K_{\text{контроль}}$	$C_{\text{контроль}}$	$D_{\text{контроль}}$	ТИ _{контроль}
19.05.2022	0.290	1.057	0.274	553.9
31.05.2022	0.493	1.385	0.356	826.3
09.06.2022	0.394	1.288	0.306	712.5
23.06.2022	0.513	1.355	0.379	833.9
07.07.2022	0.225	1.185	0.190	515.8
21.07.2022	0.618	1.643	0.376	1008.0
04.08.2022	1.06	1.889	0.559	1412.1

Минимальные значения всех теплофизических свойств пахотного горизонта почвы приходятся на засушливый период с минимальной влажностью почвы – 07.07.2022 г. Максимальные значения теплофизических свойств почвы приходятся на 04.08.2022 г., когда наблюдалась максимальная влажность почвы.

Статистический анализ значимости различий теплофизических свойств почвы выполнен с помощью непараметрического U критерия Манна–Уитни–Уилкоксона, так как данные не прошли проверку на нормальность распределения по результатам теста Шапиро–Уилка, а также количество наблюдений в каждой выборке невелико ($n < 30$).

Теплопроводность почвы 07.07.2022 г. на 29.7% меньше на участке с внесением биоугля ($K_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($K_{\text{контроль}}$). Объемная теплоемкость почвы 07.07.2022 г. на 18.5% меньше на участке с внесением биоугля ($C_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($C_{\text{контроль}}$). Температуропроводность почвы 07.07.2022 г. на 13.7% меньше на участке с внесением биоугля ($D_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($D_{\text{контроль}}$). Тепловая инерция почвы 07.07.2022 г. на 24.3% меньше на участке с внесением биоугля ($TI_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($TI_{\text{контроль}}$). Различия между средними значениями теплофизических свойств почвы на участке с внесением биоугля и контрольном участке 07.07.2022 г. статистически значимые ($p\text{-value} < 0.05$) согласно тесту Манна–Уитни–Уилкоксона. Снижение всех теплофизических свойств почвы при внесении биоугля происходит из-за того, что значения теплофизических свойств биоугля меньше, чем соответствующие значения минеральной части твердой фазы почвы ([Liu et al., 2018](#)). При этом внесение биоугля может увеличивать влагоемкость почвы ([Basso et al., 2013](#); [Suliman et al., 2017](#)), особенно на легких почвах, вследствие чего значения некоторых теплофизических свойств почвы при внесении биоугля могут быть и выше, чем без внесения биоугля, что подтверждается результатами измерений теплофизических свойств почвы 04.08.2022 г. после выпадения большого количества осадков. Теплопроводность почвы 04.08.2022 г. на 9.4% больше на участке с внесением биоугля ($K_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($K_{\text{контроль}}$). Объемная теплоемкость почвы 04.08.2022 г. на 2.6% меньше на участке с внесени-

ем биоугля ($C_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($C_{\text{контроль}}$). Температуропроводность почвы 07.07.2022 г. на 12.3% больше на участке с внесением биоугля ($D_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($D_{\text{контроль}}$). Тепловая инерция почвы 04.08.2022 г. на 3.2% больше на участке с внесением биоугля ($TI_{\text{биоуголь}}$), чем на контрольном участке ($TI_{\text{контроль}}$). Различия между средними значениями теплофизических свойств почвы на участке с внесением биоугля и контрольном участке 04.08.2022 г. статистически значимые (p -value < 0.05) согласно тесту Манна–Уитни–Уилкоксона.

Биоуголь, изменяя теплофизические свойства почвы, может влиять на составляющие энергетического баланса и суммарное испарение через уменьшение отраженной радиации ([Genesis, 2012](#)), увеличение собственного излучения Земли ([Genesis, 2012](#)), увеличение температуры подстилающей поверхности ([Feng et al., 2021](#)), а также снижение испарения с поверхности почвы ([Wang et al., 2018](#)). В таблицах 4 и 5 приведены оценки влияния биоугля на составляющие энергетического баланса и суммарное испарение.

Таблица 4. Составляющие энергетического баланса (радиационный баланс (R_n , Вт м⁻²), турбулентный поток тепла (H , Вт м⁻²), поток тепла в почву (G , Вт м⁻²), скрытый поток тепла (LE , Вт м⁻²) и суммарное испарение (ET , мм час⁻¹) на опытном участке с внесением биоугля

Table 4. Energy balance components (radiation balance (R_n , W m⁻²), turbulent heat flux (H , W m⁻²), soil heat flux (G , W m⁻²), latent heat flux (LE , W m⁻²) and evapotranspiration (ET , mm h⁻¹) on the experimental plot with the biochar application

Дата	R_n биоуголь	H биоуголь	G биоуголь	LE биоуголь	ET биоуголь
19.05.2022	204.8	163.1	64.5	13.7	0.02
31.05.2022	336.3	76.1	92.6	168.1	0.25
09.06.2022	324.6	151.0	76.5	106.8	0.16
23.06.2022	404.3	144.7	63.1	197.0	0.29
07.07.2022	301.13	164.6	39.0	114.8	0.17
21.07.2022	446.0	82.7	51.9	311.5	0.46
04.08.2022	483.7	25.5	62.6	395.6	0.58

Анализ результатов определения составляющих энергетического баланса над участком с внесением биоугля и контрольным участком показал:

1) Радиационный баланс на участке с внесением биоугля (R_n биоуголь), по сравнению с радиационным балансом на контрольном участке (R_n контроль), в среднем уменьшился на 2.5%. Среднее значение для R_n биоуголь = 360.0 Вт м⁻², для R_n контроль = 369.2 Вт м⁻². Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений (p-value > 0.1) свидетельствует об отсутствии достоверных различий средних значений R_n биоуголь и R_n контроль.

Таблица 5. Составляющие энергетического баланса (радиационный баланс (R_n , Вт м⁻²), турбулентный поток тепла (H , Вт м⁻²), поток тепла в почву (G , Вт м⁻²), скрытый поток тепла (LE , Вт м⁻²)) и суммарное испарение (ET , мм час⁻¹) на контрольном участке

Table 5. Energy balance components (radiation balance (R_n , W m⁻²), turbulent heat flux (H , W m⁻²), soil heat flux (G , W m⁻²), latent heat flux (LE , W m⁻²)) and evapotranspiration (ET , mm h⁻¹) on the control plot

Дата	R_n контроль	H контроль	G контроль	LE контроль	ET контроль
19.05.2022	215.7	125.1	67.9	31.3	0.05
31.05.2022	343.7	53.3	94.6	195.8	0.29
09.06.2022	335.6	106.3	79.0	151.1	0.22
23.06.2022	426.0	81.3	66.5	278.2	0.41
07.07.2022	310.9	135.5	40.3	140.3	0.21
21.07.2022	446.6	80.5	51.9	314.2	0.46
04.08.2022	485.5	21.5	62.9	401.1	0.59

2) Турбулентный поток тепла над участком с биоуглем (H биоуголь), по сравнению с турбулентным потоком тепла над контрольным участком (H контроль), в среднем увеличился на 35.5%. Среднее значение для H биоуголь = 113.5 Вт м⁻², для H контроль = 83.8 Вт м⁻². Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений

(p -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений $H_{\text{биоуголь}}$ и $H_{\text{контроль}}$.

3) Поток тепла в почву на участке с биоуглем ($G_{\text{биоуголь}}$), по сравнению с потоком тепла в почву на контрольном участке ($G_{\text{контроль}}$), в среднем уменьшился на 2.8%. Среднее значение для $G_{\text{биоуголь}} = 66.1 \text{ Вт м}^{-2}$, для $G_{\text{контроль}} = 68.0 \text{ Вт м}^{-2}$. Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений (p -value > 0.1) свидетельствует об отсутствии достоверных различий средних значений $G_{\text{контроль}}$.

4) Скрытый поток тепла над участком с биоуглем ($LE_{\text{биоуголь}}$), по сравнению со скрытым потоком тепла над контрольным участком ($LE_{\text{контроль}}$), в среднем уменьшился на 17.0%. Среднее значение для $LE_{\text{биоуголь}} = 180.5 \text{ Вт м}^{-2}$, для $LE_{\text{контроль}} = 217.5 \text{ Вт м}^{-2}$. Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений (p -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений $LE_{\text{биоуголь}}$ и $LE_{\text{контроль}}$.

5) Суммарное испарение над участком с биоуглем ($ET_{\text{биоуголь}}$), по сравнению с суммарным испарением над контрольным участком ($ET_{\text{контроль}}$), в среднем уменьшилось на 13.9%. Среднее значение для $ET_{\text{биоуголь}} = 0.28 \text{ мм час}^{-1}$, для $ET_{\text{контроль}} = 0.32 \text{ мм час}^{-1}$. Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений (p -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений $ET_{\text{биоуголь}}$ и $ET_{\text{контроль}}$.

Увеличение турбулентного потока тепла над участком с внесением биоугля ($H_{\text{биоуголь}}$) происходит из-за увеличения температуры подстилающей поверхности на участке с внесением биоугля (рис. 2). Особенно ярко различия температуры подстилающей поверхности проявляются в начале и середине периода вегетации. Различия в турбулентном потоке тепла обусловлены более высокой температурой подстилающей поверхности с внесением биоугля. Средняя температура подстилающей поверхности на участке с биоуглем составила $25.9 \text{ }^\circ\text{C}$, на контрольном участке – $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$ (увеличение температуры подстилающей поверхности на участке с биоуглем на 6.4% по сравнению с контролем). Увеличение турбулентного потока тепла может также происходить из-за умень-

шения теплопроводности почвы, так как радиационный баланс будет в большей мере расходоваться на передачу энергии от подстилающей поверхности к атмосфере, чем на передачу энергии вглубь почвы.

Биоуголь обладает меньшей отражательной способностью (альбедо) по сравнению с почвой ([Genesio, 2012](#)), но при этом биоуголь увеличивает собственное излучение вследствие увеличения температуры подстилающей поверхности. В результате два противоположных потока радиационного баланса компенсируют друг друга и значимых различий средних значений радиационного баланса на участке с внесением биоугля ($R_{п \text{ биоуголь}}$) и контрольном участке ($R_{п \text{ контроль}}$) обнаружено не было.

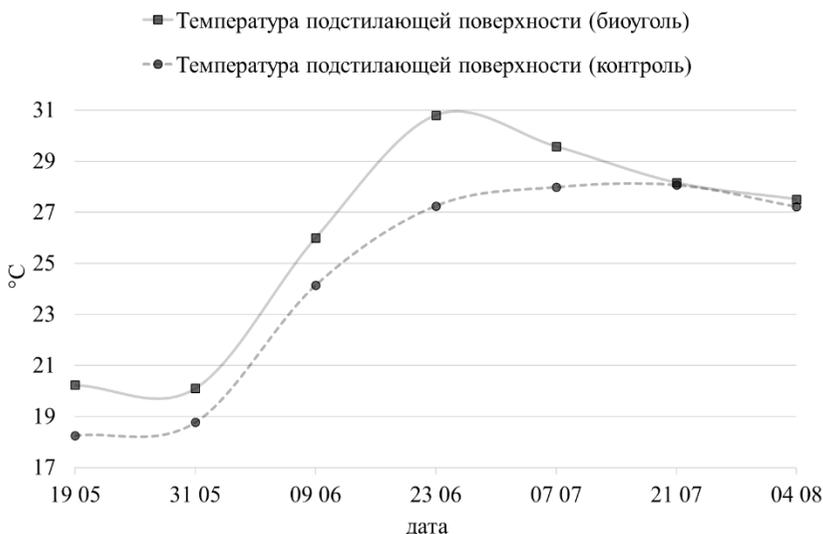


Рис. 2. Температура подстилающей поверхности (°C) на участке с внесением биоугля и на контрольном участке.

Fig. 2. Crop surface temperature (°C) at the plot with biochar application and at the control plot.

Поток тепла в почву сильно зависит от теплофизических свойств почвы, при уменьшении теплопроводности поток тепла в

почву уменьшается, однако увеличение температуры поверхности почвы будет приводить к увеличению потока тепла в почву. Таким образом, изменение потока тепла в почву при внесении биоугля будет определяться соотношением влияния вышеперечисленных факторов. В настоящей работе оценка потока тепла в почву связана с радиационным балансом, и значимых различий в потоке тепла в почву на участке с внесением биоугля ($G_{\text{биоуголь}}$) и контрольном участке ($G_{\text{контроль}}$) также обнаружено не было.

Скрытый поток тепла (LE) и суммарное испарение (ET) уменьшались при внесении биоугля, вероятно, из-за снижения испарения почвы ([Wang et al., 2018](#)), а не из-за снижения транспирации. Для проверки данного предположения был проведен анализ температуры листьев растений с помощью тепловизионных изображений, так как температура листьев сильно связана с транспирацией растений ([Gates, 1968](#)). В таблице 6 представлены результаты обработки снимков тепловизионной камеры Testo 868, в таблице 6 представлена температура листьев на участке с внесением биоугля ($T_{\text{с биоуголь}}$) и на контрольном участке ($T_{\text{с контроль}}$). Согласно критерию Манна–Уитни–Уилкоксона значимых различий между температурой листьев на участке с внесением биоугля и на контрольном участке обнаружено не было ($p\text{-value} > 0.1$). На рисунке 3 представлен пример съемки тепловизионной камеры 23.06.2022 г. для участка с внесением биоугля и на контрольном участке.

Таблица 6. Температура листьев растений ($T_{\text{с}}$, °C) на участке с внесением биоугля и контрольном участке в даты проведения экспериментов

Table 6. Leaf temperature ($T_{\text{с}}$, °C) on the plot with the biochar application and on the control plot on the experiment's dates

	31.05.	09.06.	23.06.	07.07.	21.07.	04.08.
Время съемки	11:57	12:03	11:54	11:29	13:14	12:34
$T_{\text{с биоуголь}}$	16.7	26.3	27.1	23.1	31.7	29.9
$T_{\text{с контроль}}$	17.0	26.4	27.4	23.2	31.4	30.3

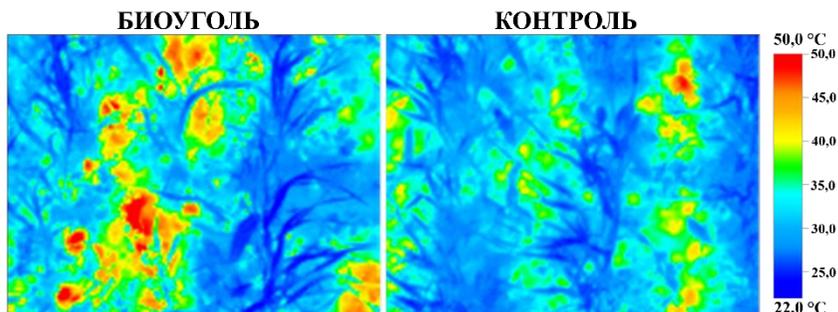


Рис. 3. Тепловое изображение участка с внесением биоугля (слева) и контрольного участка (справа) 23.06.2022 г.

Fig. 3. Thermal image of the plot with the biochar application (left) and the control plot (right) on June 23, 2022.

Интегральная температура подстилающей поверхности по съемке тепловизионной камерой 23.06.2022 г. в 11:54 равна 31.9 °С для участка с внесением биоугля и 30.4 °С для контрольного участка. Снижение собственного испарения почвы при внесении биоугля может быть вызвано изменением структуры почвы и изменением ее гидрофизических и теплофизических свойств. Биоуголь увеличивает количество микропор, которые имеют плохую влагопроводность. В результате чего снижается влагоперенос из нижележащих слоев к поверхности почвы ([Wang et al., 2018](#)).

В настоящее время активно развивается направление определения влажности почвы и влагообеспеченности растений по результатам оценки тепловой инерции с помощью данных дистанционного зондирования Земли и тепловизионных съемок с беспилотных летательных аппаратов ([Lu et al., 2009](#); [Soliman et al., 2013](#); [Qin et al., 2013](#)). На рисунке 4 представлены следующие регрессионные зависимости: зависимость между тепловой инерцией на участке с биоуглем ($TI_{\text{биоуголь}}$) и объемной влажностью почвы ($W_{\text{биоуголь}}$); между тепловой инерцией на участке с биоуглем ($TI_{\text{биоуголь}}$) и суммарным испарением ($ET_{\text{биоуголь}}$); между тепловой инерцией на контрольном участке ($TI_{\text{контроль}}$) и суммарным испарением на контрольном участке ($ET_{\text{контроль}}$). Ниже представлены

значения параметров моделей взаимосвязи теплофизических свойств пахотного горизонта почвы (теплопроводность (K), объемная теплоемкость (C) и температуропроводность (D)) и тепловой инерции (ТИ) с объемной влажностью почвы (W) и суммарным испарением (ET), а также их коэффициенты детерминации (R^2) с p -уровнем значимости (p -value):

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и теплопроводности для участка с внесением биоугля ($W_{\text{биоуголь}} \sim K_{\text{биоуголь}}$):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.16599 \times K_{\text{биоуголь}} + 0.09877 \quad (R^2 = 0.32, p\text{-value} = 0.107)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для участка с внесением биоугля ($ET_{\text{биоуголь}} \sim K_{\text{биоуголь}}$):

$$ET_{\text{биоуголь}} = 0.47346 \times K_{\text{биоуголь}} + 0.05623 \quad (R^2 = 0.59, p\text{-value} = 0.027)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для контрольного участка ($ET_{\text{контроль}} \sim K_{\text{контроль}}$):

$$ET_{\text{контроль}} = 0.58317 \times K_{\text{контроль}} + 0.01924 \quad (R^2 = 0.75, p\text{-value} = 0.007)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и объемной теплоемкости для участка с внесением биоугля ($W_{\text{биоуголь}} \sim C_{\text{биоуголь}}$):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.19047 \times C_{\text{биоуголь}} - 0.05788 \quad (R^2 = 0.36, p\text{-value} = 0.09)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и объемной теплоемкости для участка с внесением биоугля ($ET_{\text{биоуголь}} \sim C_{\text{биоуголь}}$):

$$ET_{\text{биоуголь}} = 0.5250 \times C_{\text{биоуголь}} - 0.3682 \quad (R^2 = 0.59, p\text{-value} = 0.026)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и объемной теплоемкости для контрольного участка ($ET_{\text{контроль}} \sim C_{\text{контроль}}$):

$$ET_{\text{контроль}} = 0.60799 \times C_{\text{контроль}} - 0.53279 \quad (R^2 = 0.88, p\text{-value} = 0.001)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и температуропроводности для участка с внесением биоугля ($W_{\text{биоуголь}} \sim D_{\text{биоуголь}}$):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.41111 \times D_{\text{биоуголь}} + 0.03200 \quad (R^2 = 0.45, p\text{-value} = 0.059)$$

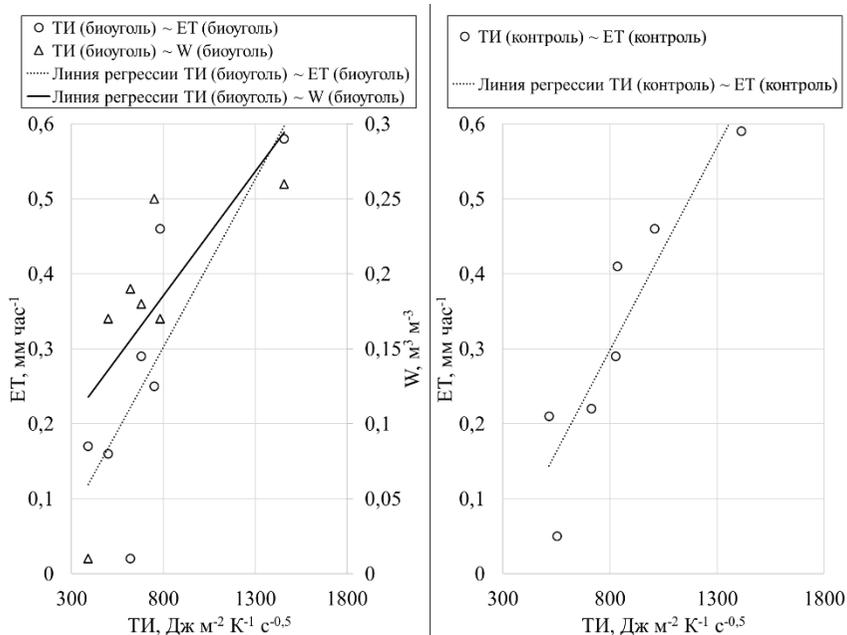


Рис. 4. Регрессионные линии взаимосвязи тепловой инерции (ТИ, Дж м⁻² К⁻¹ с^{-0.5}) с суммарным испарением (ЕТ, мм час⁻¹) и с объемной влажностью почвы (W , м³ м⁻³) для участка с внесением биоугля (слева) и для контрольного участка (справа).

Fig. 4. Regression lines between thermal inertia (ТИ, J m⁻² K⁻¹ s^{-0.5}) and evapotranspiration (ЕТ, mm h⁻¹), and soil volumetric moisture (W , m³ m⁻³) for the plot with the biochar application (left) and for the control plot (right).

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для участка с внесением биоугля ($ET_{\text{биоуголь}} \sim D_{\text{биоуголь}}$):

$$ET_{\text{биоуголь}} = 1.03178 \times D_{\text{биоуголь}} - 0.08497 \quad (R^2 = 0.56, \text{ p-value} = 0.032)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для контрольного участка ($ET_{\text{контроль}} \sim D_{\text{контроль}}$):

$$ET_{\text{контроль}} = 1.3371 \times D_{\text{контроль}} - 0.1475 \quad (R^2 = 0.66, \text{ p-value} = 0.017)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и тепловой инерции для участка с внесением биоугля ($W_{\text{биоуголь}} \sim TI_{\text{биоуголь}}$):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.0001654 \times \text{ТИ}_{\text{биоуголь}} + 0.0533856 \quad (R^2 = 0.38, \text{p-value} = 0.08)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и тепловой инерции для участка с внесением биоугля ($\text{ET}_{\text{биоуголь}} \sim \text{ТИ}_{\text{биоуголь}}$):

$$\text{ET}_{\text{биоуголь}} = 0.0004479 \times \text{ТИ}_{\text{биоуголь}} - 0.0555895 \quad (R^2 = 0.59, \text{p-value} = 0.026)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и тепловой инерции для контрольного участка ($\text{ET}_{\text{контроль}} \sim \text{ТИ}_{\text{контроль}}$):

$$\text{ET}_{\text{контроль}} = 0.0005430 \times \text{ТИ}_{\text{контроль}} - 0.1361763 \quad (R^2 = 0.81, \text{p-value} = 0.003).$$

Данные регрессионные модели могут найти применение при определении влажности пахотного горизонта почвы на начало вегетации и суммарного испарения, данные величины являются крайне важными при моделировании роста и развития растительности ([Steduto et al., 2009](#)). Однако для построения более полных и точных моделей необходимо провести дополнительные полевые и лабораторные измерения с ненарушенными почвенными образцами во всем диапазоне изменения влажности исследуемой почвы, так как взаимосвязь теплофизических свойств с влажностью почвы и суммарным испарением не является линейной, если рассматривать весь диапазон изменений влажности почвы ([Qin et al., 2013](#)).

ВЫВОДЫ

В целом анализ показал:

1. Внесение биоугля в условиях влажности почвы в абсолютно сухом состоянии (объемная влажность почвы $W = 0.01 \text{ м}^3 \text{ м}^3$) уменьшило на 29.7% ($p < 0.05$) теплопроводность, уменьшило на 18.5% ($p < 0.05$) объемную теплоемкость, уменьшило на 13.7% ($p < 0.05$) температуропроводность, уменьшило на 24.3% ($p < 0.05$) тепловую инерцию пахотного горизонта супесчаной дерново-подзолистой почвы.

2. Внесение биоугля при значениях влажности почвы, соответствующей наименьшей влагоемкости (объемная влажность почвы $W = 0.26 \text{ м}^3 \text{ м}^3$) увеличило на 9.4% ($p < 0.05$) теплопровод-

ность, уменьшило на 2.6% ($p < 0.05$) объемную теплоемкость, увеличило на 12.3% ($p < 0.05$) температуропроводность, увеличило на 3.2% ($p < 0.05$) тепловую инерцию пахотного горизонта супесчаной дерново-подзолистой почвы.

3. Внесение биоугля незначимо ($p > 0.1$) уменьшило радиационный баланс и поток тепла в почву, значимо ($p < 0.05$) увеличило на 35.5% турбулентный поток тепла, значимо ($p < 0.05$) уменьшило на 17.0% скрытый поток тепла, значимо ($p < 0.05$) уменьшило на 13.9% суммарное испарение.

4. Внесение биоугля значимо ($p < 0.05$) на 6.4% увеличило температуру подстилающей поверхности.

5. Внесение биоугля не оказало значимых ($p > 0.1$) изменений на температуру листьев растений.

Линейные регрессионные модели показали более тесную взаимосвязь теплофизических свойств почвы с суммарным испарением, чем с объемной влажностью почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мусеев К.Г., Зинчук Е.Г.* Крупномасштабная почвенная карта Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии // Агрофизика. 2014. Т. 3. № 15. С. 8–17.
2. *Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C.* Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter // Soil science society of America Journal. 2000. Vol. 64. No. 4. P. 1285–1290.
3. *Archontoulis S.V., Huber I., Miguez F.E., Thorburn P.J., Rogovska N., Laird D.A.* A model for mechanistic and system assessments of biochar effects on soils and crops and trade-offs // Gcb Bioenergy. 2016. Vol. 8. No. 6. P. 1028–1045.
4. *Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P.* Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. No. 4. P. 816–824.
5. *Basso A.S., Miguez F.E., Laird D.A., Horton R., Westgate M.* Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils // Gcb Bioenergy. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 132–143.
6. *Bennett L.T., Judd T.S., Adams M.A.* Close-range vertical photography for measuring cover changes in perennial grasslands // Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives. 2000. Vol. 53. No. 6. P. 634–641.

7. *Brunetti C., Lamb J., Wielandt S., Uhlemann S., Shirley I., McClure P., Dafflon B.* Probabilistic estimation of depth-resolved profiles of soil thermal diffusivity from temperature time series // *Earth Surface Dynamics*. 2022. Vol. 10. No. 4. P. 687–704.
8. *Brutsaert W.* On a derivable formula for long- wave radiation from clear skies // *Water resources research*. 1975. Vol. 11. No. 5. P. 742–744.
9. *Bruun E.W., Hauggaard-Nielsen H., Ibrahim N., Egsgaard H., Ambus P., Jensen P.A., Dam-Johansen K.* Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. No. 3. P. 1182–1189.
10. *Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Hanley K., Enders A., Lehmann J.* Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? // *Scientific reports*. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 1–7.
11. *Cheng C.H., Lehmann J., Engelhard M.H.* Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Vol. 72. No. 6. P. 1598–1610.
12. *Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J.* Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1987. Vol. 39. No. 4. P. 283–297.
13. *De Vries D.A.* *Thermal Properties of Soils*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963. 151 p.
14. *Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva, L.V.* Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex // *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 1. P. 133–137.
15. *Feng W., Yang F., Cen R., Liu J., Qu Z., Miao Q., Chen H.* Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 277. P.111331.
16. *Foken T.* *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Berlin: Springer Nature, 2021. 1806 p.
17. *Gates D.M.* Transpiration and leaf temperature // *Annual Review of Plant Physiology*. 1968. Vol. 19. No. 1. P. 211–238.
18. *Genesio L.O., Miglietta F.R., Lugato E., Baronti S., Pieri M., Vaccari F.P.* Surface albedo following biochar application in durum wheat // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 014025.
19. *Grossman J.M., O'Neill B.E., Tsai S.M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J.E.* Amazonian anthrosols support similar microbial communities that

differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy // *Microbial ecology*. 2010. Vol. 60. No. 1. P. 192–205.

20. *He H., Dyck M.F., Horton R., Ren T., Bristow K.L., Lv J., Si B.* Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements // *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56. No. 4. P. 567–620.

21. *Jiang C., Yu G., Li Y., Cao G., Yang Z., Sheng W., Yu W.* Nutrient resorption of coexistence species in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau explains plant adaptation to nutrient-poor environment // *Ecological Engineering*. 2012. Vol. 44. P. 1–9.

22. *Jones H.G., Leinonen I.* Thermal imaging for the study of plant water relations // *Journal of Agricultural Meteorology*. 2003. Vol. 59. No. 3. P. 205–217.

23. *Joseph S.D., Camps-Arbestain M., Lin Y., Munroe P., Chia C.H., Hook J., Van Zwieten L., Kimber S., Cowie A., Singh B.P., Lehmann J.* An investigation into the reactions of biochar in soil // *Soil Research*. 2010. Vol. 48. No. 7. P. 501–515.

24. *Kammann C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.W., Conte P., Joseph S.* Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar // *Scientific reports*. 2015. Vol. 5. No. 1. P.1–13.

25. *Khanal S., Fulton J., Shearer S.* An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 139. P. 22–32.

26. *Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil // *Geoderma*. 2010. Vol. 158. No. 3–4. P. 443–449.

27. *Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.* Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review // *Mitigation and adaptation strategies for global change*. 2006. Vol. 11. No. 2. P. 403–427.

28. *Lehmann J., Joseph S.* Biochar for environmental management *Science and Technology*. London: Earthscan, 2015. 438 p.

29. *Liang B., Lehmann J., Sohi S.P., Thies J.E., O'Neill B., Trujillo L., Gaunt J., Solomon D., Grossman J., Neves E.G., Luizão F.J.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil // *Organic Geochemistry*. 2010. Vol. 41. No. 2. P. 206–213.

30. *Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils // *Soil science society of America journal*. 2006. Vol. 70. No. 5. P. 1719–1730.

31. *Lin Y., Munroe P., Joseph S., Henderson R., Ziolkowski A.* Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars // *Chemosphere*. 2012. Vol. 87. No. 2. P. 151–157.
32. *Liu S., Lu L., Ma D., Jia L.* Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements // *Hydrology and earth system sciences*. 2007. Vol. 11. No. 2. P. 769–783.
33. *Liu Z., Xu J., Li X., Wang J.* Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China // *Geoderma*. 2018. Vol. 323. P. 41–51.
34. *Lu S., Ju Z., Ren T., Horton R.* A general approach to estimate soil water content from thermal inertia // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2009. Vol. 149. No. 10. P. 1693–1698.
35. *Major J., Rondon M., Molina D., Riha S. J., Lehmann J.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol // *Plant and soil*. 2010. Vol. 333. No. 1. P. 117–128.
36. *Oguntunde P.G., Fosu M., Ajayi A.E., Van De Giesen N.* Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil // *Biology and Fertility of soils*. 2004. Vol. 39. No. 4. P. 295–299.
37. *Pietikäinen J., Kiikkilä O., Fritze H.* Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus // *Oikos*. 2000. Vol. 89. No. 2. P. 231–242.
38. *Qin J., Yang K., Lu N., Chen Y., Zhao L., Han M.* Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 138. P. 1–9.
39. *Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C.I.* Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil // *Agriculture*. 2015. Vol. 5. No. 3. P. 723–741.
40. *Sohi S.P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R.* A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in agronomy*. 2010. Vol. 105. P. 47–82.
41. *Soliman A., Heck R.J., Brenning A., Brown R., Miller S.* Remote sensing of soil moisture in vineyards using airborne and ground-based thermal inertia data // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. No. 8. P. 3729–3748.
42. *Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E.* AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles // *Agronomy Journal*. 2009. Vol. 101. No. 3. P. 426–437.
43. *Steiner C., Das K.C., Garcia M., Förster B., Zech W.* Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol // *Pedobiologia*. 2008. Vol. 51. No. 5–6. P. 359–366.
44. *Su Z.* The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes // *Hydrology and earth system sciences*. 2002. Vol. 6. No. 1. P. 85–100.

45. *Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M.* The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 574. P. 139–147.
46. *Usowicz B., Lipiec J., Lukowski M., Marczewski W., Usowicz J.* The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 164. P. 45–51.
47. *Uzoma K.C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Nishihara E.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition // *Soil use and management*. 2011. Vol. 27. No. 2. P. 205–212.
48. *Visconti F., de Paz J.M., Martinez D., Molina M.J.* Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils // *Agricultural Water Management*. 2014. Vol. 132. P. 111–119.
49. *Wang T., Stewart C.E., Sun C., Wang Y., Zheng J.* Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils // *Catena*. 2018. Vol. 162. P. 29–39.
50. *Zhang A., Cui L., Pan G., Li L., Hussain Q., Zhang X., Zheng J., Crowley D.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China // *Agriculture, ecosystems & environment*. 2010. Vol. 139. No. 4. P. 469–475.
51. *Zhang H., Voroney R.P., Price G.W.* Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 83. P. 19–28.
52. *Zhang Q., Wang Y., Wu Y., Wang X., Du Z., Liu X., Song J.* Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature // *Soil Science Society of America Journal*. 2013. Vol. 77. No. 5. P. 1478–1487.
53. *Zhao J., Ren T., Zhang Q., Du Z., Wang Y.* Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain // *Soil Science Society of America Journal*. 2016. Vol. 80. No. 5. P. 1157–1166.
54. *Zhao W., Dong X., Wu Z., Wei C., Li L., Yu D., Fan X., Ma Y.* Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status // *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 615. P. 128671.
55. *Zhou Z., Majeed Y., Naranjo G.D., Gambacorta E.M.* Assessment for crop water stress with infrared thermal imaging in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. P. 106019.

REFERENCES

1. Moiseev K.G., Zinchuk E.G., Krupnomasshtabnaja pochvennaja karta Men'kovskogo filiala Agrofizicheskogo instituta Rossel'hozakademii (Large-scale soil map of menkovo research station of the agrophysical research institute), *Agrofizika*, 2014, Vol. 3, No. 15, pp. 8–17.
2. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C., Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter, *Soil science society of America Journal*, 2000, Vol. 64, No. 4, pp. 1285–1290.
3. Archontoulis S.V., Huber I., Miguez F.E., Thorburn P.J., Rogovska N., Laird D.A., A model for mechanistic and system assessments of biochar effects on soils and crops and trade-offs, *Gcb Bioenergy*, 2016, Vol. 8, No. 6, pp. 1028–1045.
4. Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P., Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments, *Journal of Soils and Sediments*, 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 816–824.
5. Basso A.S., Miguez F.E., Laird D.A., Horton R., Westgate M., Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils, *Gcb Bioenergy*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 132–143.
6. Bennett L.T., Judd T.S., Adams M.A., Close-range vertical photography for measuring cover changes in perennial grasslands, *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 2000, Vol. 53, No. 6, pp. 634–641.
7. Brunetti C., Lamb J., Wielandt S., Uhlemann S., Shirley I., McClure P., Dafflon B., Probabilistic estimation of depth-resolved profiles of soil thermal diffusivity from temperature time series, *Earth Surface Dynamics*, 2022, Vol. 10, No. 4, pp. 687–704.
8. Brutsaert W., On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, *Water resources research*, 1975, Vol. 11, No. 5, pp. 742–744.
9. Bruun E.W., Hauggaard-Nielsen H., Ibrahim N., Egsgaard H., Ambus P., Jensen P.A., Dam-Johansen K., Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil, *Biomass and Bioenergy*, 2011, Vol. 35, No. 3, pp. 1182–1189.
10. Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Hanley K., Enders A., Lehmann J., Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? *Scientific reports*, 2013, Vol. 3, No. 1, pp. 1–7.

11. Cheng C.H., Lehmann J., Engelhard M.H., Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, Vol. 72, No. 6, pp. 1598–1610.
12. Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J., Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, Vol. 39, No. 4, pp. 283–297.
13. De Vries D.A., *Thermal Properties of Soils*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963, 151 p.
14. Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V., Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex, *Water resources*, 2018, Vol. 45, No. 1, pp. 133–137.
15. Feng W., Yang F., Cen R., Liu J., Qu Z., Miao Q., Chen H., Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn, *Journal of Environmental Management*, 2021, Vol. 277, pp. 111331.
16. Foken T., *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*, Berlin: Springer Nature, 2021, 1806 p.
17. Gates D.M., Transpiration and leaf temperature, *Annual Review of Plant Physiology*, 1968, Vol. 19, No. 1, pp. 211–238.
18. Genesio L.O., Miglietta F.R., Lugato E., Baronti S., Pieri M., Vaccari F.P., Surface albedo following biochar application in durum wheat, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 014025.
19. Grossman J.M., O'Neill B.E., Tsai S.M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J.E., Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy, *Microbial ecology*, 2010, Vol. 60, No. 1, pp. 192–205.
20. He H., Dyck M.F., Horton R., Ren T., Bristow K.L., Lv J., Si B., Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements, *Reviews of Geophysics*, 2018, Vol. 56, No. 4, pp. 567–620.
21. Jiang C., Yu G., Li Y., Cao G., Yang Z., Sheng W., Yu W., Nutrient resorption of coexistence species in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau explains plant adaptation to nutrient-poor environment, *Ecological Engineering*, 2012, Vol. 44, pp. 1–9.
22. Jones H.G., Leinonen I., Thermal imaging for the study of plant water relations, *Journal of Agricultural Meteorology*, 2003, Vol. 59, No. 3, pp. 205–217.
23. Joseph S.D., Camps-Arbestain M., Lin Y., Munroe P., Chia C.H., Hook J., Van Zwieten L., Kimber S., Cowie A., Singh B.P., Lehmann J., An

investigation into the reactions of biochar in soil, *Soil Research*, 2010, Vol. 48, No. 7, pp. 501–515.

24. Kammann C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.W., Conte P., Joseph S., Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar, *Scientific reports*, 2015, Vol. 5, No. 1, pp. 1–13.

25. Khanal S., Fulton J., Shearer S., An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, Vol. 139, pp. 22–32.

26. Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L., Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil, *Geoderma*, 2010, Vol. 158, No. 3–4, pp. 443–449.

27. Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 2006, Vol. 11, No. 2, pp. 403–427.

28. Lehmann J., Joseph S., *Biochar for environmental management Science and Technology*, London: Earthscan, 2015, 438 p.

29. Liang B., Lehmann J., Sohi S.P., Thies J.E., O'Neill B., Trujillo L., Gaunt J., Solomon D., Grossman J., Neves E.G., Luizão F.J., Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil, *Organic Geochemistry*, 2010, Vol. 41, No. 2, pp. 206–213.

30. Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G., Black carbon increases cation exchange capacity in soils, *Soil science society of America journal*, 2006, Vol. 70, No. 5, pp. 1719–1730.

31. Lin Y., Munroe P., Joseph S., Henderson R., Ziolkowski A., Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars, *Chemosphere*, 2012, Vol. 87, No. 2, pp. 151–157.

32. Liu S., Lu L., Ma, D., Jia L., Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements, *Hydrology and earth system sciences*, 2007, Vol. 11, No. 2, pp. 769–783.

33. Liu Z., Xu J., Li X., Wang J., Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China, *Geoderma*, 2018, Vol. 323, pp. 41–51.

34. Lu S., Ju Z., Ren T., Horton R., A general approach to estimate soil water content from thermal inertia, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, Vol. 149, No. 10, pp. 1693–1698.

35. Major J., Rondon M., Molina D., Riha S.J., Lehmann J., Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol, *Plant and soil*, 2010, Vol. 333, No. 1, pp. 117–128.

36. Oguntunde P.G., Fosu M., Ajayi A.E., Van De Giesen N., Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil, *Biology and Fertility of soils*, 2004, Vol. 39, No. 4, pp. 295–299.
37. Pietikäinen J., Kiikkilä O., Fritze H., Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus, *Oikos*, 2000, Vol. 89, No. 2, pp. 231–242.
38. Qin J., Yang K., Lu N., Chen Y., Zhao L., Han M., Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 138, pp. 1–9.
39. Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C.I., Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil, *Agriculture*, 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 723–741.
40. Sohi S. P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R., A review of biochar and its use and function in soil, *Advances in agronomy*, 2010, Vol. 105, pp. 47–82.
41. Soliman A., Heck R.J., Brenning A., Brown R., Miller S., Remote sensing of soil moisture in vineyards using airborne and ground-based thermal inertia data, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, No. 8, pp. 3729–3748.
42. Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E., AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles, *Agronomy Journal*, 2009, Vol. 101, No. 3, pp. 426–437.
43. Steiner C., Das K.C., Garcia M., Förster B., Zech W., Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol, *Pedobiologia*, 2008, Vol. 51, No. 5–6, pp. 359–366.
44. Su Z., The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrology and earth system sciences*, 2002, Vol. 6, No. 1, pp. 85–100.
45. Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M., The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 574, pp. 139–147.
46. Usowicz B., Lipiec J., Łukowski M., Marczewski W., Usowicz J., The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow, *Soil and Tillage Research*, 2016, Vol. 164, pp. 45–51.
47. Uzoma K.C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Nishihara E., Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition, *Soil use and management*, 2011, Vol. 27, No. 2, pp. 205–212.
48. Visconti F., de Paz J.M., Martinez D., Molina M.J., Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating

the water content of irrigated soils, *Agricultural Water Management*, 2014, Vol. 132, pp. 111–119.

49. Wang T., Stewart C.E., Sun C., Wang Y., Zheng J., Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils, *Catena*, 2018, Vol. 162, pp. 29–39.

50. Zhang A., Cui L., Pan G., Li L., Hussain Q., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China, *Agriculture, ecosystems & environment*, 2010, Vol. 139, No. 4, pp. 469–475.

51. Zhang H., Voroney R.P., Price G.W., Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations, *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, Vol. 83, pp. 19–28.

52. Zhang Q., Wang Y., Wu Y., Wang X., Du Z., Liu X., Song J., Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature, *Soil Science Society of America Journal*, 2013, Vol. 77, No. 5, pp. 1478–1487.

53. Zhao J., Ren T., Zhang Q., Du Z., Wang Y., Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain, *Soil Science Society of America Journal*, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 1157–1166.

54. Zhao W., Dong X., Wu Z., Wei C., Li L., Yu D., Fan X., Ma Y., Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status, *Journal of Hydrology*, 2022, Vol. 615, pp. 128671.

55. Zhou Z., Majeed Y., Naranjo G.D., Gambacorta E.M., Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, Vol. 182, pp. 106019.

УДК 631.412 : 550.424.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-76-108



Ссылки для цитирования:

Иовчева А.Д., Семенков И.Н. Оценка барьерной функции чернозема и серой почвы в рамках экспериментального загрязнения ионами меди // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 76-108. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-76-108

Cite this article as:

Iovcheva A.D., Semenov I.N., Assessment of the barrier function of Chernozem and Luvisol under their experimental contamination by copper ions, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 76-108, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-76-108

Благодарность:

Авторы выражают благодарность Пинскому Д.Л. за за конструктивные замечания и консультации по вопросам методического и теоретического плана в области физико-химии почв. Полевые исследования выполнены в рамках проекта РНФ № 17- 77-20072.

Acknowledgments:

The authors are grateful to D.L. Pinsky for his constructive comments and consultations on methodological and theoretical issues in the field of soil physics and chemistry. Field studies were carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 17- 77-20072.

Оценка барьерной функции чернозема и серой почвы в рамках экспериментального загрязнения ионами меди¹

© 2023 г. А. Д. Иовчева^{1*}, И. Н. Семенков^{2**}

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Россия,

142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2, стр.2,

*<https://orcid.org/0000-0002-2796-4614>, e-mail: y_nastia@mail.ru.

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

** <https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru.

Поступила в редакцию 16.01.2023, после доработки 25.05.2023,
принята к публикации 27.06.2023

Резюме: Целью работы была сравнительная оценка устойчивости гумусовых горизонтов чернозема квазиглееватого и серой почвы к смоделированному загрязнению медью. Для оценки сорбционной емкости почв и создания необходимых уровней загрязнения в почвы внесена Си в виде растворов ацетатов с концентрацией от 2 до 200 мг/л (что соответствует внесению 20–2 000 мг/кг Си). Показано, что изотермы адсорбции Си достоверно аппроксимируются уравнением Ленгмюра. При этом полученные значения максимальной адсорбции (C_{\max}) и константы Ленгмюра (K_L) для чернозема выше, чем для серой почвы. Это свидетельствует о более высокой поглотительной способности и более прочном удержании сорбированной черноземом Си по сравнению с серой почвой, что связано, по-видимому, с более высоким содержанием и составом органического вещества, тяжелосуглинистым гранулометрическим составом и нейтральным значением pH чернозема. Методом последовательных селективных экстракций установлено, что в незагрязненных почвах более 50% Си находится в прочно связанном состоянии. Оценка распределения Си по фракциям при уровне загрязнения > 200 мг/кг свидетельствует о слабом увеличении содержания биодоступных (обменных и кислоторастворимых) форм металла для чернозема, значительном – для серой почвы при 200 мг/кг. При загрязнении около 2 000 мг/кг Си в обеих почвах преобладают пулы биодоступных и связанных с (гидр)оксидами Fe и Mn форм. Фактор подвижности не превышает 10% для чернозема и 25% для серой почвы в исходном и загрязненном (200 мг/кг) состояниях, что указывает, соответственно, на малую и среднюю биодоступность Си в них. При загрязнении в 2 000 мг/кг фактор подвижности достигает 25% в черноземе и более 40% в серой почве, что свидетельствует о среднем и высоком риске миграции Си в сопредельные среды.

Ключевые слова: поглотительная способность почв, ацетаты меди, последовательное экстрагирование, геохимический барьер, фактор подвижности, контролируемые условия, экологические индикаторы.

Assessment of the barrier function of Chernozem and Luvisol under their experimental contamination by copper ions¹

© 2023 A. D. Iovcheva^{1*}, I. N. Semenov^{2**}

¹*The Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
Russian Academy of Sciences, Russia,
2 Bld. 2 Institutskaya Str., Pushino 142290, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-2796-4614>, e-mail: y_nastia@mail.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru.*

Received 16.01.2023, Revised 25.05.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The aim of the work was to assess the ecological resistance of topsoils of Chernozem and Luvisol to modeled copper contamination. To determine the sorption capacity of soils and to obtain the required levels of contamination the experiment was carried out. Soils were contaminated by the Cu acetate solutions with concentrations from 20 to 200 mg/L, which corresponds to the input of 20–2 000 mg/kg of Cu. Approximation of Cu adsorption isotherms by the Langmuir equation was statistically significant. The obtained values of maximum adsorption (C_{\max}) and Langmuir constant (K_L) for Chernozem were higher than for Luvisol. This indicates a higher adsorption capacity and stronger retention of adsorbed Cu in Chernozem compared with Luvisol. This fact can be explained by the higher content and composition of organic matter, the heavier texture and the neutral pH value of Chernozem. By the method of sequential selective extractions, it was found that in uncontaminated soils, more than 50% of Cu is strongly bounded to silicate fraction (>50%). Assessment of Cu fractionation at different levels of contamination reveals a slight increase in the percentage of Cu bioavailable forms (exchangeable and acid-soluble) in Chernozem at 200 mg/kg and its significant increase in Luvisol at 200 mg/kg. At contamination of about 2 000 mg/kg Cu, both soils are characterised by a predominance of pools of bioavailable and bound to (hydr)oxide of Fe and Mn forms. The mobility factor does not exceed 10% for Chernozem and 25% for Luvisol in the native

¹ *Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.*

and contaminated by 200 mg/kg soils, which indicates low and medium bioavailability of Cu in them, respectively. Contamination by 2 000 mg/kg of Cu increased the mobility factor up to 25% in Chernozem and up to 40% in Luvisol, which means the medium and high risk of Cu migration into the adjacent environments.

Keywords: soil absorption capacity, copper acetates, sequential extraction method, geochemical barrier, mobility factor, control conditions, ecological indicators.

ВВЕДЕНИЕ

Поглотительная способность определяет две важнейшие функции почв. С одной стороны, она является геохимическим барьером на пути миграции различных загрязнителей, в том числе тяжелых металлов (ТМ); с другой – ближайшим резервом биодоступных макро- и микроэлементов, необходимых для развития растений. Сорбционная способность почв – непостоянная величина. Она зависит от состава и свойств почв: содержания органического вещества ($C_{\text{орг}}$), доли тонкодисперсных фракций, pH, насыщенности основаниями и прочих. Вместе с тем буферная емкость почв (способность выполнять протекторные функции) ограничена уровнем ее загрязнения ТМ. Она снижается по мере заполнения сорбционных позиций на поверхности почвенных частиц. Тип адсорбции при этом меняется со специфического на неспецифический, что обеспечивает слабую прочность связи адсорбированных катионов с поверхностью и их высокую способность к обмену ([Kabala, Singh, 2001](#); [Пинский, 2020](#); [Ладонин, 2016](#)). Поэтому важно определять те предельные уровни загрязнения, выше которых почва перестает функционировать как защитный барьер.

Многие ТМ относятся к категории микроэлементов, которые необходимы биоте в малых концентрациях, но токсичны в высоких. Медь является биофильным элементом, участвующим в процессах фотосинтеза, дыхания и фиксации азота в растениях, синтеза гемоглобина у животных ([Ильин, Сысо, 2001](#)). Ее дефицит в сельскохозяйственных культурах приводит снижению их устойчивости к неблагоприятным внешним условиям, ухудшению свойств семян, снижению объема урожая. В то же время Cu является одним из приоритетных для изучения ТМ ([Kabata-Pendias, 2011](#)) и

относится к элементам 2 класса опасности, согласно нормативным документам ([СанПиН 1.2.3685-21](#)).

Основные источники поступления Си в почвы – это горно-добывающие, обогатительные и медеплавильные металлургические предприятия ([Kabata-Pendias, 2011](#); [Barsova et al., 2019](#); [Борисочкина, 2021](#)). Фоновое содержание меди может варьировать от первых десятков мг/кг в почвах лесостепной зоны ([Burachevskaya et al, 2020](#); [Ильин, Сысо, 2001](#); [Борисочкина, 2021](#); [Иовчева и др., 2022](#)) до первых сотен мг/кг в почвах на богатых металлами породах ([Narwal et al, 1999](#); [Kabala, Singh, 2001](#); [Kabata-Pendias, 2011](#); [Опекунова и др., 2017](#); [Semenkov, Koroleva, 2020](#)). При этом содержание меди в загрязненных промышленными предприятиями почвах лесостепной зоны может колебаться от нескольких сотен ([Kabala, Singh, 2001](#); [Burachevskaya et al, 2020](#); [Опекунова и др., 2017](#)) до тысяч мг/кг ([Tatsiy, 2012](#); [Barsova et al., 2019](#)). Лимитирующие показатели содержания меди в почвах разных стран в основном варьируют от первых десятков (16 мг/кг; учитывает риск миграции из почвы в грунтовые воды) для ЮАР до первых сотен (100–300 мг/кг) в почвах Финляндии, России, Чехии и Нидерландов ([Kabata-Pendias, 2011](#); [Barsova et al., 2019](#); [Ильин, Сысо, 2001](#); [Семенов, Королева, 2019](#)). В некоторых странах, согласно Семенову, Королевой ([2019](#)), при нормировании учитывается функциональная зона, поэтому лимитирующие показатели содержания Си могут составлять как первые десятки (Германия, Канада) и сотни (США) мг/кг в почвах селитебных территорий, так и тысячи мг/кг (США, Австралия) в почвах промышленных зон.

Высокая природная вариабельность содержания меди в почвах, часто превышающая как установленные нормативы, так и региональный фон, усложняет оценку экологического состояния конкретного объекта. Кроме того, существующий норматив по содержанию биодоступных форм Си в почве представлен одной цифрой – 3 мг/кг ([СанПиН 1.2.3685-21](#)), в отличие от ОДК, значение которого зависит от рН и гранулометрического состава ([СанПиН 1.2.3685-21](#)). Таким образом, норматив по подвижным формам Си совсем не учитывает разницу в буферности разных почв по отношению к данному металлу ([Ладонин, 2016](#)). Предложенная модель зависимости опасности загрязнения почвы от ее

буферных свойств ([Ильин, Сысо, 2001](#)) до настоящего времени не получила широкого признания. Вклад индивидуальных свойств почв при разработке нормативов содержания в них ТМ и для прогноза экологических рисков можно оценивать количественно, определяя способность почв к удержанию определенной дозы поллютанта ([Sipos, 2009](#)). Для этого необходимо накапливать экспериментальные данные по оценке параметров сорбционной емкости почв разных природных зон.

С другой стороны, для оценки устойчивости почвы к загрязнению необходимо также оценивать прочность удерживания ТМ почвенными компонентами, соотношение их мобильных и связанных форм. С этой целью проводят последовательное или параллельное экстрагирование форм ТМ для понимания механизмов образования различных соединений и качественной оценки их мобильности в почве ([Tessier et al., 1979](#); [Narwal et al., 1999](#); [Gleyzes et al., 2002](#); [Kabala, Singh, 2001](#); [Ghrefat et al., 2012](#); [Ладонин, 2016](#)), что позволяет выделить как самые мобильные или “биодоступные” формы, которые могут поглощаться растениями и мигрировать в грунтовые воды, так и наиболее прочно связанные формы в составе устойчивых почвенных минералов ([Tessier et al., 1979](#); [Burachevskaya et al., 2020](#); [Ладонин, 2016](#)). Высокая доля “биодоступных” соединений ТМ (извлекаемых нейтральными солями и слабокислотными буферными растворами) свидетельствует об опасности их миграции в сопредельные с почвой среды ([Kabala, Singh, 2001](#); [Ghrefat et al., 2012](#); [Barsova et al., 2019](#); [Burachevskaya et al., 2020](#)).

Из форм, выделяемых в рамках процедур последовательного экстрагирования, к “биодоступным” относят – *обменную* фракцию и фракцию *кислоторастворимых* (например, карбонатных) соединений ТМ, которая в том числе может содержать вытесненные из почвы их специфически сорбированные формы ([Narwal et al., 1999](#); [Tessier et al., 1979](#); [Gleyzes et al., 2002](#); [Ладонин, 2016](#)). Фракцию водорастворимых соединений металлов иногда выделяют отдельно, однако зачастую объединяют с обменной, так как содержание обеих в фоновых почвах часто около или ниже предела обнаружения ([Narwal et al., 1999](#); [Kabala, Singh, 2001](#); [Sipos, 2009](#)). Извлекаемые после кислоторастворимой *восстанавливае-*

мая (ТМ, связанные с (гидр)оксидами Fe и Mn) и окисляемая (ТМ, хемосорбированные органическим веществом, а также их трудно-растворимые соли) фракции относительно прочно связаны с почвой, их высвобождение может быть вызвано только кардинальной сменой условий ее функционирования ([Tessier et al., 1979](#); [Narwal et al., 1999](#); [Ладонин, 2016](#)). Для форм, связанных с (гидр)оксидами железа и марганца, – это сдвиг pH в сторону сильноокислой реакции или установление восстановительных условий среды на длительное время. Для форм, связанных с органическим веществом, – это минерализация большей части органического вещества ([Tessier et al., 1979](#); [Gleyzes et al., 2002](#)).

Стоит отметить, что у всех экстракционных методов есть серьезные ограничения: слабая селективность, перераспределение элементов между фазами в процессе экстракции, разнообразие схем и, как следствие, ограниченная сопоставимость данных, полученных различными исследователями ([Narwal et al., 1999](#); [Kabala, Singh, 2001](#); [Ладонин, 2016](#)). Извлекаемая при экстрагировании фракция в первую очередь определяется свойствами экстрагента, его способностью разрушать те или иные связи между элементом и сорбционной позицией или растворять соли ТМ ([Tessier et al., 1979](#); [Narwal et al., 1999](#); [Gleyzes et al., 2002](#); [Burachevskaya et al., 2020](#); [Ладонин, 2016](#)). Однако многие экстрагенты имитируют состав почвенного раствора или корневых экссудатов растений, следовательно, в той или иной степени позволяют оценить порядки поступления биодоступных форм ТМ из почвы в сопредельные среды. В то же время реактивы, используемые для извлечения форм, специфически связанных с (гидр)оксидами Fe, Mn и органическим веществом, крайне отличаются от состава почвенных растворов и грунтовых вод, следовательно, определяют порядки содержания и тип соединений металлов, не представляющих экологического риска в отсутствие выраженного смещения pH и Eh почвы при ее загрязнении ТМ.

Цель данной работы – провести сравнительную оценку устойчивости серой почвы и чернозема квазиглееватого к разным уровням смоделированного в лабораторных условиях загрязнения образцов хорошо растворимыми солями меди.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – гумусовые горизонты (верхние 0–15 см) серой малогумусированной почвы и чернозема квазиглееватого, которые сформировались в пределах лесостепной зоны, в разных климатических и геолого-геоморфологических провинциях. Классификация почв проведена согласно Полевому определителю почв России (2008).

Образцы серой почвы, сформировавшейся под лесной растительностью, отобраны на территории опытно-полевой станции ИФХиБПП РАН (Пушино), расположенной в пределах Среднерусской возвышенности в зоне умеренного климата. Почвообразующие породы – моренные суглинки. Чернозем квазиглееватый сформировался под разнотравно-злаковой растительностью в пределах лесостепной зоны Барабинской равнины в пределах участка, расположенного в 11 км к западу от города Барабинска, в зоне континентального климата. Почвообразующие породы – озерно-аллювиальные суглинки.

Химический анализ основных свойств чернозема проводился в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ, а серой почвы – в ЦКП ПНЦБИ РАН. Были определены величины рН в почвенной суспензии (соотношение почва : дистиллированная вода как 1 : 2.5) потенциометрическим методом в динамических условиях (приборы: “Эксперт-рН” – Россия и Sartorius – Швейцария). Гранулометрический состав чернозема был установлен методом лазерной дифрактометрии (ЛД) на приборе “Analysette-22 MicroTec plus” (Fritsch, Германия). Гранулометрический состав серой почвы был определен методом седиментации по Горбунову (1971). Из-за разницы методик почвы могут быть сопоставимы по грансоставу качественно, исходя из полевого описания почв. Определение содержания органического углерода (C_{org}) в обеих почвах выполнено согласно методу бихроматного окисления с титриметрическим окончанием (Walkley, Black, 1934). Оценка содержания карбонатов (<1%) проведена по отсутствию вскипания в полевых условиях.

В черноземе содержание подвижной формы меди ($Cu_{длб}$) определено ранее (Иовчева и др., 2022) с использованием ацетат-

но-аммонийного буфера (ААБ; рН = 4.8; соотношение почва : раствор – 1 : 5). Общее содержание ТМ с использованием стандартных образцов российских почв измерено рентген-флуоресцентным методом: в черноземе – на анализаторе “Axios” (“PANalytical”, Нидерланды) в ИГЕМ РАН, а в серой почве – на приборе Спектроскан Макс-GV (НПО Спектрон Россия) в ЦКП ПНЦБИ РАН.

В ходе работы проведены эксперименты по сорбции меди образцами исследуемых почв методом серий растворов. Образцы почвы растирали резиновым пестиком и просеивали через сито с диаметром ячеек – 1 мм. Навески серой почвы и чернозема заливали растворами ацетата меди $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ с концентрациями 2, 4, 8, 12, 20, 40, 80, 100, 150 и 200 мг/л (от 0.03 до 3 ммоль/л) при соотношении почва : раствор – 1 : 10, что соответствует концентрации внесенной Cu в интервале 20–2 000 мг/кг. Широкий диапазон вносимых доз элемента позволяет смоделировать переход от допустимых концентраций Cu в нейтральных почвах лесостепи (меньше ОДК = 132 мг/кг) к значениям, характерным для почв, загрязненных промышленными выбросами.

Суспензии встряхивали в течение 4 ч, после чего выдерживали в состоянии покоя в течение 20 ч для достижения равновесия в системе. Затем образцы центрифугировали и фильтровали с помощью вакуумного насоса через мембранный фильтр из ацетата целлюлозы с диаметром пор 45 мкм. Определение содержания Cu в фильтрате (равновесном растворе), проведено методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе “AAAnalyst 400” фирмы PerkinElmer (США) в ЦКП ПНЦБИ РАН. В ходе сорбционного эксперимента фиксировали значения рН исходных растворов ацетатов Cu и равновесных растворов потенциометрическим методом (рН-анализатор фирмы Sartorius, Швейцария). Количество поглощенных катионов рассчитано по разности между содержанием Cu в исходном и в равновесном растворах.

Следует отметить, что поглощение катионов почвой возможно не только на поверхности твердофазных частиц (адсорбция), но и в объеме (абсорбция). Однако считается, во-первых, что адсорбционный механизм вносит основной вклад в общий процесс сорбции металлов почвами. Во-вторых, самые известные уравне-

ния (Лэнгмюра, Фрейндлиха), описывающие перераспределение ионов между твердой и жидкой фазами почвы, выведены для процессов, происходящих на поверхности твердой фазы ([Пинский, 2020](#)). В связи с этим при анализе результатов сорбционного эксперимента авторы далее будут использовать термин “адсорбция”.

Для расчета параметров адсорбции использовали уравнения Лэнгмюра (1) и Фрейндлиха (2):

$$C_{Cu,ads} = \frac{K_L \times C_{max} \times C_{Cu}}{1 + K_L \times C_{Cu}}; \quad (1)$$

$$C_{Cu,ads} = K_F \times C_{Cu}^{\frac{1}{n}}; \quad (2)$$

где $C_{Cu,ads}$ – количество поглощенных катионов (ммоль/кг), C_{Cu} – концентрация катионов в равновесном растворе (ммоль/л).

В уравнении Лэнгмюра: C_{max} – максимальная адсорбция Cu (ммоль/кг) и K_L – константа сродства (л/ммоль). Величина C_{max} характеризует наибольшее возможное, но конечное количество обменных позиций на поверхности адсорбента. K_L отражает прочность закрепления катионов в почве. В уравнении Фрейндлиха K_F характеризует прочность связи сорбтива с сорбентом, а степень $1/n$ – форму изотермы. Таким образом, уравнение Лэнгмюра подразумевает ограниченность поглощения вещества на поверхности частиц, в то время как уравнение Фрейндлиха описывает безграничную адсорбцию. Если почвы описываются одним типом уравнения, то по сопоставлению значений его параметров можно сравнить их способность к поглощению исследуемого катиона.

Для оценки фракционного состава Cu в исходных и загрязненных 200 и 2 000 мг/кг почвах в трехкратной повторности проведено последовательное экстрагирование в соответствии со схемой Tessier et al. (1979), одной из наиболее часто применяемых ([Kabala, Singh, 2001](#); [Gleyzes et al., 2002](#); [Sipos, 2009](#); [Ghrefat et al., 2012](#); [Burachevskaya et al., 2020](#); [Борисочкина, Колчанова, 2021](#)). Выделены фракции (табл. 1): $F1$ – обменная, $F2$ – кислоторастворимая (извлекает как связанные с карбонатами, так и специфически сорбированные формы; [Tessier et al., 1979](#); [Narwal et al., 1999](#);

[Gleyzes et al., 2002](#)), $F3$ – связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn, $F4$ – связанная с органическим веществом. Содержание Cu в остаточной фракции ($F5$) рассчитано как разность между общим содержанием Cu и ее содержанием во фракциях $F1$ – $F4$, так как высокая точность определения доли прочносвязанных форм в данном исследовании не требовалась. Для извлечения обменных форм был использован в качестве экстрагента ацетат натрия (NaOAc) с $pH = 8$ вместо обычно используемого $MgCl_2$. Измерение концентрации Cu в вытяжках также проведено методом атомно-абсорбционной спектроскопии в ЦКП ПНЦБИ РАН.

Наиболее простые в применении и активно используемые методы сравнительной оценки биодоступности металлов в почве основаны на учете доли самых легко экстрагируемых фракций (водорастворимой, обменной и кислоторастворимой) с помощью различных экологических индикаторов. К ним относятся анализ значений фактора подвижности – Mobility Factor (MF) ([Salbu et al., 1998](#); [Kabala, Singh, 2001](#)) или фактора биодоступности – Bioavailability Factor (BAF), учет рисков с помощью Risk Assessment Code (RAC). MF представляет собой отношение самых подвижных фракций (водорастворимой, обменной и кислоторастворимой) к общей сумме всех фракций, выраженное в процентах ([Salbu et al., 1998](#)). BAF, согласно Kidd et al. (2007), – аналогичное MF отношение всех форм металла, экстрагируемых 0.11 M CH_3COOH (что соответствует сумме $F1$ и $F2$, выделяемых по Tessier et al. (1979) согласно Burachevskaya et al. (2020)), к общему содержанию металла, выраженное в процентах. RAC упоминается в работе Ghrefat et al. (2012) как метод оценки риска транслокации металлов в сопредельные среды в зависимости от доли биодоступных фракций от общего содержания (то есть от значений MF или BAF).

В данном исследовании коэффициент MF был подсчитан для исходных образцов, а также для образцов, загрязненных 200 и 2 000 мг/кг. Также была проведена оценка риска транслокации металлов из почв в сопредельные среды с использованием RAC. Согласно RAC, если содержание $F1 + F2 \leq 10\%$, то экологические риски очень малы.

Таблица 1. Модифицированная схема Tessier с соавторами (1979) для последовательного фракционирования ТМ
Table 1. Modified scheme of sequential extraction of HM forms based on Tessier et al. (1979) extraction scheme

Фракция	Выделяемые формы	Соотношение почва : раствор	Способ определения
<i>F1</i>	Обменные (и легкорастворимые)	1 : 8	1М NaCH ₃ COO, pH = 8.2; взбалтывание в течение 1 ч при комнатной температуре
<i>F2</i>	Кислоторастворимые	1 : 8	1М NaOAc, доведенный до pH = 5.0; взбалтывание в течение 5 ч при комнатной температуре
<i>F3</i>	Связанные с (гидр)оксидами Fe и Mn	1 : 20	0.04 М раствор NH ₂ OH·HCl в 25%-ой (v/v) CH ₃ COOH; нагревание до 96 ± 3 °С в течение 8 ч при периодическом взбалтывании
<i>F4</i>	Связанные с органическим веществом	1 : 20	3 мл 0.02 М HNO ₃ и 5 мл 30% H ₂ O ₂ , отрегулированной до pH = 2 с помощью HNO ₃ ; нагревание до 85 ± 2 °С в течение 2 ч при периодическом перемешивании. Дополнительные 3 мл 30% H ₂ O ₂ (pH = 2); повторное нагревание до 85 ± 2 °С в течение 3 ч при периодическом перемешивании. После охлаждения – добавление 5 мл 3.2 М NH ₄ OAc в 20% (v/v) HNO ₃ , разбавление H ₂ O до 20 мл и непрерывное перемешивание в течение 30 мин.
<i>F5</i>	Прочносвязанные	1 : 25	Содержание в F5 определяли по разности между общим содержанием и содержанием <i>F1</i> , <i>F2</i> , <i>F3</i> , <i>F4</i>

Значение $MF \leq 30\%$ отражает средний риск миграции металла в сопредельные среды. Если $MF = 31\text{--}50\%$, то, согласно RAC, подвижность металлов в почве достаточно большая, чтобы оценивать риск транслокационного загрязнения как высокий. При $MF > 50\%$ вероятность попадания элемента из почвы в пищевые цепи считается крайне высокой ([Ghrefat et al., 2012](#)).

Статистическая обработка результатов и построение изотерм адсорбции проведены в программах Excel 2010 и SigmaPlot 12.5. Значимость регрессионной модели оценена с помощью критерия Фишера и с учетом коэффициента детерминации при уровне значимости $\alpha = 0.05$. Оценка значимости параметров проводилась с применением критерия Стьюдента при $\alpha = 0.05$ и $\alpha = 0.1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные характеристики гумусовых горизонтов почв представлены в таблице 2. Согласно полевым описаниям оба гумусовых горизонта серой почвы (AY) и чернозема (AU) имеют среднесуглинистый гранулометрический состав. Метод седиментации подтверждает полевое описание для AY. Однако гумусовый горизонт чернозема (AU), скорее, следует отнести к тяжелосуглинистому типу, так как по методу ЛД в нем содержится 51% физической глины. Это значение попадает в отрезок хорошей сопоставимости результатов ЛД и седиментационного методов для степного типа почвообразования, в котором для первого возможно применение градаций классификации Качинского ([Юдина и др., 2020](#)). Содержание карбонатов в обоих образцах невелико, что характерно для промытых гумусовых горизонтов почв лесостепной зоны.

Горизонт AY характеризуется близким к нейтральному pH и низким содержанием $C_{\text{орг}} = 1.2\%$, что может быть связано с эрозийными процессами, окультуриванием почвы и расположением в северной части лесостепной зоны. Горизонт AU характеризуется нейтральной реакцией, содержит около 3% $C_{\text{орг}}$, при этом обладает хорошей зернисто-комковатой структурой, его общая щелочность не превышает 0.05% ([Иовчева и др., 2022](#)). Общее содержание меди в гумусовых горизонтах как чернозема, так и серой почвы, составляет около 17 мг/кг, что не превышает ОДК для суглинистых

ПОЧВ.

Таблица 2. Основные характеристики исследуемых почв
Table 2. Main properties of investigated soils

Почва (горизонт)	pH	C _{орг.} , %	Физи- ческая глина, %	CaCO ₃ , %	Cu _{общ.} , мг/кг	Cu _{ААБ} , мг/кг
Серая (AY)	5.7	1.2	35	<1%	17	н. д.
Чернозем (AU)	6.9	2.8	51		17	$\frac{0.1}{0.03-0.1}$

Примечание. Над чертой дано среднее арифметическое по 3 повторностям, под чертой – максимум и минимум.

Note. Above the line is mean ($n \geq 3$), below the line is maximum and minimum.

Оценка поглотительной способности чернозема и серой почвы по отношению к Cu

В целях оценки устойчивости гумусовых горизонтов исследуемых почв к загрязнению было проведено сравнение способностей серой почвы и чернозема квазиглееватого адсорбировать Cu из растворов ацетатов. Рассчитанные значения параметров уравнений адсорбции Cu черноземом и серой почвой представлены в таблице 3.

Регрессионная модель, описывающая адсорбцию Cu серой почвой с помощью уравнения Лэнгмюра, оценивается как рабочая, а ее параметры определены как значимые ($\alpha = 0.05$). Несмотря на большую величину ошибки определения параметров (табл. 3), модель адсорбции Cu черноземом на основе уравнения Лэнгмюра и параметр C_{\max} также признаны значимыми ($\alpha = 0.05$). Значение параметра K_L может быть признано достоверным при $\alpha = 0.1$. Увеличение количества экспериментальных точек и рабочего диапазона может скорректировать модель адсорбции Cu черноземом и повысить качество аппроксимации.

Таблица 3. Аппроксимация экспериментальных данных уравнениями адсорбции Лэнгмюра и Фрейндлиха

Table 3. Approximation of experimental data by Langmuir and Freundlich adsorption equations

Почва	Параметры уравнений адсорбции		
	Лэнгмюр		
	C_{\max}	K_L	R^2
серая	32.8 ± 1.5	17.3 ± 2.1	0.99
чернозем	56.2 ± 15.5	112.6 ± 50.6	0.91
	Фрейндлих		
	K_F	$1/n$	R^2
	серая	58.7 ± 6.8	0.5
чернозем	809.4 ± 475.6	0.7	0.86

Уравнение Фрейндлиха хорошо описывает экспериментальные данные, полученные для серой почвы, регрессионная модель и ее параметры значимы при $\alpha = 0.05$. Аппроксимация данных по адсорбции C_u черноземом показывает значимость регрессионной модели и параметра $1/n$ при $\alpha = 0.05$. Значение K_F невозможно определить достоверно при выбранных в исследовании уровнях значимости. Из сказанного вытекает, что использование модели Ленгмюра для описания адсорбции C_u исследуемыми почвами является более предпочтительным, поэтому в статье приведена иллюстрация изотерм, описанных этим уравнением (рис. 1).

В соответствии с рисунком 1 изотерма адсорбции C_u серой почвы имеет типичную “ленгмюровскую” форму (Пинский, 2020), то есть близкий к линейному начальный участок, постепенное выполаживание кривой в области более высоких концентраций 400–800 мг/кг (6.3–12.6 ммоль/кг) и стремление к насыщению. Изотерма адсорбции C_u черноземом целиком расположена вблизи оси ординат и имеет слабо выпуклую форму. На ней невозможно выделить область насыщения, что означает, что во всем исследуемом диапазоне концентраций идет интенсивное поглощение C_u . Так при внесении более 400 мг/кг C_u для чернозема доля поглощенного вещества от внесенного составляет более 99%, для серой почвы – снижается от 99 до 92%. Вместе с тем достоверность аппрокси-

магии изотермы адсорбции Cu черноземом уравнением Лэнгмюра свидетельствует о вероятном достижении предела насыщения при более высоких уровнях загрязнения.

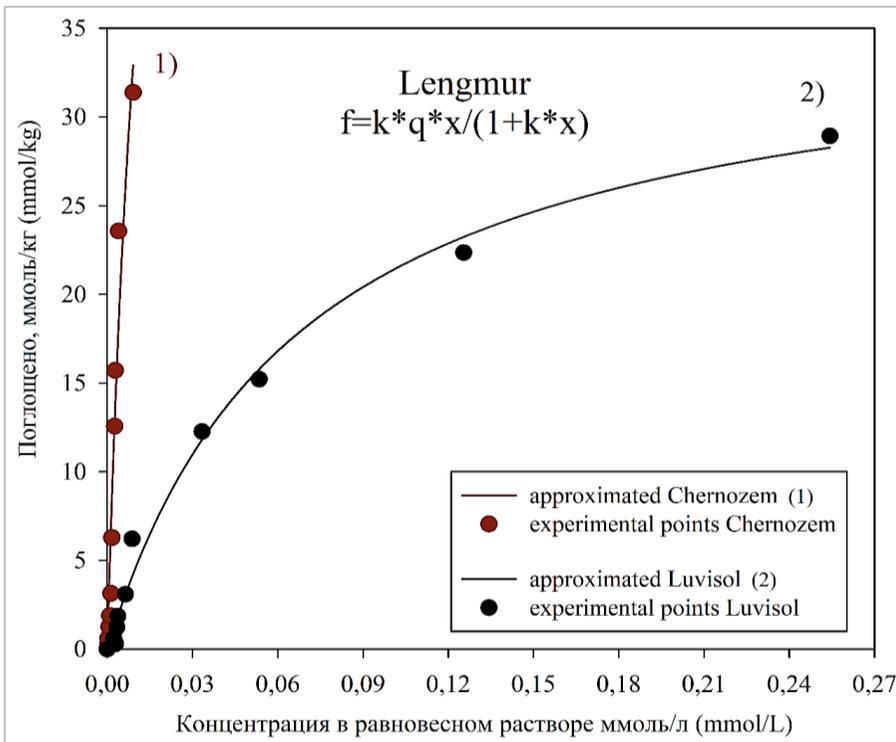


Рис. 1. Изотермы адсорбции Cu черноземом (1) и серой почвой (2).

Fig. 1. Cu adsorption isotherms for Chernozem (1) and Luvisol (2).

Аппроксимация полученных в результате эксперимента данных показывает (табл. 3), что у чернозема поглотительная способность по отношению к Cu выше, чем у серой почвы ($C_{\text{max., черн.}} > C_{\text{max., сер.}}$). Прочность удерживания Cu также выше у чернозема ($K_{L, \text{ черн.}} \gg K_{L, \text{ сер.}}$; $\alpha = 0.1$), что может быть связано с особыми свойствами гумусовых соединений в его составе. Известно, что медь характеризуется способностью достаточно прочно связы-

ваться органическим веществом почв ([Kabata-Pendias, 2011](#)). Таким образом, чернозем демонстрирует более высокую устойчивость, по сравнению с серой почвой, к загрязнению ацетатами Cu, но достоверно определена эта способность лишь для исследованного диапазона вносимых концентраций загрязнителя.

Известно, что адсорбция ТМ почвами часто сопровождается изменением pH суспензий, как в большую, так и в меньшую сторону от исходного pH контактирующего с почвой раствора. Характер изменений определяется кислотно-основной буферностью каждой конкретной почвы, которая зависит от таких свойств как наличие карбонатов, состав органического вещества, ЕКО и пр. Подкисление равновесных растворов связано с десорбцией содержащихся в ППК ионов H^+ (особенно это характерно для функциональных групп $C_{орг}$ почв) при увеличении концентрации сорбированных ионов ТМ, в данном случае Cu, а также с адсорбцией ионов металлов в сольватной (гидратной) оболочке ([Пинский, 1998](#)). Кроме того, использованный в данном исследовании $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ (соль слабой кислоты и слабого основания), подвергается частичному или полному гидролизу, с образованием слабого основания (например, $CuOH^+$) и уксусной кислоты. Поскольку константы нестойкости данного основания много меньше константы ионизации кислоты ($pKd_{1,осн} = 6.0$, а $pKd_{кисл} = 4.76$), то в растворе образуется избыток ионов H^+ , который и вызывает подкисление ([Лурье, 1989](#)).

Результаты измерений pH исходных $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ и равновесных растворов представлены на рисунке 2, согласно которому при внесении ≥ 400 мг/кг Cu pH фильтратов серой почвы становится меньше, чем pH исходных растворов. Добавление $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ к навескам чернозема квазиглееватого практически во всем диапазоне значений вызывает сдвиг pH в слабощелочную область, только при внесении 2 000 мг/кг Cu pH фильтрата и исходного раствора становятся равны.

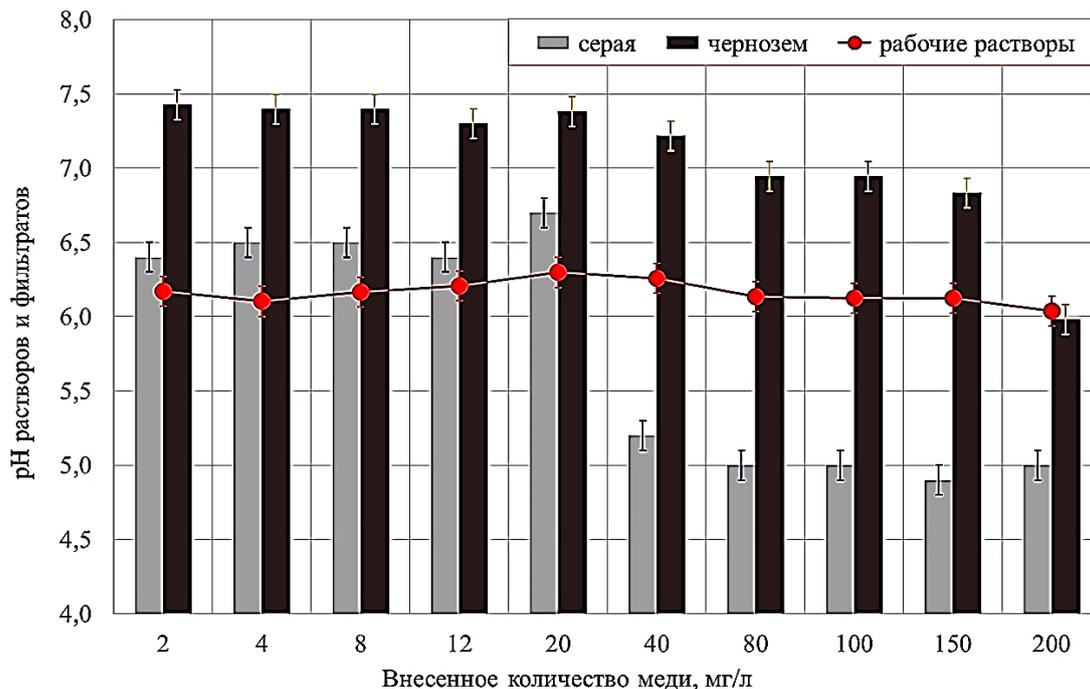


Рис. 2. pH растворов $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ разной концентрации и соответствующих им равновесных растворов.
Fig. 2. pH of $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solutions, being added, and of equilibrium solutions corresponding to them.

Серая почва устойчива к изменению рН лишь при невысоких уровнях загрязнения (≤ 200 мг/кг Cu). При внесении ≥ 400 мг/кг наблюдается подкисление равновесных растворов до $\text{pH} \approx 5$. Можно предположить, что при таком уровне загрязнения меняется механизм адсорбции катионов. Если Cu сорбируется специфически (с нарушением сольватной оболочки) при внесении 20–200 мг/кг, то “высвободившиеся” в результате гидролиза ацетат-ионы (и иные десорбированные в равновесный раствор лиганды) связывают H^+ , поэтому не происходит выраженного падения рН фильтратов (рис. 2). В случае смены механизма адсорбции на неспецифический (в форме сольватных комплексов) при внесении ≥ 400 мг/кг Cu, в равновесном растворе будет увеличиваться концентрация H^+ за счет возросшего вытеснения из ППК и более интенсивного гидролиза ацетата Cu. При увеличении вносимой концентрации Cu ≥ 800 мг/кг падение рН фильтрата серой почвы прекращается, что может свидетельствовать об уменьшении количества десорбированных H^+ и заполнении обменных позиций, так как стабилизация рН совпадает с началом выполаживания изотермы адсорбции Cu серой почвой.

Оценка изменения рН равновесных растворов показала, что способность к адсорбции Cu у серой почвы значительно ниже, чем у чернозема. Уже при концентрациях ≥ 40 мг/л Cu процессы гидролиза начинают сильно влиять на рН системы в целом (рис. 2). В случае с черноземом, когда более 99% Cu находится в поглощенном состоянии, эти процессы оказывают относительно слабое влияние на систему, но рН фильтратов постепенно снижается до рН рабочих растворов по мере увеличения уровня загрязнения почвы. Таким образом, чернозем проявляет большую буферность к загрязнению растворимыми солями Cu, чем серая почва, что может определяться нейтральным значением рН, более высоким содержанием и иным составом его $\text{C}_{\text{орг}}$, более тяжелым гранулометрическим составом.

Следует отметить, что проведенный эксперимент имеет ограничения, он моделирует поступление в почву Cu в составе легкорастворимых солей, в то время как основная форма поступления ТМ от промышленных предприятий – это твердофазные малорастворимые соединения ([Kabata-Pendias, 2011](#); [Ладонин, 2016](#)).

Однако, во-первых, в естественных условиях происходит медленное растворение вышеуказанных форм с последующим переходом ТМ в почвенный раствор, взаимодействующий с твердой фазой почвы. То есть может происходить вторичная иммобилизация металлов за счет адсорбции. Во-вторых, загрязнение почвы возможно также в результате воздействия сточных вод ([Ghrefat et al., 2012](#)) или применения удобрений, содержащих повышенные концентрации ТМ ([Kidd et al., 2007](#)). В этом случае такие потенциально токсичные элементы как Си могут поступать в почву в растворенном виде и взаимодействовать с лигандами, в том числе ацетатами, в составе почвенного раствора. Кроме того, проведенный эксперимент длился всего несколько дней, в то время как трансформация внесенных в почву малорастворимых соединений ТМ может длиться несколько лет.

Фракционный состав соединений Си в исходных и загрязненных черноземе и серой почве

Для оценки прочности закрепления Си в исследуемых почвах было проанализировано соотношение ее подвижных и связанных форм (табл. 4). Следует отметить, что для выделения обменной фракции (*F1*) Tessier с соавторами ([1979](#)) в основном использовали в качестве экстрагента раствор $MgCl_2$. При этом реагент $NaOAc$ с $pH = 8.0$ также был предложен и опробован авторами методики для извлечения подвижных форм. Предпочтение было отдано $MgCl_2$, так как Tessier с соавторами ([1979](#)) считали его менее способным растворять карбонаты и нарушать соотношение обменной (*F1*) и так называемой карбонатной (*F2*) форм. Выбор в пользу $MgCl_2$ был принят на основе меньших концентраций Са, перешедших в вытяжку *F2* после использования $MgCl_2$ на первом этапе экстрагирования. Однако, во-первых, большее количество высвобожденного Са при использовании $NaOAc$ может быть также связано с реакциями комплексообразования, ионного обмена и гидролиза легкорастворимых солей. Во-вторых, Tessier с соавторами ([1979](#)) подвергали экстрагированию донные осадки (с содержанием карбонатов около 2%), и уже в последующих исследованиях предложенная схема стала использоваться для анализа почв ([Gleyzes et al., 2002](#)). В более поздних работах было показан-

но, что однократная вытяжка $MgCl_2$ не экстрагирует полностью всю сумму катионов ППК, способных к обмену ([Narwal et al., 1999](#)), поэтому было создано значительное количество модификаций схемы Tessier с соавторами ([1979](#)), в которых сильнее всего варьируют экстрагенты для самых подвижных фракций, а выбор исследователей основывается на особенностях исследуемого объекта и задачах исследования ([Gleyzes et al., 2002](#)).

В настоящем исследовании сочтено более целесообразным использовать $NaOAc$ с $pH = 8.0$ для экстракции $F1$, а затем $NaOAc$ с $pH = 5.0$ – для $F2$; так как по экстрагирующим свойствам эти реактивы ближе к ААБ с $pH = 4.8$, который используется в нормировании подвижных форм Cu в России ([СанПиН 1.2.3685-21](#)), а исследуемые образцы практически не содержат карбонатов. При параллельной обработке почвы 1 М NH_4Cl , CH_3COOH и ААБ с $pH = 4.8$ Ладониным ([2016](#)) было выявлено, что более 80% от суммы обменной (доступной растениям) Cu извлекается ацетатионом за счет комплексообразования и лишь около 20% – за счет вытеснения ионом аммония. Основываясь на полученных в исследовании Ладонина ([2016](#)) данных, можно предположить, что суммарная концентрация подвижной Cu в вытяжках $NaOAc$ с разным pH ($F1 + F2$) должна быть близка к ее концентрации в вытяжке ААБ с $pH = 4.8$.

Суммарная концентрация Cu (0.3 мг/кг) в $F1 + F2$ чернозема (табл. 4) превышает концентрацию в $F_{ААБ}$ (0.1 мг/кг; табл. 2), но при близком порядке значений. Из-за большого разброса значений при концентрации Cu в $F1$ и $F2$, близкой к нижнему пределу обнаружения прибора (0.05 мг/л), различия признаны незначимыми. Руководствуясь вышеупомянутыми доводами и полученными данными о близости значений $Cu_{ААБ}$ и Cu в $F1 + F2$, авторы посчитали возможным в данном исследовании сравнить с ПДК $_{Cu}$ суммарное содержание биодоступных форм Cu в черноземе квазилеуватом при разных уровнях загрязнения.

По результатам фракционирования установлено, что максимальная доля Cu в обеих нативных почвах приходится на остаточную фракцию (60% – для серых почв, 80% – для черноземов; табл. 4). Распределение Cu между другими фракциями серой незагрязненной почвы относительно равномерно. По 11–12% приходится

на пулы обменных, связанных с (гидр)оксидами Fe и Mn и с органическим веществом форм Cu. Исключение составляет фракция *F2*, содержание которой практически в два раза меньше, чем *F1*, *F3* и *F4*. Возможно, это связано с крайне низким содержанием карбонатов или иных связывающих Cu компонентов, которые извлекаются NaOAc с pH = 5.0. В тоже время наибольшая часть обменных форм, по-видимому, извлекается NaOAc с pH = 8.0 за счет комплексообразования.

Содержание относительно непрочно связанных форм (*F1–F3*) в нативном черноземе практически на порядок меньше (составляет первые проценты), чем в серой почве, а содержание в остаточной фракции намного больше (80%). Около 17% Cu связано с $C_{\text{орг}}$ почвы. Кажущаяся схожей с серой почвой тенденция превышения *F1* над *F2* в черноземе не может быть достоверно определена. Разброс содержания Cu в *F1* и *F2* очень высок, а полученные значения зачастую ниже ПО.

Содержание биодоступных форм (*F1 + F2*) в серой почве составляет 3 мг/кг, в черноземе – менее 0.5 мг/кг. Сумма наиболее подвижных форм в серой почве не превышает 18%, а в черноземе – 2%. Таким образом, способность прочно удерживать Cu у чернозема значительно выше, чем у серой почвы.

Преобладание Cu в составе прочносвязанных (> 60%) форм характерно для нативных или слабо загрязненных черноземов и серых почв, что подтверждается работами Sipos (2009), Vurachevskaya et al. (2020), Борисочкиной и Колчановой (2021). Выявление *F4* как второго по значимости пула Cu в почвах отмечено для фоновых черноземов миграционно-сегрегационных ($F5_{Cu} = 64\%$; $F4_{Cu} = 19\%$) в работе Vurachevskaya et al., (2020) и для Luvisols ($F5_{Cu} = 93\%$; $F4_{Cu} = 6\%$) с высоким содержанием $C_{\text{орг}}$, согласно Sipos (2009). Для черноземов глинисто-иллювиальных агропелитовых ландшафтов (Борисочкина, Колчанова, 2021) наблюдается сходное с анализируемой серой почвой распределение слабоподвижных форм: на *F3* и *F4* приходится примерно равная доля содержания Cu (6.2–6.4%). Однако, в отличие от серой почвы, в них ничтожно мала (< 1%) доля обменных форм Cu.

Таблица 4. Фракционный состав Cu в исходных и загрязненных черноземе и серой почве
Table 4. Fractional composition of Cu in native and polluted Chernozem and Luvisol

Почва (внесено, мг/кг)	Общее содержание Cu, мг/кг	Содержание Cu во фракциях, мг/кг				
		<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>
серая (0)	17	2.0	1.0	2.0	1.9	10.1
чернозем (0)		0.2 0.03–0.4	0.1 0.03–0.3	0.2 0.07–0.6	2.9 2.2–4.1	13.6 12.8–14.6
серая (200)	212.9	5.7	43.8	89.1	55.6	18.71
чернозем (200)	216.2	1.6 0.9–2.3	4.1 3.9–4.2	50.5 48.7–52.9	99.4 96.5–101.2	60.6 57.2–64.4
серая (2000)	1855.4	178.1 162.6–204.9	693.5 585.6–761.2	752.2 733.6–768.3	151.8 145.6–163.5	79.9 31.7–144.6
чернозем (2000)	2011.2	69.4 64.8–73.3	507.9 485.3–529.6	853.1 797.7–936.4	405.9 398.9–416.0	175.0 112.4–212.2

Примечание. Над чертой **полужирным** среднее арифметическое ($n \geq 3$), под чертой – максимум и минимум.
Note. Above the line is mean in **bold** ($n \geq 3$), below the line is maximum and minimum.

При внесении 200 мг/кг Cu (рис. 3) в серой почве возрастает до 42% доля связанных с (гидр)оксидами Fe и Mn форм, а кислоторастворимых и связанных с органическим веществом – до 21–26%. При этом доля Cu в остаточной фракции снижается до 9%. Подобное распределение указывает на уменьшение буферной емкости почвы и риск транслокации Cu в сопредельные среды.

В черноземе при внесении 200 мг/кг почвы снижается до 28% доля прочно связанных с силикатной частью форм Cu. Увеличивается до 46% доля форм, связанных с органическим веществом, и до 23% – с (гидро)оксидами Fe и Mn. Наиболее подвижные ($F1_{Cu} + F2_{Cu}$) формы продолжают составлять первые проценты (рис. 3). Содержание наиболее подвижных форм ($F1_{Cu} + F2_{Cu}$) – 5.7 мг/кг (табл. 4) превышает ПДК (3 мг/кг) почти в 2 раза, что указывает на возможный, но слабый риск загрязнения сопредельных сред, учитывая относительно высокую потребность растений в Cu.

Схожее с изучаемым черноземом квазиглееватым распределение слабоподвижных фракций отмечается для чернозема миграционно-сегрегационного, загрязненного ≈ 300 мг/кг Cu ([Burachevskaya et al., 2020](#)). По сравнению с нативным, в нем ниже доля $F5_{Cu}$ (43% против фоновых 64%), выше доля форм Cu в $F4$ (29% против 19%) и в $F3$ (18% против 12%). Однако для загрязненного чернозема миграционно-сегрегационного наблюдается более высокая доля биодоступных форм (10% против фоновых 5%) в сравнении с черноземом квазиглееватым (5% при содержании Cu > 200 мг/кг).

Близкая к чернозему квазиглееватому картина распределения Cu по фракциям наблюдается также в Luvisol ([Kabala, Singh, 2001](#)), где для верхнего горизонта почвы ($C_{орг} = 1.5\%$), подверженного слабому аэрогенному загрязнению (Cu = 96.9 мг/кг), доля Cu в $F4$ составляет около 50%, а в $F5$ – 30%. Отличие заключается в выраженной доле $F2$ (15%) и ничтожной – $F3$ (около 4%). Также близкие тренды изменения фракционного состава при загрязнении были обнаружены для окультуренной супесчаной Umbrisol с содержанием $C_{орг} > 5\%$ ([Kidd et al., 2007](#)), которую удобряли в течение нескольких лет ферментированным осадком сточных вод (содержание Cu в осадке – 230 мг/кг). По сравнению с контролем, в

обрабатываемой почве выше общее содержание Cu (132 вместо исходных 12 мг/кг), меньше доля Cu в F5 (45% – окультуренная, 78% – контроль) и выше – в F4 (53% – окультуренная, 15% – контроль).

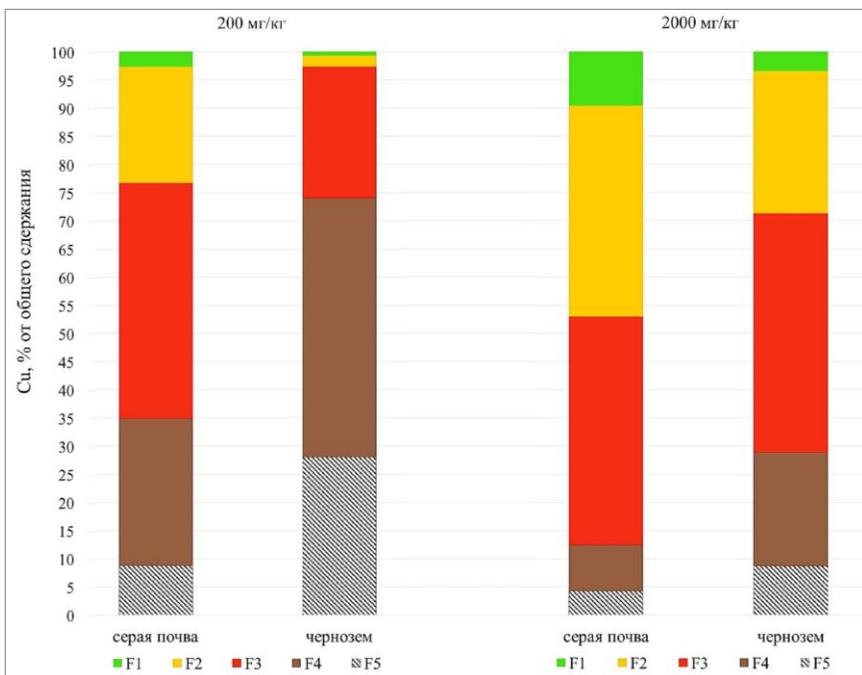


Рис. 3. Долевое распределение Cu (в %) по фракциям в почвах, загрязненных 200 и 2 000 мг/кг.

Fig. 3. Distribution of Cu (%) by fractions in soils contaminated by 200 and 2 000 mg/kg.

При уровне загрязнения в 2 000 мг/кг в обеих почвах доля прочно связанных форм Cu снижается до первых процентов, сильно увеличивается доля кислоторастворимых ($\approx 20\text{--}35\%$) и связанных с (гидр)оксидами Fe и Mn ($\approx 40\%$) форм Cu. Доля Cu в F4 снижается до 9% в серой почве и до 20% – в черноземе. Суммарная доля биодоступных форм Cu в обеих почвах составляет $> 25\%$.

Схожее распределение Cu по фракциям отмечено для верхнего горизонта Luvisol с содержанием $C_{\text{орг}} < 1\%$, подверженного сильному аэрогенному загрязнению ($Cu = 369$ мг/кг) ([Kabala, Singh, 2001](#)). Доля прочносвязанных форм Cu в нем составляет около 5%, $F4_{Cu}$ составляет около 17%, $F3_{Cu} - 32\%$. Сумма биодоступных форм более 40% ($F1_{Cu} \approx 16\%$, $F2_{Cu} - 30\%$).

На основе абсолютных значений (табл. 4) также можно сделать вывод о том, что обе почвы демонстрируют неспособность прочно удерживать поглощенное количество Cu (сумма $F1_{Cu} + F2_{Cu}$ составляет десятки и сотни мг/кг) при уровне загрязнения 2 000 мг/кг, следовательно, происходит превышение предела буферной емкости обеих исследованных почв и увеличивается риск миграции поллютанта в другие компоненты ландшафта.

По итогам анализа фракционного состава почв хотелось бы подчеркнуть следующее: 1) основная доля Cu в нативных почвах, по-видимому, находится в форме неизвестных прочносвязанных соединений; 2) с ростом уровня загрязнения увеличивается абсолютное и относительное содержание биодоступных форм Cu, и уменьшается – прочносвязанных. Факт увеличения в первую очередь непрочно связанных ($F1-F3$) форм Cu при загрязнении почв ее растворимыми солями объясняется тем, что адсорбция является первым и наиболее быстрым этапом сложного многостадийного процесса трансформации экзогенных соединений ТМ в почвах ([Пинский, 2020](#)). Согласно теоретическим представлениям, общая скорость трансформации определяется наиболее медленной стадией ([Пинский, 2020](#)), следовательно, времени проведенного эксперимента недостаточно для завершения этого процесса и наблюдения последующих этапов.

Оценка экологических рисков и биодоступности Cu

Для серой почвы MF $\approx 18\%$ (табл. 5), что достаточно много для фоновой почвы и указывает на ее невысокую буферную способность в совокупности с возможностью достаточного обеспечения растений Cu за счет средней биодоступности. Фактор подвижности Cu в черноземе составляет 1.6%. Это очень низкое значение, указывающее на ограничение доступности металла растениям и отсутствие риска транслокационного переноса. Получен-

ный для чернозема результат согласуется с оценкой подвижности Cu ($MF < 2\%$) для фоновых Luvisols ([Sipos, 2009](#)). Оба полученных значения MF согласуются с выводами других исследователей о том, что суммарная доля Cu в $F1$ и $F2$ в фоновых почвах составляет 10–20% или меньше ([Narwal et al., 1999](#); [Kabala, Singh, 2001](#); [Kidd et al., 2007](#); [Sipos, 2009](#)).

Таблица 5. MF рассчитанный для нативных и загрязненных почв.

Table 5. MF calculated for native and contaminated soils

Почва	Величина MF* в исследуемых почвах, %		
	Незагрязненные	Внесено 200 мг/кг	Внесено 2 000 мг/кг
серая	17.9	23.3	47.0
чернозем	1.6	2.6	28.7

Примечание. *MF – mobility factor (фактор подвижности).

Note. *MF – mobility factor.

MF для серой почвы при общем Cu > 200 мг/кг составляет 23%, следовательно опасность транслокации подвижных форм элемента в сопряженные с почвой среды оценивается как средняя, согласно RAC ($F1_{Cu} + F2_{Cu} > 10\%$), при этом суммарное абсолютное содержание $F1$ и $F2$ в серой почве при уровне загрязнения > 200 мг/кг составляет около 50 мг/кг. Подобные значения MF > 20% могут наблюдаться как в фоновых, так и в загрязненных почвах ([Kabala, Singh, 2001](#); [Ghrefat et al., 2012](#)). Для чернозема MF = 2.6%, что указывает на низкую биодоступность Cu и, согласно RAC, на слабую опасность миграции элемента в сопредельные среды. Низкая биодоступность Cu ($BAF = MF < 5\%$) при общем содержании более 130 мг/кг отмечена в работе [Kidd et al. \(2007\)](#) для окультуренной супесчаной Umbrisol.

Фактор подвижности Cu при загрязнении в 2 000 мг/кг для чернозема составляет > 25%, а для серой > 45%. Таким образом, согласно RAC, для чернозема наблюдается средний риск миграции подвижных форм Cu в грунтовые воды и передвижения по пищевым цепям, а для серой почвы – высокий ([Ghrefat et al.,](#)

[2012](#)). Значения MF выше 30% для загрязненных почв получены в исследовании Kabala, Singh ([2001](#)).

ВЫВОДЫ

Результаты эксперимента по адсорбции меди серой почвой и черноземом квазиглеевым достоверно аппроксимируются уравнением Лэнгмюра. Экспериментально подтверждена более высокая адсорбционная емкость чернозема по сравнению с серой почвой. Прочность удержания форм Cu, вероятно, также выше в черноземе (если допустить значимость K_L при $\alpha = 0.1$). Лучшая адсорбция Cu черноземом, по сравнению с серой почвой, определяется, по-видимому, нейтральным значением pH, более высоким содержанием и иным составом $C_{\text{орг}}$, тяжелосуглинистым гранулометрическим составом.

В результате последовательного экстрагирования выявлено, что в нативных почвах основная доля Cu находится в прочно связанном состоянии ($> 50\%$). В черноземе также значительна доля Cu, связанной с $C_{\text{орг}}$ (17%), что подтверждает его важную роль в механизмах иммобилизации данного элемента. При возрастании уровня загрязнения в обеих почвах уменьшается доля прочносвязанных форм Cu. При уровне загрязнения в 200 мг/кг в черноземе увеличивается доля Cu во фракции органического вещества (до 46%), а в серой почве до 42% – связанной с (гидро)оксидами Fe, Mn, и до 21–26% – в кислоторастворимой и связанной с органическим веществом фракциях. При внесении 2 000 мг/кг в обеих почвах значительно увеличивается доля и абсолютное содержание кислоторастворимых и связанных с (гидр)оксидами Fe, Mn форм Cu, нарушаются барьерные функции.

MF $\leq 25\%$ для обеих почв в исходном и загрязненном 200 мг/кг состояниях, что указывает на малый и средний риск увеличения биодоступности Cu. При загрязнении около 2 000 мг/кг MF $> 25\%$, что означает средний для чернозема и высокий для серой почвы риск миграции Cu в грунтовые воды и по пищевым цепям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисочкина Т.И., Колчанова К.А.* Геохимия тяжелых металлов почв урбанизированных ландшафтов зон воздействия металлургических предприятий. // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 10. С. 50–56.
2. *Горбунов Н.И.* Методика подготовки почв к минералогическим анализам. // *Методы минералогического и микроморфологического изучения почв*. М.: Наука, 1971. С. 5–15.
3. *Ильин В.Б. Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2001. 229 с.
4. *Иовчева А.Д., Кречетов П.П., Семенков И.Н.* Засоление как фактор дифференциации подвижных форм тяжелых металлов в почвах Барабинской лесостепи // *Вестник Московского университета*. 2022. Серия 5. География. № 3. С. 108–118.
5. *Ладонин Д.В.* Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2016. 42 с.
6. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 448 с.
7. *Опекунова М.Г., Сомов В.В., Папян Э.Э.* Загрязнение почв в районе воздействия горнорудных предприятий Башкирского Зауралья // *Почвоведение*. 2017. № 6. С. 744–758.
8. *Пинский Д.Л.* К вопросу о механизмах ионообменной адсорбции тяжелых металлов почвами // *Почвоведение*. 1998. № 11. С. 1348–1355.
9. *Пинский Д.Л.* Современные представления о механизмах поглощения тяжелых металлов почвами // *Эволюция, функционирование и экологическая роль почв как компонента биосферы*. Пушино: Товарищество научных изданий КМК, 2020. С. 55–64.
10. *Полевой определитель почв России*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
11. СанПиН 1.2.3685-21. “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 2021. 469 с.
12. *Семенков И.Н., Королева Т.В.* Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // *Почвоведение*. 2019. № 10. С. 1259–1268.
13. *Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкина И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Н.В., Ковда И.В., Дымов А.А., Милановский Е.Ю.* Пути создания классификации почв по

гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371.

14. *Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G.* Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review // Environmental Pollution. 2019. Vol. 249. P. 200–207. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).

15. *Burachevskaya M., Minkina T., Bauer T., Mandzhieva S., Gülser C., Kızılkaya R., Sushkova S., Rajput V.* Assessment of extraction methods for studying the fractional composition of Cu and Zn in uncontaminated and contaminated soils // Eurasian Journal of Soil Science. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 231–241. DOI: [10.18393/ejss.734601](https://doi.org/10.18393/ejss.734601).

16. *Ghrefat H.A., Yusuf N., Jamarh A., Nazzal J.* Fractionation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil Samples Collected along Zerqa River, Jordan // Environ. Earth Sci. 2012. Vol. 66. P. 199–208. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).

17. *Gleyzes C., Tellier S., Astruc M.* Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures // Trends Anal. Chem. 2002. Vol. 21. P. 451–467. DOI: [10.1016/S0165-9936\(02\)00603-9](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00603-9).

18. *Kabala C., Singh B.R.* Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter // Journal of Environmental Quality. 2001. Vol. 30. P. 485–492. DOI: [10.2134/jeq2001.302485x](https://doi.org/10.2134/jeq2001.302485x).

19. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in soils and plants. Y.: CRC Press, 2011. 505 p.

20. *Kidd P.S., Domínguez-Rodríguez M.J., Díez J., Monterroso C.* Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge // Chemosphere. 2007. Vol. 66. P. 1458–1467. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2006.09.007](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.007).

21. *Narwal R.P., Singh B.R., Salbu B.* Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal- rich soils studied by parallel and sequential extractions // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 1999. Vol. 30. Iss. 7–8. P. 1209–1230. DOI: [10.1080/00103629909370279](https://doi.org/10.1080/00103629909370279).

22. *Salbu B., Krekling T., Oughton D.H.* Characterization of radioactive particles in the environment // Analyst. 1998. Vol. 123. P. 843–849. DOI: [10.1039/A800314I](https://doi.org/10.1039/A800314I).

23. *Sipos P.* Distribution and sorption of potentially toxic metals in four forest soils from Hungary // Cent. Eur. J. Geoscience. 2009. Vol. 1. Iss. 2. P. 183–192. DOI: [10.2478/v10085-009-0009-4](https://doi.org/10.2478/v10085-009-0009-4).

24. *Semenkov I.N., Koroleva T.V.* Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards // *Geoderma regional*. 2020. Vol. 21. P. e00283. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00283](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00283).
25. *Tatsiy Yu.G.* Ecological and Geochemical Evaluation of Environmental Pollution within the Operating Area of the Karabash Copper-Smelting Plant // *Tyumen State University Herald*. 2012. Vol. 12. P. 81–86.
26. *Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M.* Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. Vol 51. P. 844–851. DOI: [10.1021/ac50043a017](https://doi.org/10.1021/ac50043a017).
27. *Walkley A., Black I.A.* An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method // *Soil Sci. Journal*. 1934. Vol. 27. P. 29–37. DOI: [10.1097/00010694-193401000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003).

REFERENCES

1. Borisochkina T.I., Kolchanova K.A., *Geochemistry of Heavy Metals in Soils of Urbanized Landscapes in Zones Affected by Metallurgical Enterprises, Ecology and Industry of Russia*, 2021, Vol. 25, Iss. 10, pp. 50–56. DOI: [10.18412/1816-0395-2021-10-50-56](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-10-50-56).
2. Gorbunov N.I., Metodika podgotovki pochv k mineralogicheskim analizam (Methods of soil preparation for mineralogical analysis), In: *Metody mineralogicheskogo i mikromorfologicheskogo izucheniya pochv* (Mineralogical and Micromorphological Analysis of Soils), Moscow: Nauka, 1971, pp. 5–15.
3. Il'in V.B., Syso A.I., *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoi oblasti*, (Micronutrients and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region), Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001, 229 p.
4. Iovcheva I.D., Krechetov P.P., Semenov I.N., Zasolenie kak faktor differentsiatsii podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh Barabinskoi lesostepi (Salinity as a factor controlling the distribution of heavy metal mobile fractions in soils of the Baraba forest-steppe), *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 5, Geografiya*, 2022, No. 3, pp. 108–118.
5. Ladonin D.V., *Formy soedinenii tyazhelykh metallov v tekhnogennozagryaznennykh pochvakh: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Forms of compounds of heavy metals in technogenically contaminated soils, Extended Abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2016, 42 p.
6. Lur'e Yu.Yu., *Spravochnik po analiticheskoi khimii* (Analytical chemistry handbook), Moscow: Khimiya, 1989, 448 p.

7. Opekunova M.G., Somov V.V., Papyan E.E., Soil Contamination in the Impact Zone of Mining Enterprises in the Bashkir Transural Region, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 6, pp. 732–745, DOI: [10.1134/S1064229317060084](https://doi.org/10.1134/S1064229317060084).
8. Pinskiy D.L., The problem of the mechanisms of ion-exchange adsorption of heavy metals in soils, *Eurasian Soil Science*, 1998, Vol. 31, No. 11, pp. 1223–1230.
9. Pinskiy D.L., Sovremennye predstavleniya o mekhanizmaxh pogloshcheniya tyazhelykh metallov pochvami (Modern concepts about the absorption mechanisms of heavy metals by soils), In: *Evolyutsiya, funkcionirovanie i ekologicheskaya rol' pochv kak komponenta biosfery* (Evolution, functions, and ecological role of soils as a component of the biosphere), Pushchino: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2020, pp. 55–64.
10. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* (Field guide for correlation of Russian Soils), Moscow: Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
11. *Hygienic standard No 1.2.3685-21*, 2021, 469 p.
12. Semenov I.N., Koroleva T.V., International environmental legislation on the content of chemical elements in soils: guidelines and schemes, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 10, pp. 1289–1297, DOI: [10.1134/S1064229319100107](https://doi.org/10.1134/S1064229319100107).
13. Yudina A.V., Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Churilin N.A., Kovda I.V., Milanovskiy E.Y., Aleksandrova M.S., Golovleva Y.A., Phillipov N.V., Dymov A.A., The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 11, pp. 1579–1595, DOI: [10.1134/S1064229320110149](https://doi.org/10.1134/S1064229320110149).
14. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G., Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review, *Environmental Pollution*, 2019, Vol. 249, pp. 200–207, DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).
15. Burachevskaya M., Minkina T., Bauer T., Mandzhieva S., Gülser C., Kızılkaya R., Sushkova S., Rajput V., Assessment of extraction methods for studying the fractional composition of Cu and Zn in uncontaminated and contaminated soils, *Eurasian Journal of Soil Science*, 2020, Vol. 9, Iss. 3, pp. 231–241, DOI: [10.18393/ejss.734601](https://doi.org/10.18393/ejss.734601).
16. Ghrefat H.A., Yusuf N., Jamarh A., Nazzal J., Fractionation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil Samples Collected along Zerqa River, Jordan, *Environ. Earth Sci.*, 2012, Vol. 66, pp. 199–208, DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).
17. Gleyzes C., Tellier S., Astruc M., Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction

- procedures, *Trends Anal. Chem.*, 2002, Vol. 21, pp. 451–467, DOI: [10.1016/S0165-9936\(02\)00603-9](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00603-9).
18. Kabala C., Singh B.R., Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter, *Journal of Environmental Quality*, 2001, Vol. 30, pp. 485–492, DOI: [10.2134/jeq2001.302485x](https://doi.org/10.2134/jeq2001.302485x).
19. Kabata-Pendias A., *Trace Elements in soils and plants*, Y.: CRC Press, 2011, 505 p.
20. Kidd P.S., Domínguez-Rodríguez M.J., Díez J., Monterroso C., Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge, *Chemosphere*, 2007, Vol. 66, pp. 1458–1467, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2006.09.007](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.007).
21. Narwal R.P., Singh B.R., Salbu B., Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal- rich soils studied by parallel and sequential extractions, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, Vol. 30, Iss. 7–8, pp. 1209–1230, DOI: [10.1080/00103629909370279](https://doi.org/10.1080/00103629909370279).
22. Salbu B., Krekling T., Oughton D.H., Characterization of radioactive particles in the environment, *Analyst.*, 1998, Vol. 123, pp. 843–849, DOI: [10.1039/A800314I](https://doi.org/10.1039/A800314I).
23. Sipos P., Distribution and sorption of potentially toxic metals in four forest soils from Hungary, *Cent. Eur. J. Geoscience*, 2009, Vol. 1, Iss. 2, pp. 183–192, DOI: [10.2478/v10085-009-0009-4](https://doi.org/10.2478/v10085-009-0009-4).
24. Semenov I.N., Koroleva T.V., Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards, *Geoderma regional*, 2020, Vol. 21, pp. e00283, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00283](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00283).
25. Tatsiy Yu.G., Ecological and Geochemical Evaluation of Environmental Pollution within the Operating Area of the Karabash Copper-Smelting Plant, *Tyumen State University Herald*, 2012, Vol. 12, pp. 81–86.
26. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M., Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem.*, 1979, Vol. 51, pp. 844–851, DOI: [10.1021/ac50043a017](https://doi.org/10.1021/ac50043a017).
27. Walkley A., Black I.A., An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci. Journal.*, 1934, Vol. 27, pp. 29–37, DOI: [10.1097/00010694-193401000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128



Ссылки для цитирования:

Скурихина П.Д. Влияние кремнийорганического адсорбента на содержание подвижных форм тяжелых металлов и рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом и медью // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 109-128. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128

Cite this article as:

Skurikhina P.D., Effect of organosilicon adsorbent on the content of mobile forms of heavy metals and growth of test-crop under conditions of soil contamination with lead and copper, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 109-128, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128

Влияние кремнийорганического адсорбента на содержание подвижных форм тяжелых металлов и рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом и медью¹

© 2023 г. П. Д. Скурихина

*Казанский федеральный университет, Россия,
420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18, корп. 1,*

<https://orcid.org/0000-0003-0882-5990>, e-mail: sfagnium@mail.ru.

*Поступила в редакцию 15.01.2023, после доработки 30.05.2023,
принята к публикации 27.06.2023*

Резюме: Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) представляется серьезной экологической проблемой. Для рекультивации почв, подвергшихся воздействию поллютантов, часто применяются различные сорбенты, в связи с этим поиск наиболее эффективного и многопланового сорбирующего вещества является актуальным. Смоделировано загрязнение гумусово-аккумулятивного горизонта светло-серой лесной легкосуглинистой почвы тяжелыми металлами: свинец (Pb^{2+}) и медь (Cu^{2+}). В качестве загрязнителей использовали

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых "Почвоведение: Горизонты будущего. 2022", посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

растворы ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) и сульфата меди ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) трех разных концентраций (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Растворы кремнийорганического адсорбента – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрата (ПМСПГ) также вносились в трех различных вариантах: 0.01%; 0.1%; 1%. После загрязнения исследуемых образцов и внесения кремнийорганического адсорбента были определены подвижные соединения меди и свинца методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Экстракция поллютантов из почвы проводилась ацетатно-аммонийным буфером (pH = 4.8). Применение адсорбента значительно снизило концентрации подвижных соединений тяжелых металлов. Наиболее эффективным оказалось применение раствора ПМСПГ с концентрацией 1%. Проводился вегетационный эксперимент. В качестве тест-культуры использовался кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта “Забава”. Выявлены благоприятные изменения в росте кресс-салата при использовании адсорбента с концентрацией 1% по отношению к контрольным вариантам.

Ключевые слова: загрязнение почв, хелатообразующие полимеры, сорбенты, силоксан, тяжелые металлы.

Effect of organosilicon adsorbent on the content of mobile forms of heavy metals and growth of test-crop under conditions of soil contamination with lead and copper¹

© 2023 P. D. Skurikhina

*Federal Kazan Federal University,
18 building 1 Kremlevskaya Str., Kazan 420008, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-0882-5990>, e-mail: sfagnium@mail.ru.*

Received 15.01.2023, Revised 30.05.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The pollution of soil by heavy metals becomes a prime ecological problem. Recultivation of polluted soil objects is usually made by means of different types of sorbents. So, in this connection the search for the most effective and multifunctional sorbing agent is relevant. The model experiment of soil pollution by several heavy metals in upper soil horizon was carried out.

¹ *Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.*

The soil for that research was Grey-Luvic Phaeozems. Lead (Pb^{2+}) and copper (Cu^{2+}) were chosen as pollutants. Solutions of lead acetate ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) and copper sulphate ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) of three different concentrations (1 MPC, 5 MPC, 10 MPC) were used as pollutants. Solutions of organosilicon adsorbent – 1,1,3,3,3-tetrahydroxy-1,3-dimethyldisiloxane polyhydrate (PMSPG) were also applied in three different variants: 0.01%; 0.1%; 1%. The mobile forms of heavy metals were researched by method of atomic absorption spectrometry. The mobile forms of heavy metals were extracted by the ammonium acetate buffer (pH = 4.8). According to results, the application of organosilicon sorbent had a positive issue. Application of adsorbent significantly reduced the concentrations of mobile heavy metal compounds. The application of PMSPG solution with concentration of 1% was the most effective. A vegetation experiment was carried out. Cress (*Lepidium sativum* L.) of “Zabava” variety was used as a test-crop. Favourable changes in the growth of cress with the use of adsorbent at the concentration of 1% compared to the control variants were revealed.

Keywords: soil pollution, chelate polymers, sorbents, siloxane, heavy metals.

ВВЕДЕНИЕ

Биогеоценотические функции почвы являются важным аспектом изучения в экологии, поскольку во многом отражают основные естественные процессы, нарушение которых ведет к значительному изменению не только почв, но и всего биогеоценоза. Наиболее важной среди выше выделенной совокупности можно считать барьерную функцию, которая во многом обуславливает возможность поглощения почвой различных загрязнителей, а также дальнейшее их распределение по почвенному профилю. В свою очередь, эти механизмы во многом предупреждают поступление разного рода поллютантов в растения, что определяет значимость этого свойства почвы для человека ([Ломовский и др., 2016](#); [Минкина и др., 2008](#)).

Со стремительным увеличением промышленных территорий возрастает и площадь техногенно загрязненных почв. Накопление токсичных веществ как в самой почве, так и в растениях, произрастающих на загрязненных территориях, сказывается на функционировании всей экосистемы. Одними из самых опасных поллютантов можно считать тяжелые металлы (ТМ), поскольку при превышении ПДК они способны влиять на жизнедеятельность расте-

ний в целом ([Самонин и др., 2012](#)).

Из наиболее токсичных ТМ, широко используемых в металлургической промышленности, можно выделить свинец (Pb^{2+}) и медь (Cu^{2+}) ([Путилина, 2009](#)). Например, повышение концентрации подвижных соединений свинца снижает функциональность пигментных комплексов и уменьшает содержание хлорофилла в вегетативных органах растения, приводит к гибели побегов ([Удиванкин, 2006](#)), превышение ПДК по содержанию подвижных соединений меди вызывает некрозы, хлорозы у растений, ингибирует рост подземных и надземных органов ([Удиванкин, 2006](#)). В связи с этим актуальным является изучение методов для эффективной очистки почв от ТМ. На данный момент существует множество способов ремедиации почв от этих поллютантов: использование электрохимических и химических методик, цементирование, обратный осмос, применение различных мембранных технологий, адсорбция ТМ различными твердыми отходами (кора, белый шлам, опилки и др.) ([Кизилев и др., 2017](#); [Переломов и др., 2020](#)). Один из наиболее современных способов – применение специально синтезированных сорбентов различной природы: неорганической, органической, гибридной ([Кизилев и др., 2017](#)). Предполагается, что наиболее эффективно применение адсорбирующих веществ гибридной природы. Механизм адсорбции таких соединений заключается в образовании комплексов с металлами – хелатов ([Морозова и др., 2015](#)).

Среди всего разнообразия хелатообразующих сорбентов выделяют полисилоксановые полимеры. В основном это связано со специфическим строением адсорбентов силоксановой группы, которые способны образовывать матрицу с определенным размером пор. Также значительное преимущество данной функциональной группы – возможность размещения органических радикалов на поверхности этой матрицы. Таким образом, это свойство может обеспечить образование лигандной системы ([Лакиза и др., 2005](#)).

Одним из наиболее известных адсорбентов полиметилсилоксановой группы является 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат (ПМСПГ). На данный момент это вещество обширно используется в качестве энтеросорбента в связи с высокой поглощательной способностью, слабой хими-

ческой реактивной способностью, гидрофобностью и низкой теплопроводностью ([Слинякова и др., 1988](#)). Кроме того, данное вещество можно синтезировать из силоксанового масла, которое используется во многих областях промышленности ([Слинякова и др., 1988](#)). Вместе с тем влияние веществ силоксановой группы на почву в качестве адсорбентов изучено недостаточно. В то же время существуют исследования, устанавливающие положительный эффект на процесс структурообразования в почве при внесении веществ силоксановой группы ([Сандип и др., 2020](#)). Ранее тестирование сорбирующих свойств ПМСПГ при внесении в почву не проводилось. Таким образом, необходимо определить не только воздействие адсорбента на поллютанты, в частности ТМ, но и установить, способен ли данный адсорбент как-либо влиять на жизнедеятельность растений при внесении в почву.

В настоящей статье представлены результаты исследований, цель которых – определить воздействие 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрата (ПМСПГ) на содержание подвижных соединений свинца и меди в почве, а также на рост вегетативных органов кресс-салата в условиях искусственного загрязнения почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований были отобраны образцы из гумусово-аккумулятивного горизонта светло-серой лесной легкосуглинистой почвы на древнеаллювиальных отложениях. Отбор проб производился на территории Ботанического сада Казанского федерального университета (55°48'50" с. ш.; 49°14'39" в. д.) (табл. 1).

В качестве тест-объекта был использован кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта “Забава”, поскольку основными преимуществами выбранной культуры являются: быстрый рост, достаточно высокая всхожесть, высокая чувствительность к различным токсикантам, в частности, к тяжелым металлам ([Кубрина и др., 2021](#)). Для исследования применялся кремнийорганический адсорбент – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат (ООО “ТНК СИЛМА”, Россия)

Отобранные образцы почв были высушены до воздушно-

сухого состояния. Далее производилось просеивание почвы через сито 3 мм. Навеска почвы 320 г помещалась в вегетационные емкости. В качестве поллютантов использовали растворы ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) и сульфата меди ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) трех разных концентраций. Растворы вносились в таких количествах, чтобы содержания ионов меди или свинца, вносимые в почву, соответствовали содержанию элементов на уровнях 1ПДК, 5ПДК и 10ПДК. Затем в загрязненные почвы вносили растворы кремнийорганического адсорбента также в трех различных вариантах: 0.01%; 0.1%; 1%. Эксперимент проводился в трех повторностях для каждого варианта опыта. Сначала вносились растворы поллютантов, почва тщательно перемешивалась. После того, как образцы загрязненной почвы были доведены до воздушно-сухого состояния, добавляли растворы адсорбента указанных концентраций. Объем растворов подбирался экспериментально таким образом, чтобы на поверхности исследуемого образца не оказывалось избытка влаги.

Таблица 1. Некоторые свойства светло-серой лесной легкосуглинистой почвы

Table 1. Some properties of Grey-Luvic Phaeozem sandy-loamy soil

Глубина отбора образцов, см	Содержание гумуса, %	ЕКО, ммоль(экв)/100г	Содержание подвижных соединений свинца (Pb^{2+}), мг/кг	Содержание подвижных соединений меди (Cu^{2+}), мг/кг
10–12	2.3	19	0.3	0.048

Проводилось определение подвижных форм меди и свинца методом атомно-абсорбционной спектроскопии на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 (SHIMADZU, Япо-

ния), экстракция соединений свинца и меди осуществлялась ацетатно-аммонийным буфером (рН = 4.8) ([ПНД Ф 16.1:2.2.2:2.3.78-2013](#)).

Были определены энергия прорастания и всхожесть семян ([ГОСТ 12038–84](#)). Энергия прорастания составила – 89%, всхожесть семян – 86%. Затем проростки кресс-салата высаживались по 10 штук в каждый вариант опыта. Вегетационный опыт длился 15 дней и проводился в лабораторных условиях при средней температуре воздуха 23 °С, относительной влажности 53%, атмосферном давлении 101 кПа с использованием искусственного освещения. Полив тест-культуры производился с помощью пульверизатора. После этого было проведено измерение ростовых показателей растений – суммарной длины стебля и корня.

Полученные данные были обработаны с помощью методов математической статистики ($n = 3$, $p = 0.05$). Для определения разности между вариантами проводился однофакторный дисперсионный анализ с помощью статистического пакета STATGRAPHICS Plus 5.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена гистограмма содержания подвижных форм свинца в почве (рис. 1) после применения ПМСПГ.

Кремнийорганический адсорбент способен существенно снижать концентрацию подвижных форм свинца. После внесения ПМСПГ (0.01%) содержание мобильных форм свинца снижается при 1ПДК на 6%, при 5ПДК на 14% и при 10ПДК на 19% относительно контроля. С повышением концентрации ПМСПГ в почве до 0.1% эффективность действия адсорбента закономерно увеличивается. Происходит уменьшение концентрации подвижного свинца при 1ПДК на 25%, при 5ПДК на 18%, при 10ПДК на 36%. При внесении дозы ПМСПГ 1% наблюдается повышение эффективности от применения адсорбента – происходит снижение содержания подвижных форм свинца при 1ПДК, 5ПДК, 10ПДК на 41%, 29% и 44% соответственно.

Для всех трех вариантов загрязнения устанавливается закономерность: с увеличением дозы адсорбента уменьшается количество подвижных форм загрязнителя.

Однако было установлено, что действенность ПМСПГ (0,1%, 1%) на уровне загрязнения 5ПДК значительно ниже, чем при уровнях загрязнителя 1ПДК и 10ПДК. Подобное проявление свойств ПМСПГ может являться следствием гибридной природы адсорбента. Данная тенденция может свидетельствовать о присутствии двух разных способов адсорбции свинца.

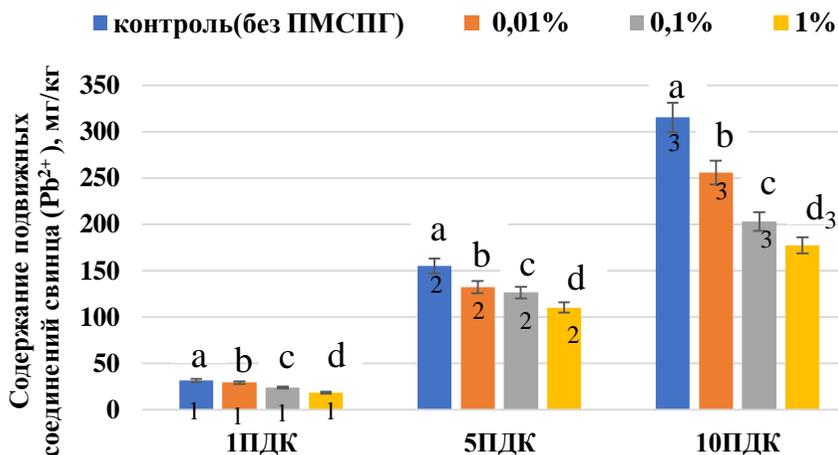


Рис. 1. Изменение среднего содержания подвижных соединений свинца (Pb^{2+}) в почве при внесении ПМСПГ в разных концентрация ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 1. Changes in average content of mobile lead (Pb^{2+}) in soil after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

Предположительно, первый способ осуществляется при помощи органической части адсорбента – метильных радикалов (Лакиза и др., 2005; Шачнева, 2016). Данные органические радикалы способны образовывать комплексные соединения с мобиль-

ными формами свинца, но мобильность свинца сравнительно низкая, поэтому эффективность этого механизма невысокая ([Путилина и др., 2009](#)). Второй предполагаемый способ поглощения мобильных соединений свинца осуществляется за счет пор установленного размера силоксановой матрицы ([Лакиза и др., 2005](#); [Жеребцов и др., 2021](#)). Возможно, что при применении низкой концентрации ПМСПГ (0.01%) поглощение подвижного свинца происходит по первому механизму ([Сорокин, 2018](#); [Фидурова и др., 2019](#)). С увеличением концентрации ТМ меняется и способ поглощения. В то же время за счет увеличения концентрации ПМСПГ (0.1%, 1%) в варианте 1ПДК увеличивается роль хелатообразования. Однако свободных метильных радикалов оказывается недостаточно для поглощения подвижных форм свинца при 5ПДК, поэтому впоследствии происходит изменение механизма. Таким образом, при дозе свинца 10ПДК после внесения ПМСПГ (в вариантах 0,1% и 1%) увеличивается уровень адсорбции за счет кремнийорганической матрицы.

Результаты вегетационного опыта показали, что происходит ингибирование роста кресс-салата при внесении свинца в почву на уровне 1ПДК на 19%, при 5ПДК – на 43%, при 10ПДК – на 57% относительно контроля (рис. 2).

В качестве ростовых показателей рассматривалась суммарная длина побега и корня, поскольку основной целью вегетационного опыта было установление влияния ПМСПГ на общую жизнеспособность проростков кресс-салата. Так при внесении ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) в образцы незагрязненной почвы изменений в развитии кресс-салата не выявлено. Влияние ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) на рост тест-культуры при внесении адсорбента в почву, загрязненную свинцом на уровнях 1ПДК и 5ПДК, также не было установлено. При загрязнении свинцом на уровне 10ПДК в варианте с внесением ПМСПГ на уровне 1% наблюдается улучшение ростовых показателей кресс-салата относительно варианта без применения ПМСПГ. Подобный эффект может быть связан с несколькими причинами. Во-первых, вовлечение пор силоксановой матрицы, заполненных водой, в процесс адсорбции приводит к высвобождению достаточного количества влаги в почву и может способствовать ускорению роста тест-культуры. Во-вторых, зна-

чительное снижение концентрации загрязнителя также может позитивно влиять на рост кресс-салата. Таким образом, использование адсорбента приводит к снижению концентрации свинца, но не воздействует на рост тест-культуры при малых концентрациях ПМСПГ (0.01%, 0.1%) при всех уровнях загрязнения почвы свинцом (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Однако при более высокой концентрации ПМСПГ (1%) адсорбент оказывает значительное влияние на развитие тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом при 10ПДК.

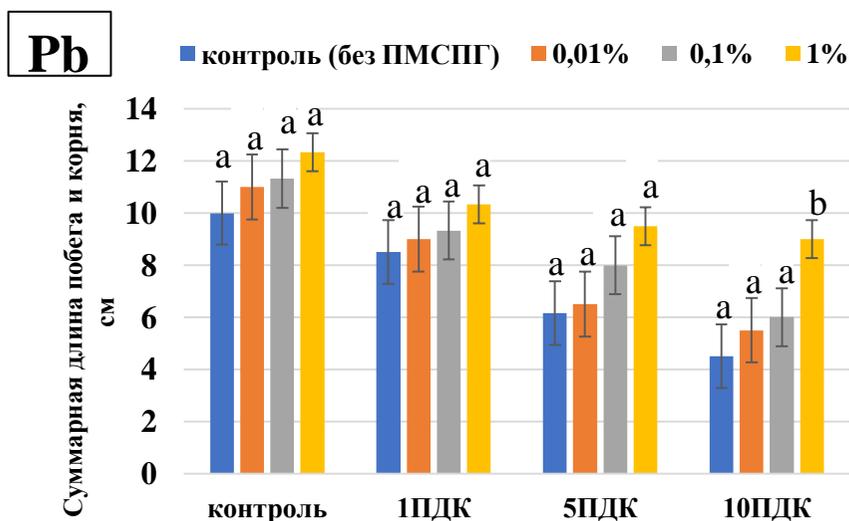


Рис. 2. Средняя суммарная длина побега и корня кресс-салата в загрязненных почвах свинцом (Pb^{2+}) при внесении ПМСПГ ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 2. Average total shoot and root length of cress in soils contaminated by lead (Pb^{2+}) after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

При загрязнении почвы разными дозами мобильных форм меди и внесении ПМСПГ устанавливается аналогичная закономерность, как и в случае загрязнения почвы свинцом (рис. 3).

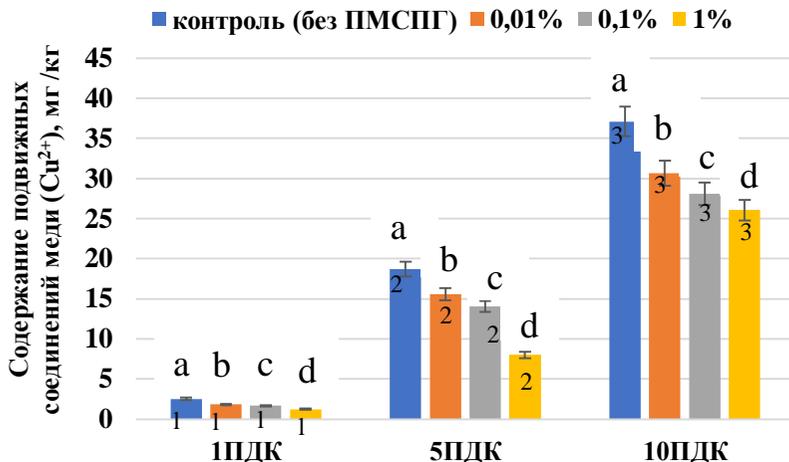


Рис. 3. Изменение среднего содержания подвижных соединений меди (Cu^{2+}) в почве при внесении ПМСПГ в разных концентрациях ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 3. Changes in average content of mobile copper (Cu^{2+}) in soil after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

В варианте с содержанием адсорбента 0.01% наблюдается снижение подвижных соединений меди: при 1ПДК – на 33%, при 5ПДК – на 17%, при 10ПДК – на 16%. Результаты показывают, что с увеличением загрязнения эффективность внесения адсорбента снижается. В вариантах с концентрацией ПМСПГ 0.1% влияние адсорбента усиливается при высоких дозах поллютанта. При дозе

загрязнителя 1ПДК количество экстрагируемой меди не увеличивается и составляет 33%, но при дозах 5ПДК и 10ПДК концентрация подвижных соединений элемента уменьшается на 26 и 24% соответственно. В варианте с ПМСПГ 1% количество мобильных соединений меди снижается на 67% при уровне 1ПДК, на 58% – при 5ПДК, на 30% – при 10ПДК.

Действенность низких концентраций ПМСПГ (0.01%, 1%) на уровне загрязнения 1ПДК, 5ПДК достаточно высокая. Как и в случае со свинцом, подобный эффект может быть связан с гибридной природой адсорбента, а также с некоторыми свойствами меди. По литературным данным, наиболее часто используются органические соединения для сорбции подвижной меди ([Абдугалипова и др., 2017](#); [Катгаев и др., 2016](#); [Пимнева и др., 2016](#)). Также установлено, что добавление некоторых органических кислот в состав минеральных сорбентов значительно увеличивает поглотительную способность по отношению к мобильной меди ([Дину и др., 2014](#); [Морозова и др., 2015](#)). Вероятно, механизм адсорбции меди связан в большей степени с образованием комплексов. При повышении концентрации меди до уровня 10ПДК снижается эффективность применения ПМСПГ. Предположительно, как и в случае со свинцом, это является следствием изменения механизма адсорбции ([Лакиза и др., 2005](#); [Саввин и др., 2011](#)). В связи с этим существуют значительные различия в эффективности применения ПМСПГ в зависимости от концентрации загрязнителя.

При проведении вегетационного опыта было установлено закономерное снижение ростовых показателей кресс-салата при внесении меди в почву на уровне 1ПДК – на 10%, 5ПДК – на 31%, 10ПДК – на 46% относительно контроля (рис. 4)

При внесении ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) в образцы незагрязненной почвы изменений в развитии кресс-салата не выявлено. Влияния ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) на рост тест-культуры в загрязненной медью почве на уровнях 1ПДК, и 5ПДК также не обнаружено. Однако при загрязнении медью на уровне 10ПДК при внесении ПМСПГ 1% наблюдается улучшение ростовых показателей относительно варианта 10ПДК без применения ПМСПГ. Сравнительное увеличение ростовых показателей кресс-салата, как и в

случае со свинцом, может быть связано как с вовлечением пор силиконовой матрицы в процесс адсорбции, так и со значительным снижением концентрации загрязнителя на уровне 10ПДК.

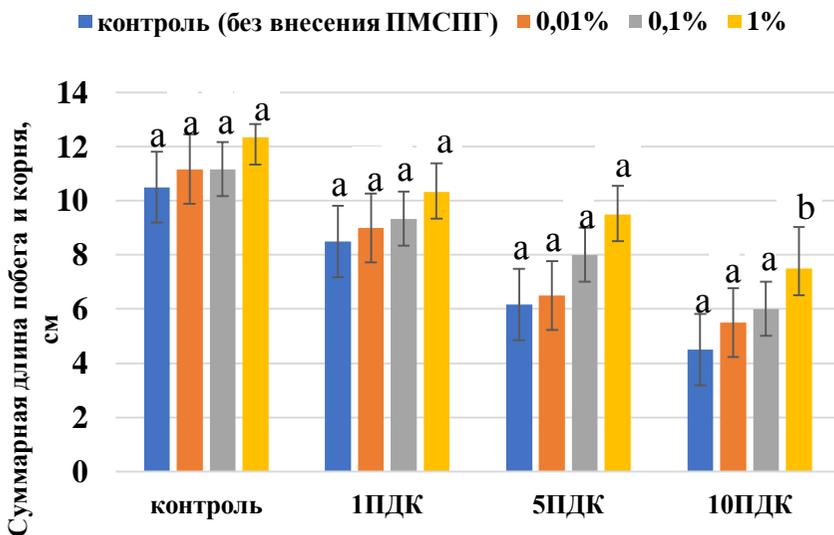


Рис. 4. Средние показатели суммарной длины побега и корня ростовые кресс-салата в загрязненных почвах медью (Cu^{2+}) при внесении ПМСПГ ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 4. Average total shoot and root length of cress in soils contaminated by mobile copper (Cu^{2+}) after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

Таким образом, как и в вариантах опыта при загрязнении почвы свинцом, исследуемый адсорбент вызывает снижение концентрации меди, но не влияет на рост тест-культуры при малых концентрациях ПМСПГ (0.01%, 0.1%) на всех уровнях загрязнения почвы медью (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Однако более высокая

концентрация ПМСПГ (1%) способна оказывать значительное влияние на рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы медью при 10ПДК.

ВЫВОДЫ

Кремнийорганический адсорбент – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат способен поглощать различные тяжелые металлы в почве, в частности подвижные формы свинца и меди. Концентрации ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) оказывают неравноценное влияние на адсорбцию ТМ. Наиболее значительное влияние на сокращение подвижных форм ТМ в почве оказали концентрации ПМСПГ 0.1% и 1%. Вместе с тем при загрязнении почвы свинцом на уровне 5ПДК и при внесении ПМСПГ (0.1%, 1%) наблюдаются достаточно низкие показатели поглощения ТМ относительно других вариантов. Предположительно, это связано как с некоторыми свойствами свинца, так и с гибридной природой адсорбента.

Существенного влияния внесения адсорбента (0.01%, 0.1%) на ростовые показатели тест-культуры выявлено не было. Возможно, это связано с высоким токсическим воздействием ТМ на кресс-салат, поскольку уровень загрязнения остается достаточно высоким даже после внесения ПМСПГ. Однако при внесении более высокой концентрации адсорбента (1%), предположительно, изменится механизм адсорбции, что сказывается положительно и на росте кресс-салата в условиях загрязнения почвы как свинцом, так и медью на уровне 10ПДК.

Таким образом, ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) не только снижает уровень загрязнения почвы ТМ, но и не оказывает ингибирующего действия на тест-культуру, как в контрольных вариантах, так и в загрязненных образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломовский О.И., Болдырев В.В. Механохимия в решении экологических задач // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2006. № 79. С. 1–221. URL: http://www.spsl.nsc.ru/download/ecology/V_79.pdf.

2. *Абдугалипова Н.М., Туробжонов С.М., Исмоилова Н.А.* Изучение механизма комплексообразования ионов меди на полученном анионообменном полимере АНФ // *Universum: технические науки.* 2017. №. 6(39). С. 20–25.
3. *Адамович Т.А., Зайцев М.А., Береснева Е.В.* Изучение сорбционных свойств торфа месторождений Кировской области // *Химия растительного сырья.* 2020. №. 2. С. 299–305.
4. *Адсорбенты из неорганических техногенных отходов / В.В. Самонин, Е.А. Спиридонова, А.С. Зотов* // *Экология и промышленность России.* 2021. Т. 25. № 12. С. 15–23. DOI: [10.18412/1816-0395-2021-12-15-23](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-15-23).
5. *Вольф М.П., Салиб-Бойгелаар Г.Б., Хунцикер П.* PDM с функциональными возможностями конструктора – свойства, стратегии модификации и приложения // *Прогресс в науке о полимерах.* 2018. С. 97–134.
6. ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Взамен ГОСТ 12038–66; введ. 1986-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2011. 65 с.
7. *Дину М.И., Заитова В.О.* Влияние гуминовых кислот и фульвокислот на геохимическую миграцию ионов тяжелых металлов // *Естественные и технические науки.* 2014. №. 11–12. С. 92–96.
8. *Каттаев Н.Т., Бабаев Т.М., Рамазанов А.Х.* Исследование процесса сорбции ионов меди (II) новым комплекситом на основе акрилонитрила // *Universum: химия и биология.* 2016. №. 8 (26). С. 5.
9. *Кизилов О.А., Байкин Ю.Л., Овчинников П.Ю.* Применение минеральных сорбентов при загрязнении почв тяжелыми металлами // *Вестник биотехнологии.* 2017. №. 1. С. 16–16.
10. *Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б.* Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био) сурфактантов (Обзор) // *Вестник Пермского университета. Серия: Биология.* 2009. №. 10. С. 95–110.
11. *Кубрина Л.В., Супиниченко Е.А.* Использование кресс-салата как тест-объекта для оценки загрязнения снежного покрова // *Научное обозрение.* 2021. № 1. С. 11–15.
12. *Лакиза Н.В., Неудачина Л.К., Ятлук Ю.Г., Багрецова М.А., Скорин Ю.А.* Новые кремнийорганические сорбенты для сорбции катионов металлов // *Аналитика и контроль.* 2005. № 4. С. 391–398.
13. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С.* Барьерные функции системы почва–растение // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение.* 2008. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bariernye-funktsii-sistemy-pochva-rastenie>.

14. *Морозова В.Ю., Подвязников М.Л., Самонин В.В.* Влияние микродобавок фуллеренов на поглонительную способность неорганических сорбентов по d-элементам // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 10. С. 1427–1431.
15. ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Введ. 2013-05-24. М.: ФГБУ “ФЦАО”, 2013. 20 с.
16. *Переломов Л.В.* Использование природных и модифицированных глинистых минералов для ремедиации загрязненных почв и очистки сточных вод / *Л.В. Переломов, Ю.М. Атрощенко* // Университет XXI века: научное измерение: материалы научной конференции научно-педагогических работников, аспирантов, магистрантов ТГПУ им. Л.Н. Толстого. Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2020. С. 217–222.
17. *Пимнева Л.А., Лебедева А.А.* Исследование адсорбции ионов меди (II) модифицированным природным сорбентом // Международный журнал экспериментального образования. 2016. №. 9–1. С. 69–70.
18. *Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции. Сер. Экология. Вып. 90. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.
19. *Саввин С.Б., Михайлова А.В., Ефимов Н.Н., Минин В.В.* Сорбция комплексов меди (II) гидрогелем // Химическая технология. 2011. Т. 12. №. 3. С. 171–176.
20. *Самонин В.В., Никонова В.Ю., Подвязников М.Л.* Исследование сорбционных свойств модифицированных фуллеренами активных углей по отношению к ионам металлов // Защита металлов. 2008. Т. 44. №. 2. С. 204–206.
21. *Сандип Б., Саад Дж., Брюкманн Р., Вилль П.* Патент № 2735231 С1 Российская Федерация, С09К 17/38 (2020.08); С08G 77/46 (2020.08); С08G 77/388 (2020.08); С08L 83/08 (2020.08). Улучшитель почвы для снижения натриевости и распыления для улучшения подвижности воды в различных почвах. № 2019128341. Заявл. 06.02.2018. Опубл. 29.10.2020. Бюл. № 31.
22. *Слнякова И.Б., Денисова Т.И.* Кремнийорганические адсорбенты: Получение, свойства, применение. Киев: Наук. думка, 1988. 190 с.
23. *Удиванкин А.В.* Влияние тяжелых металлов и их смесей на содержание белков и фотосинтетических пигментов в побегах кресс-

салата (*Lepidium sativum*) // Вестник СамГУ. 2006. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tyazhelyh-metallov-i-ih-smesey-na-soderzhanie-belkov-i-fotosinteticheskikh-pigmentov-v-pobegah-kress-salata-lepidium-sativum>.

24. Фидурова С.Н., Сютова Е.А. Минеральный сорбент СВ-100 для сорбции свинца // Актуальные проблемы химии и образования. 2019. С. 93–96.

25. Фундаментальные и прикладные проблемы получения новых материалов: исследования, инновации и технологии. Материалы научных трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти Алькова Наримана Мирзаевича / Джигола Л.А. Астрахань: Сорокин Роман Васильевич, 2018. 352 с.

26. Шачнева Е.Ю. Применение сорбента СВ-1-AL2 для концентрирования ионов свинца // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. №. 1. С. 26–30.

27. Жеребцов О.В., Агаджанян Е.Ф., Каменчук Я.А. Адсорбент полиметилсилоксана полигидрат и способ его получения. Патент № 2761627 С1 Российская Федерация, МПК C01B 33/155, A61K 31/695. № 2020139330. Заявл. 01.12.2020. Опубл. 13.12.2021. Заявитель ООО “Гротекс”.

REFERENCES

1. Lomovskij O.I., Boldyrev V.V., Mekhanohimiya v reshenii ekologicheskikh zadach (Mechanochemistry in solving environmental problems), *Ekologiya*, 2006, No. 79., pp. 1–221, URL: http://www.spsl.nsc.ru/download/ecology/V_79.pdf.
2. Abdutalipova N.M., Turobzhonov S.M., Ismoilova N.A., Izuchenie mekhanizma kompleksoobrazovaniya ionov medi na poluchennom anionoobmennom polimere ANF (Studying the mechanism of copper ion complexation on the obtained anion-exchange polymer ANF), *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2017, No. 6 (39), pp. 20–25.
3. Adamovich T.A., Zajcev M.A., Beresneva E.V., Izuchenie sorbcionnyh svojstv torfa mestorozhdenij Kirovskoj oblasti (Studying the mechanism of copper ion complexation on the obtained anion-exchange polymer ANF), *Himiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, No. 2, pp. 299–305.
4. Samonin V.V., Spiridonova E.A., Zotov A.S., Adsorbenty iz neorganicheskikh tekhnogennyh othodov (Adsorbents from inorganic technogenic waste), *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2021, Vol. 25, No. 12, pp. 15–23, DOI: [10.18412/1816-0395-2021-12-15-23](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-15-23).

5. Wolf M.P., Salib-Boigelaar G.B., Hunziker P., PDM with Designer Functionality – Properties, Modification Strategies, and Applications, *Progress in the science of polymers*, 2018, pp. 97–134.
6. GOST 12038–84. Seeds of agricultural crops. Methods of germination determination, Instead of GOST 12038–66; introduced 1986.07.01, Moscow: Izd-vo standartov, 2011, 65 p.
7. Dinu M.I., Zaitova V.O., Vliyanie guminovykh kislot i ful'vokislot na geohimicheskuyu migratsiyu ionov tyazhelykh metallov (Effect of humic acids and fulvic acids on the geochemical migration of heavy metal ions), *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, No. 11–12, pp. 92–96.
8. Kattaev N.T., Babaev T.M., Ramazanov A.H., Issledovanie processa sorbcii ionov medi (II) novym kompleksitom na osnove akrilonitrila (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Universum: himiya i biologiya*, 2016, No. 8 (26), p. 5.
9. Kizilov O.A., Bajkin Yu.L., Ovchinnikov P.Yu., Primenenie mineral'nykh sorbentov pri zagryaznenii pochv tyazhelymi metallami (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Vestnik biotekhnologii*, 2017, No. 1, pp. 16–16.
10. Kostina L.V., Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Metody ochistki zagryaznennykh tyazhelymi metallami pochv s ispol'zovaniem (bio) surfaktantov (Obzor) (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2009, No. 10, pp. 95–110.
11. Kubrina L.V., Supinichenko E.A., Ispol'zovanie kress-salata kak test-ob"ekta dlya otsenki zagryazneniya snezhnogo pokrova (Using watercress as a test object for assessing snow cover pollution), *Nauchnoe obozrenie*, 2021, No. 1, pp. 11–15.
12. Lakiza N.V., Neudachina L.K., Yatluk Yu.G., Bagrecova M.A., Skorin Yu.A., Novye kremnijorganicheskie sorbenty dlya sorbcii kationov metallov (New organosilicon sorbents for sorption of metal cations), *Analitika i kontrol'*, 2005, No. 4, pp. 391–398.
13. Minkina T.M., Motuzova G.V., Mandzhieva S.S., Bar'ernye funktsii sistemy pochva-rastenie (Barerene functions of the soil-plant system), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17. Pochvovedenie*, 2008, No. 2, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bariernye-funktsii-sistemy-pochva-rastenie>.
14. Morozova V.Yu., Podvyaznikov M.L., Samonin V.V., Vliyanie mikroobavok fullerenov na poglotitel'nyuyu sposobnost' neorganicheskikh sorbentov po d-elementam (Effect of fullerene microadditives on the absorption capacity of inorganic sorbents for d-elements), *Zhurnal prikladnoj himii*, 2015, Vol. 88, No. 10, pp. 1427–1431.

15. PND F 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the mass fraction of mobile forms of metals: copper, zinc, lead, cadmium, manganese, nickel, cobalt, chromium in samples of soil, sediments, sewage sludge by flame atomic absorption spectrometry, 2013.05.24, Moscow: FGBU "FCAO", 2013, 20 p.
16. Perelomov L.V., The use of natural and modified clay minerals for the remediation of contaminated soils and wastewater treatment, *University of the XXI century: scientific dimension: materials of the Scien. Conf. of scientific and pedagogical workers, graduate students, undergraduates of L.N. Tolstoy TSPU*, Tula: Tula State Pedagogical University. L.N. Tolstoy, 2020, pp. 217–222.
17. Pimneva L.A., Lebedeva A.A., Issledovanie adsorbicii ionov medi (II) modificirovannym prirodnyim sorbentom (Study of copper ions (Cu) adsorption by a modified natural sorbent), *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2016, No. 9–1, pp. 69–70.
18. Putilina V.S., Galickaya I.V., Yuganova T.I., *Adsorbciya tyazhelyh metallov pochvami i gornymi porodami. Harakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbicii* (Characteristics of the sorbent, conditions, parameters and mechanisms of adsorption. Adsorption of heavy metals by soils and rocks), Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2009, 155 p.
19. Savvin S.B., Mihajlova A.V., Efimov N.N., Minin V.V., Sorbciya kompleksov medi (II) gidrogelem (Sorption of copper (Cu) complexes by hydrogel), *Himicheskaya tekhnologiya*, 2011, Vol. 12, No. 3, pp. 171–176.
20. Samonin V.V., Nikonova V.Yu., Podvyeznicov M.L., Issledovanie sorbционnyh svoystv modificirovannyh fullerenami aktivnyh uglej po otnosheniyu k ionam metallov (Study of sorption properties of fullerene-modified active carbons with respect to metal ions), *Zashchita metallov*, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 204–206.
21. Sandeep Bhatt, Saad John, Ralph Brückmann, Will Peter, Patent No. 2735231 C1 Russian Federation, C09K 17/38 (2020.08); C08G 77/46(2020.08); C08G 77/388(2020.08); C08L 83/08 (2020.08). *Soil improver for sodium reduction and spraying to improve water mobility in various soils*, No. 2019128341, Appl. 02/06/2018, publ. 29.10.2020, Bull. No. 31.
22. Slinyakova I.B., Denisova T.I., *Organosilicon adsorbents: Preparation, properties, application*, Kyiv: Nauk. thought, 1988, 190 p.
23. Udivankin A.V., Vliyanie tyazhelyh metallov i ih smesej na sodержanie belkov i fotosinteticheskikh pigmentov v pobegah kress-salata (lepidium sativum) (Effect of heavy metals and their mixtures on the content of proteins and photosynthetic pigments in cress shoots (Lepidium sativum)), *Vestnik SamGU*, 2006, No 7, URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-](https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie)

[tyzhelyh-metallov-i-ih-smesey-na-soderzhanie-belkov-i-fotosinteticheskikh-pigmentov-v-pobegah-kress-salata-lepidium-sativum.](#)

24. Fidurova S.N., Syutova E.A., Mineral'nyj sorbent SV-100 dlya sorbcii svinca (Mineral sorbent CB-100 for lead sorption), In: *Aktual'nye problemy himii i obrazovaniya*, 2019, pp. 93–96.

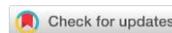
25. Dzhigola L.A., Fundamental'nye i prikladnye problemy polucheniya novyh materialov: issledovaniya, innovacii i tekhnologii (Fundamental and applied problems of producing new materials: research, innovation and technology), Proc. XII Int. Scien. and Pract. Conf. to the memory of Alykov Nariman Mirzaevich, Astrahan': Izdatel': Sorokin Roman Vasil'evich, 2018, 352 p.

26. Shachneva E.Yu., Primenenie sorbenta SV-1-AL2 dlya koncentrirvaniya ionov svinca (Application of CB-1-AL2 sorbent for lead ions concentration), *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2016, No. 1, pp. 26–30.

27. Zherebcov O.V., Agadzhanyan E.F., Kamenchuk Ya.A., Adsorbent polimetilsiloksana poligidrat i sposob ego polucheniya (Polymethylsiloxane polyhydrate adsorbent and method of its productio), Patent No. 2761627 C1 Russian Federation, MPK C01B 33/155, A61K 31/695, No. 2020139330, applied 01.12.2020, publ. 13.12.2021, LLC “Groteks”.

УДК 502.53:631.46

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-129-154



Ссылки для цитирования:

Белов А.А., Чепцов В.С. Таксономическая и функциональная характеристика ксеротолерантного культивируемого прокариотного сообщества серозема пустыни Неgev // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 129-154. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-129-154

Cite this article as:

Belov A.A., Cheptsov V.S., Taxonomic and functional characteristics of xerotolerant culturable bacterial community of Negev desert soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 129-154, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-129-154

Благодарность:

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 2, номер ЦИТИС 121040800174–6 “Почвенные микробиомы: геномное разнообразие, функциональная активность, география и биотехнологический потенциал” в части изучения таксономического разнообразия культивируемых бактериальных сообществ и анализа данных и при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-1396 (в части тестирования чистых культур бактерий на способность к росту при низкой доступности воды и определения ферментативной активности).

Acknowledgments:

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 2, CITIS number 121040800174-6 “Soil microbiomes: genomic diversity, functional activity, geography and biotechnological potential” in terms of studying taxonomic diversity of cultured bacterial communities and data analysis and with partial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-1396 (in terms of testing pure bacterial cultures for their ability to grow at low water availability and determination of enzymatic activity).

Таксономическая и функциональная характеристика ксеротолерантного

культивируемого прокариотного сообщества серозема пустыни Негев¹

© 2023 г. А. А. Белов^{1,2*}, В. С. Чепцов^{1,3**}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы 1, стр. 12,

*<https://orcid.org/0000-0002-4617-7237>, e-mail: and.ant.be@gmail.com.

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжеевский пер, 7, стр. 2.

³Институт космических исследований РАН, Россия,
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32,

**<https://orcid.org/0000-0002-2547-2931>,
e-mail: chepcov.vladimir@gmail.com.

Поступила в редакцию 12.01.2023, после доработки 18.04.2023,
принята к публикации 27.06.2023

Резюме: Несмотря на значительное расширение географии исследований почвенных микроорганизмов в различных, в том числе, экстремальных природных средах, исследования биоразнообразия и метаболической активности почвенных микробных сообществ в условиях дефицита влаги являются немногочисленными. Нами изучено биоразнообразие культивируемых бактерий, выделенных из поверхностного горизонта серозема (Aridic Calcisol) пустыни Негев, после прединкубации почвенных образцов в условиях низкой доступности воды. Выявлено возрастание разнообразия культивируемых бактерий после прединкубации по сравнению с сообществом, выделенным из нативной почвы. Из нативных и прединкубированных образцов были выделены и идентифицированы 153 фенотипически уникальные чистые культуры бактерий 22 родов, относящихся к филумам Actinomycetota, Pseudomonadota, Bacillota и Bacteroidota. Таксономическое разнообразие культивируемых бактерий, выделенных из прединкубированных при активности воды (Aw) 0.90 образцов, было в 2 раза выше, чем при выделении из нативной почвы. Выявлен штамм рода *Pedobacter*, который может являться представителем не описанного ранее вида бактерий. Обнаружены бактерии родов *Aerococcus*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Staphylococcus* и *Stenotrophomonas*, способные расти при

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Aw 0.91. Выявлен один штамм рода *Microclunatus*, способный к росту на безазотистой среде, проявляющий амилазную и протеазную активность и способный расти на среде с Aw вплоть до 0.96. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что аридные экосистемы, в частности, пустынные почвы и породы, являются депозитарием ранее не изученного таксономического разнообразия бактерий с уникальными физиологическими свойствами, перспективными для изучения и потенциального внедрения в биотехнологические процессы.

Ключевые слова: аридизация, актинобактерии, накопительная культура, активность воды, биоразнообразие.

Taxonomic and functional characteristics of xerotolerant culturable bacterial community of Negev desert soil¹

© 2023 A. A. Belov^{1,2*}, V. S. Cheptsov^{1,3**}

¹*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-4617-7237>, e-mail: and.ant.be@gmail.com.

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

³*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
84/32 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0002-2547-2931>,
e-mail: cheptcov.vladimir@gmail.com.*

Received 12.01.2023, Revised 18.04.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: Despite the significant expansion of the geography of soil microorganisms studies in various, including extreme natural environments, research on the biodiversity and metabolic activity of soil microbial communities under conditions of moisture deficiency are few. Biodiversity of culturable bacteria isolated from the surface horizon of the Negev desert soil (Aridic Calcisol) after pre-incubation of soil samples under the conditions of low water availability has been studied. An increase in the diversity of culturable bacteria after pre-incubation was revealed in comparison with the

¹ *Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.*

community isolated from the native soil. From the native and pre-incubated samples, 153 phenotypically unique pure cultures of bacteria from 22 genera belonging to the phyla Actinomycetota, Pseudomonadota, Bacillota, and Bacteroidota were isolated and identified. The taxonomic diversity of culturable bacteria isolated from the sample pre-incubated at a water activity (A_w) of 0.90 was two times higher than that obtained from the native soil. The strain of the genus *Pedobacter* has been identified, which may be a representative of a previously undescribed bacterial species. Bacteria of the genera *Aerococcus*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Staphylococcus*, and *Stenotrophomonas* capable of growing at A_w 0.91 were found. One strain of the genus *Microlunatus* has been identified that is capable of growing on a nitrogen-free medium, exhibiting amylase and protease activity, and capable to growth on a medium with A_w down to 0.96. The obtained results confirm the hypothesis that arid ecosystems, in particular, desert soils and sediments, are a depository of a previously unexplored taxonomic diversity of bacteria with unique physiological properties that are promising for study and potential implementation in biotechnological processes.

Keywords: aridization, actinobacteria, liquid culture, water activity, biodiversity.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие и количество доступной воды является важным экологическим фактором, определяющим биоразнообразие и функциональную активность экосистем ([Jackson et al., 2000](#)). В макромасштабе обеспеченность доступной влагой, ее сезонная динамика и преобладающее движение (выпадение осадков или испарение) определяют как тип растительных сообществ на рассматриваемой территории, так и направление процессов почвообразования ([Savage et al., 1996](#)). Однако на сегодняшний день очевидно, что и процессы почвообразования, и процессы формирования и функционирования фитоценозов протекают в сложных гетерофазных системах, различных по множеству параметров, в частности, по минералогическому и гранулометрическому составу минеральной матрицы, качественному составу и количеству органического вещества, биомассе и разнообразию микроорганизмов, структуре и ярусному распределению растений. Находясь в постоянном взаимодействии, элементы этой системы обуславливают плодородие почв, продуктивность как фитоценозов, так и экоси-

стемы в целом, участвуют в глобальных биогеохимических циклах элементов ([Adhikari, Hartemink, 2016](#)). В связи с большой распространённостью аридных территорий и высокими темпами аридизации все более актуальными становятся исследования влияния дефицита влаги как на различные экосистемы в целом, так и на их отдельные составляющие ([Zalibekov, 2011](#); [Kudrevatykh et al., 2022](#)).

Значительный прогресс в изучении микробных сообществ, наблюдающийся в последние десятилетия, во многом связан с развитием и распространением методов молекулярной биологии, применение которых расширило представления о разнообразии прокариот, населяющих природные среды, и позволило обнаружить широкий спектр организмов, ранее не выделявшихся в культуру и потому малоизученных ([Solden et al., 2016](#); [Bodor et al., 2020](#)). Почвы, будучи системой чрезвычайно высокой сложности, характеризуются вариабельностью свойств и процессов, протекающих в ней, что приводит к формированию множества экологических ниш, которые населены различными по составу и функциям микробными сообществами. В связи с этим почвы являются основным депозитарием микробного разнообразия.

Исследования биоразнообразия и функциональной активности почвенных прокариотных сообществ в условиях дефицита влаги немногочисленны. Большинство исследований, характеризующих почвенные микробные сообщества в условиях низкой доступности воды, были сконцентрированы на описании микробного разнообразия в экосистемах с пониженными значениями активности воды (A_w), рассчитываемой как отношение давления паров воды над исследуемым раствором к давлению паров воды над дистиллированной водой ([Warren-Rhodes et al., 2019](#); [Alotaibi et al., 2020](#)). Из различных почв засушливых экосистем были выделены представители новых таксонов бактерий преимущественно филума Actinomycetota ([Bull, 2011](#); [Montero-Calasanz et al., 2012](#); [Luo et al., 2012](#); [Harwani, 2013](#); [Santhanam et al., 2013](#)). Проведен ряд работ по определению предельных значений A_w для роста микроорганизмов ([Stevenson, Hallsworth, 2014](#); [Lebre et al., 2017](#); [Zenova et al., 2007](#); [Zvyagintsev et al., 2009, 2012](#)), в ходе которых, как правило, изучались лишь единичные штаммы прокариот.

Влияние изменения доступности воды на таксономическое разнообразие и метаболическую активность почвенных микробных сообществ практически не изучено. Исследования таксономического состава в подобных работах единичны и ограничивались, как правило, лишь определением соотношения биомассы бактерий и грибов или соотношений биомассы грамположительных и грамотрицательных бактерий *in situ* ([Kakumanu et al., 2013](#)).

В работах по изучению микробных сообществ засушливых природных сред были отмечены значительный биотехнологический потенциал выделенных штаммов и потребность в дальнейших исследованиях ксеротолерантных микроорганизмов, в особенности прокариот, и их таксономического разнообразия и метаболических особенностей, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения ([Margesin et al., 2001](#); [Azua-Bustos et al., 2014](#); [Mohammadipanah et al., 2016](#)). При этом предполагается, что аридные почвы содержат большой пул бактерий-продуцентов различных биологически активных веществ ([Goodfellow et al., 2018](#)).

Таким образом, на сегодняшний день накоплен массив данных о разнообразии микроорганизмов аридных почв и пород *in situ*, установлено, что подобные экосистемы содержат множество ранее неизвестных видов бактерий и биотехнологически ценных штаммов. Однако разнообразие и характеристики культивируемых прокариот засушливых экотопов и изменения в структуре культивируемых бактериальных сообществ при изменении активности воды мало изучены.

Цель данного исследования – изучение изменения таксономической структуры культивируемого бактериального сообщества поверхностного горизонта серозема (Aridic Calcisol) пустыни Негев при снижении активности воды и выявление у изолятов биотехнологически перспективной ферментативной активности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлось культивируемое бактериальное сообщество, выделенное из поверхностного горизонта серозема, отобранного в пустыне Негев (30°47' N; 34°46' E; Израиль, условное обозначение образца SN2). Образец SN2 был асептично отобран с глубины 5–10 см в стерильный полипропиленовый кон-

тейнер. Согласно международной классификации реферативной базы данных почв (WRB) данная почва идентифицируется как Aridic Calcisol ([Cheptsov et al., 2018](#)).

Для выделения ксеротолерантных бактерий использовали технику накопительных культур: навески почвы массой 5 г помещали в культуральные колбы, содержащие 50 мл жидкой питательной среды R2A ([Reasoner, Geldreich, 1985](#)) с добавлением глицерина до значения A_w , равного 0.90. Выбранное значение активности воды считается нижней границей сохранения метаболической активности для большинства бактерий ([Cervenka et al., 2002](#)). Расчет значений A_w проводили по уравнению Норриша ([Grant, 2004](#); [Winston, Bates, 1960](#)). Полученные суспензии инкубировали в течение 14 суток на ротационной качалке со скоростью вращения 200 об./мин. После инкубации суспензии центрифугировали при 3 500 об./мин в течение 2 мин для осаждения минеральных частиц. Далее полученный супернатант центрифугировали при 14 000 об./мин в течение 2 мин для осаждения прокариотных клеток. Клетки ресуспендировали в стерильном фосфатно-солевом буферном растворе ($pH = 7.4$) и готовили серию 10-кратных разведений. Далее клеточные суспензии высевали на плотную питательную среду R2A с A_w 1.0 для получения единичных колоний и выделения чистых культур. Посевы инкубировали в течение 14 суток при $+25\text{ }^\circ\text{C}$, после чего проводили учет фенотипически уникальных колониеобразующих единиц (КОЕ) и их выделение в чистые культуры по стандартной методике ([Белов и др., 2020](#)).

Параллельно проводили микробиологический посев нативного образца, не подвергавшегося предварительному инкубированию, по общепринятой методике посева серии разведений почвенной суспензии ([Белов и др., 2020](#)) на плотную питательную среду R2A. Накопительные культуры и посевы проводили в трехкратной повторности.

Всего из исследованных накопительных культур выделили 148 штаммов аэробных гетеротрофных бактерий.

Для определения предельных значений A_w , при которых возможен рост выделенных штаммов, проводили культивирование исследуемых бактерий на жидкой питательной среде R3A ([Reasoner, Geldreich, 1985](#)) с добавлением разных концентраций

глицерина для получения градиента значений A_w от 1.0 до 0.9 с шагом в 0.01 ед. Инкубацию проводили в течение 42 суток при +25 °С в трехкратной повторности, после чего отмечали визуально регистрируемый рост на среде с соответствующей активностью воды.

Определение ферментативной активности чистых культур проводили с использованием селективных питательных сред для всех штаммов бактерий, выделенных из исследованного образца. Для определения нитрогеназной активности штаммы культивировали на безазотистой среде Эшби ([Lin, 2012](#)), стабильный рост на этой среде считали признаком наличия нитрогеназ. Для определения амилазной активности штаммы культивировали на среде с крахмалом в качестве основного источника углерода (дрожжевой экстракт 3 г; растворимый крахмал 10 г; агар-агар 12 г; дистиллированная вода 1 000 мл; pH = 7.5 ± 0.2). После инкубации в течение 72 ч к среде добавляли раствор Люголя для подтверждения гидролиза крахмала по развитию зоны просветления вокруг бактериальных колоний. Определение протеолитической активности проводили с использованием теста на способность к разжижению желатина ([Porres, Harris, 1974](#)).

Для определения таксономической структуры сообществ культивируемых бактерий использовали методы амплификации фрагмента гена 16S рРНК с универсальными вырожденными праймерами и последующее риботипирование с применением рестрикционного анализа ампликонов. Уникальные рибогенотипы секвенировали по Сенгеру для получения нуклеотидной последовательности фрагмента гена 16S рРНК.

Выделение ДНК чистых культур бактерий проводили по ранее описанной методике ([Belov et al., 2018](#)): биомассу чистых культур бактерий суспендировали в Трис-ЭДТА буферном растворе (pH = 7.8) с 5% детергента Triton X-100. Далее суспензии инкубировали на водяной бане при температуре 100 °С в течение 15 мин, затем обрабатывали на гомогенизаторе MiniLys (Bertin Instruments, Франция) при 5 000 об./мин в течение 30 с. Затем суспензию центрифугировали при 14 000 об./мин в течение 3 мин, полученную надосадочную жидкость использовали в качестве матрицы для проведения ПЦР.

Аmplификацию фрагмента гена 16S рРНК проводили с праймерной системой 27f + 537r (27f 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3' и 537r 5'-GTATTACCGCGGCTGCTG-3') по ранее описанной методике ([Belov et al., 2018](#)). Для проведения риботипирования полученные ампликоны последовательно обрабатывали эндонуклеазами рестрикции Alu I, Hae III, и Taq I (SibEnzyme, Россия) с сайтами рестрикции AG↑CT, GG↑CC и T↑CGA соответственно ([Cheptsov et al., 2017](#)). Ферментативные реакции проводили в соответствии с инструкциями производителя на амплификаторе BioRad T-100 (BioRad Laboratories, США). Продукты рестрикции визуализировали в 2%-ном агарозном геле с ДНК-специфичным красителем бромистым этидием. Результаты рестрикции фиксировали с помощью системы гель-документирования Doc-Print II (Vilber Lourmat, Франция). Ампликоны с одинаковыми рестрикционными профилями относили к одному рибогенотипу.

Секвенирование фрагментов гена 16S рРНК проводили в научно-исследовательской компании Евроген (Россия). Редактирование нуклеотидных последовательностей проводили с помощью программы Chromas Lite 2.6.6 (<http://technelysium.com.au/wp/chromas/>), выравнивание, сравнение и идентификацию последовательностей выполняли с помощью программы Clustal Omega (<https://www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalo/>) и алгоритма BLAST базы данных GenBank (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>). Полученные последовательности депонировали в базу данных GenBank под номерами OP740548-OP740582.

Обработку полученных результатов проводили с использованием пакета программ Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

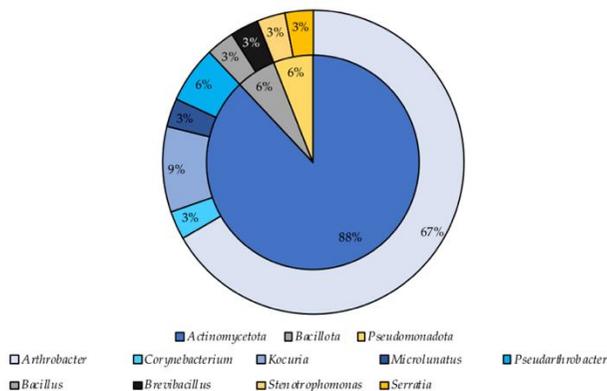
Таксономическое разнообразие сообществ культивируемых бактерий

Из нативного неинкубированного образца было выделено 33 фенотипически уникальных типа колоний, в то время как из накопительной культуры с Aw 0.9 было выделено 115 уникальных морфотипов. Культивируемое сообщество, выделенное из натив-

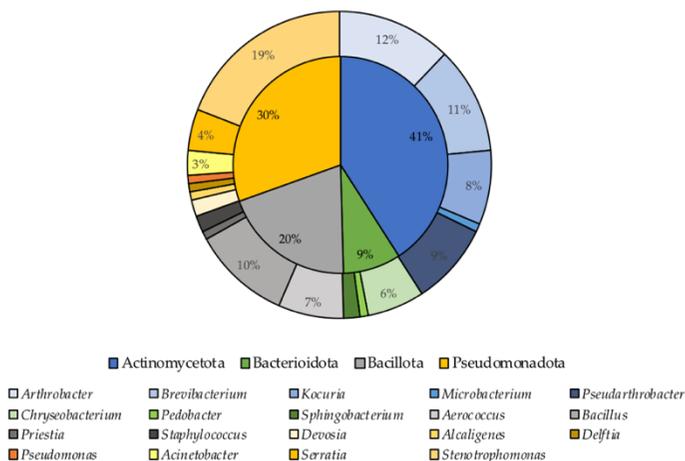
ного образца поверхностного горизонта серозема, характеризовалось абсолютным доминированием представителей филума Actinomycetota (более 80% изолятов), выявлены единичные представители филумов Bacillota и Pseudomonadota (рис. 1). В сообществе культивируемых бактерий, полученном после прединкубации при пониженной активности воды (A_w 0.9), обнаружены представители тех же филумов, однако их соотношение значительно изменилось: представители филума Actinomycetota оставались доминирующими (41% всех изолятов), значительно увеличилась представленность культивируемых бактерий филумов Bacillota и Pseudomonadota (20 и 30% от всех изолятов, выделенных в этих условиях, соответственно). Также были выделены представители филума Bacteroidota, доля которых составляла 9% от общего числа изолятов.

В сообществе, выделенном из нативного образца, были выявлены 9 родов аэробных гетеротрофных бактерий, причем представители рода *Arthrobacter* являлись абсолютными доминантами – на их долю приходилось 67% изолятов (рис. 1). После прединкубации при низкой доступности воды наблюдалось возрастание разнообразия культивируемых бактерий: были идентифицированы представители 19 родов бактерий, наиболее многочисленными были изоляты, относящиеся к роду *Stenotrophomonas*. Выделялись на питательной среде только из нативного образца и не были обнаружены после прединкубации штаммы родов *Brevibacillus*, *Corynebacterium* и *Microlunatus*. Вероятно, это обусловлено тем, что в нативном образце они являются минорными компонентами (~3%) культивируемого сообщества и не обнаруживались после прединкубации либо ввиду гетерогенности почвенных условий обитания микроорганизмов, либо ввиду низкой конкуретоспособности в условиях пониженной активности воды.

Отдельно стоит отметить, что в ходе исследования был выделен штамм рода *Pedobacter*, характеризующийся низким сходством нуклеотидной последовательностей (97.7 %) с последовательностями в базе данных GenBank, что указывает на то, что данный изолят может являться представителем ранее не описанного вида бактерий ([Chun et al., 2018](#)).



a



b

Рис. 1. Структура культивируемых бактериальных сообществ нативного образца серозема пустыни Негев (a) и инкубированного при активности воды (A_w) 0.9 (b). Таксоны, для которых не указаны доли в сообществе, составляли менее 3%.

Fig. 1. Culturable bacterial communities' structure isolated from the native Negev desert soil (a) and isolated from pre-incubated at water activity (A_w) 0.9 (b). Taxa for which percentage in the community are not indicated were less than 3%.

Определение способности к росту при пониженных значениях активности воды (A_w)

Анализ способности штаммов репродуцировать в культуре на средах с низкими значениями A_w выявил большую долю ксеротолерантных штаммов, выделенных из сообщества, прединкубированного при A_w 0.9, по сравнению с сообществом, выделенным из нативного образца (рис. 2). Большинство изолятов, выделенных как из прединкубированного, так и из нативного образца, в качестве нижней границы роста *in vitro* характеризовались значениями A_w в диапазоне 0.97–0.95. В то же время среди штаммов, выделенных из прединкубированного образца, обнаружены изоляты, способные расти на средах с A_w 0.93 и 0.91 (4 и 7 штаммов соответственно). Нижние границы A_w , при которых возможен рост изученных бактериальных культур, представлены на рисунке 2. Наиболее ксеротолерантными по результатам тестирования были представители родов *Stenotrophomonas*, *Staphylococcus*, *Brevibacterium*, *Bacillus* и *Aerococcus*.

Ферментативная активность выделенных штаммов

Способность к росту на безазотистой среде, которая может указывать на способность к фиксации молекулярного азота, проявили 27 и 15% штаммов, выделенных из нативного и прединкубированного при пониженной A_w образцов поверхностного горизонта серозема пустыни Негев соответственно. Амилотилитическую активность проявляли 27 и 19% штаммов, выделенных при упомянутых условиях, соответственно.

Протеолитическая активность выявлена у 18 и 19% изолятов соответственно. Выявлены штаммы, проявляющие множественную активность исследованных ферментов (рис. 3). Наиболее примечателен штамм рода *Microbunatus*, выделенный из нативного образца серозема, проявляющий в культуре способность к росту на безазотистой среде, амилотилитическую и протеолитическую активности.

Сопоставление прединкубации при пониженной A_w с другими подходами к культивированию

Обнаружение представителей филумов Actinomycetota, Bacillota, Pseudomonadota и Bacterioidota является типичным для почв и пород жарких аридных пустынь (Belov et al., 2018, 2019; Sun et al., 2018; Warren-Rhodes et al., 2019; Molina-Menor et al., 2021).

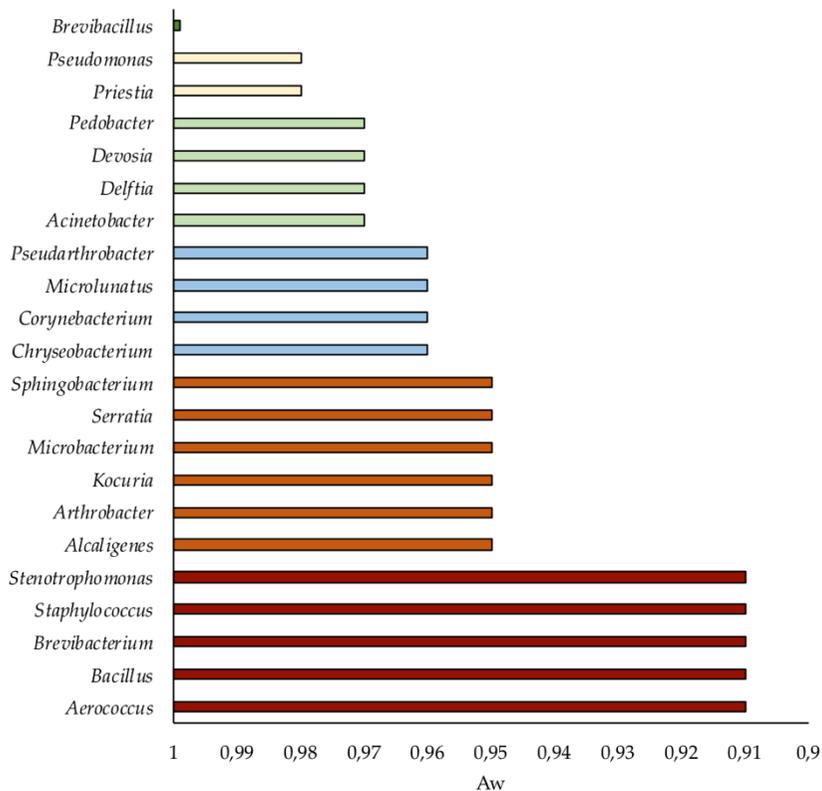
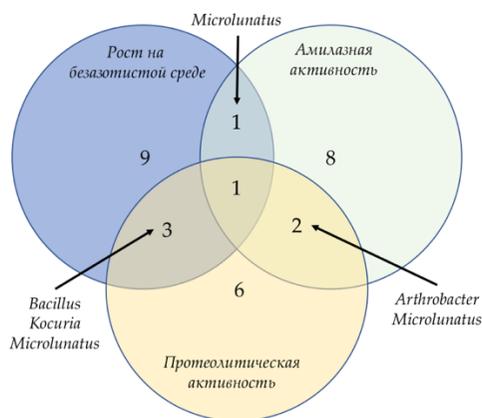
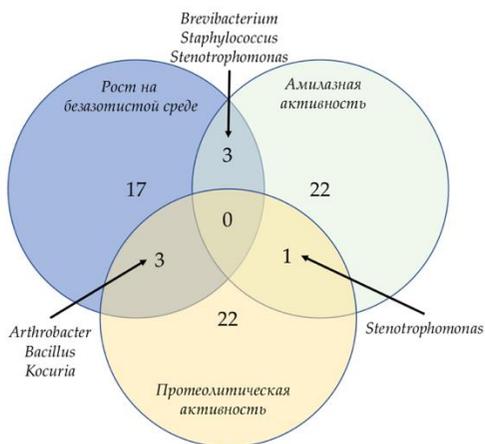


Рис. 2. Нижняя граница активности воды (A_w), при которой зарегистрирован рост представителей различных родов бактерий, выделенных из исследованной почвы.

Fig. 2. Lowest values of water activity (A_w) at which representatives of different genera, isolated from the studied soil, were able to growth.



a



b

Рис. 3. Число штаммов, выделенных из нативного (a) и прединкубированного (b) образцов пустынной почвы, способных к росту на безазотистой среде, амилолитической и протеолитической активности.

Fig. 3. The number of strains isolated from native (a) and pre-incubated (b) desert soil samples capable to growth on a nitrogen-free medium, amylolytic and proteolytic activity.

В то же время, использование питательных сред с низкой активностью воды для выделения микроорганизмов является редкостью, хотя позволяет выявить более высокое разнообразие культивируемых бактерий, выделяющихся из одного и того же почвенного образца, о чем свидетельствуют результаты проведенного исследования. Высокая доля представителей филума *Actinomycetota*, выделенных из пустынной почвы, хорошо согласуется с данными о множественной стресс-толерантности актинобактерий к широкому спектру физико-химических воздействий, в частности, к присутствию высоких концентраций водорастворимых солей, сильных окислителей, к высоким и низким значениям температур и pH ([Zenova et al., 2011](#); [Mohammadipannah, Wink, 2016](#); [Belov et al., 2019](#), [2020](#)). Примечательно возрастание доли представителей филумов *Pseudomonadota* и *Bacillota* в сообществе прединкубированного при Aw 0.9 образца. Существенным ограничением метода посева на лабораторные среды является влияние выбора среды и условий культивирования на получаемые результаты. Вероятно, условия пониженной активности воды ближе к условиям существования бактериальных клеток *in situ*, что способствует культивированию большего разнообразия потенциально культивируемых форм и их дальнейшему выделению. По-видимому, механизм этого явления заключается в небольшом снижении скорости роста быстрорастущих на распространенных универсальных лабораторных питательных средах, в частности, представителей филумов *Actinomycetota*, благодаря чему снижается конкурентная нагрузка на представителей других филумов.

Как упоминалось выше, аридные экосистемы содержат большой пул неописанных культивируемых микроорганизмов и, в частности, актинобактерий ([Goodfellow et al., 2018](#); [Nithya et al., 2018](#)). Проблемы изучения биоразнообразия культивируемых бактерий, их вклада в экосистемные и биосферные процессы и возможное использование в биотехнологических целях являются актуальными для современной почвенной микробиологии и решаются с применением разных техник и подходов: с применением разных питательных сред, инкубации посевов при различных температурах, предвзательном увлажнении почв или прединкубацией с добавлением различных источников углерода, реактивирую-

щих агентов или, напротив, селективных ингибиторов различных групп микроорганизмов. Например, с помощью посева на несколько питательных сред в градиенте их концентраций из образцов почвенных корочек пустыни Табернас (Испания) было выделено 254 штамма, из которых 31%, предположительно, относились к неописанным видам бактерий ([Molina-Menor et al., 2021](#)), инкубация посевов из пустынных почв при различных температурах культивирования позволяет выделить большее разнообразие культивируемых бактерий ([Belov et al., 2018, 2019](#)). В то же время применение сред с пониженной активностью воды возможно как с прединкубацией сообществ, выполненной в данной работе, так и без нее с применением техники прямого микробиологического посева почвенной суспензии на серию питательных сред, различающихся активностью воды. Оба указанных подхода позволяют выделить большее разнообразие культивируемых бактерий, однако посев почвенных суспензий на плотные питательные среды в диапазоне A_w от 1.0 до 0.9 позволяет выделить большее число ранее не описанных видов культивируемых бактерий ([Cheptsov et al., 2023](#)) по сравнению с выделением из прединкубированных при низкой активности воды.

Большинство культивируемых бактерий не способно к росту на средах с A_w ниже 0.95–0.94, а нижним пределом для подавляющего большинства бактерий считается значение A_w равное 0.9 ([Cervenka et al., 2002](#); [Fontana, 2020](#); [Stanaszek-Tomal, 2020](#)). В связи с этим выявленные штаммы, способные к росту при A_w 0.91, могут представлять интерес для дальнейшего изучения физиологических процессов, обуславливающих их способность к росту в условиях низкой обеспеченности доступной влаги, и для внедрения в биотехнологические процессы и разработку бактериальных препаратов, способствующих росту растений. Штаммы, проявляющие способность к росту на безазотистых средах, способные к гидролизу крахмала и полипептидов могут способствовать росту растений. Особый интерес представляют штаммы, способные к осуществлению нескольких ферментативных реакций, сохраняющие активность при низкой доступности влаги. В данном исследовании выявлен один штамм рода *Microlunatus*, предположительно, способный к проведению всех трех исследованных ферментатив-

ных реакций, сохраняющий способность к росту *in vitro* вплоть до Aw 0.96. Среди штаммов, способных к росту в культуре при Aw 0.93 и 0.91 обнаружены штаммы, способные к росту на безазотистой среде и гидролизу крахмала и полипептидов. Дальнейшее изучение ксеротолерантных бактерий может выявить продуцентов биотехнологически значимых ферментов, способных сохранять активность *in situ* в условиях дефицита влаги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование биоразнообразия культивируемых бактерий, способных к репродукции в условиях пониженной доступности воды. В ходе работы микробное сообщество было прединкубировано в накопительной культуре с Aw 0.9, рассматриваемой в качестве нижней границы, при которой возможно сохранение метаболической активности большинства прокариот. Из нативной и прединкубированной почв были выделены и идентифицированы 148 фенотипически уникальных чистых культур бактерий 22 родов. Полученные данные свидетельствуют об увеличении таксономического разнообразия культивируемых бактерий при использовании для выделения из аридных почв этапа прединкубирования на среде с пониженной активностью воды.

В результате работы выделена культура рода *Pedobacter*, которая, вероятно, является представителем не описанного ранее вида бактерий. Обнаружены штаммы родов *Aerococcus*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Staphylococcus* и *Stenotrophomonas*, способные расти при Aw 0.91, дальнейшее изучение которых перспективно с позиций обнаружения физиологических механизмов ксеротолерантности и биотехнологического применения. Выявлены штаммы, проявляющие ферментативную активность, способствующую росту растений.

Полученные результаты подтверждают существующую гипотезу о том, что аридные экосистемы, в частности, пустынные почвы и породы, являются депозитарием ранее не описанных видов бактерий с уникальными физиологическими свойствами. Учитывая интенсификацию процессов аридизации климата и деградации почв, наблюдающуюся в последние десятилетия, изучение микробных сообществ аридных экотопов, их функциональной ак-

тивности и потенциала для применения в биотехнологических процессах является актуальной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А.А., Чепцов В.С., Лысак Л.В. Методы идентификации почвенных микроорганизмов. М.: МАКС Пресс, 2020. 196 с.
2. Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review // *Geoderma*. 2016. Vol. 262. P. 101–111. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009).
3. Alotaibi M.O., Sonbol H.S., Alwakeel S.S., Suliman R.S., Fodah R.A., Jaffal A.S.A., AlOthman N. I., Mohammed A.E. Microbial diversity of some sabkha and desert sites in Saudi Arabia // *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020. Vol. 27. No. 10. P. 2778–2789. DOI: [10.1016/j.sjbs.2020.06.038](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.038).
4. Azua-Bustos A., González-Silva C. Biotechnological applications derived from microorganisms of the Atacama Desert // *BioMed research international*. 2014. Vol. 2014. DOI: [10.1155/2014/909312](https://doi.org/10.1155/2014/909312).
5. Belov A.A., Cheptsov V.S., Manucharova N.A., Ezhelev Z.S. Bacterial communities of Novaya Zemlya archipelago ice and permafrost // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 67. DOI: [10.3390/geosciences10020067](https://doi.org/10.3390/geosciences10020067).
6. Belov A.A., Cheptsov V.S., Vorobyova E.A. Soil bacterial communities of Sahara and Gibson deserts: Physiological and taxonomical characteristics // *AIMS Microbiol.* 2018. Vol. 4. No. 4. P. 685. DOI: [10.3934/microbiol.2018.4.685](https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.685).
7. Belov A.A., Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Manucharova N.A., Ezhelev Z.S. Stress-tolerance and taxonomy of culturable bacterial communities isolated from a central Mojave Desert soil sample // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 4. P.166. DOI: [10.3390/geosciences9040166](https://doi.org/10.3390/geosciences9040166).
8. Bodor A., Bounedjoum N., Vincze G.E., Erdeiné Kis Á., Laczi K., Bende G., Szilágyi A., Kovács T., Perei K., Rákhely G. Challenges of unculturable bacteria: environmental perspectives // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 1–22. DOI: [10.1007/s11157-020-09522-4](https://doi.org/10.1007/s11157-020-09522-4).
9. Bull A.T. Actinobacteria of the extremobiosphere // *Extremophiles Handbook*, K. Horikoshi (Ed.). Tokyo: Springer, 2011. P. 1203–1240. DOI: [10.1007/978-4-431-53898-1_58](https://doi.org/10.1007/978-4-431-53898-1_58).
10. Cervenka L., Vytrasova M., Jelinek D., Brezina P. Determination of minimum water activity values for the survival of bacteria in a culture medium

// Bulletin of Food Research. 2002. Vol. 41. No. 1. P. 59–68. URL:
<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=SK2002000296>.

11. *Cheptsov V., Vorobyova E., Belov A., Pavlov A., Tsurkov D., Lomasov V., Bulat S.* Survivability of soil and permafrost microbial communities after irradiation with accelerated electrons under simulated Martian and open space conditions // *Geosciences*. 2018. Vol. 8. No. 8. P. 298. DOI: [10.3390/geosciences8080298](https://doi.org/10.3390/geosciences8080298).

12. *Cheptsov V.S., Belov A.A., Sotnikov I.V.* Diversity of Bacteria Cultured from Arid Soils and Sedimentary Rocks Under Conditions of Available Water Deficiency // *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. No. 5. In press.

13. *Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Manucharova N.A., Gorlenko M.V., Pavlov A.K., Vdovina M.A., Bulat, S.A.* 100 kGy gamma-affected microbial communities within the ancient Arctic permafrost under simulated Martian conditions // *Extremophiles*. 2017. Vol. 21. No. 6. P. 1057–1067. DOI: [10.1007/s00792-017-0966-7](https://doi.org/10.1007/s00792-017-0966-7).

14. *Chun J., Oren A., Ventosa A., Christensen H., Arahal D.R., da Costa M.S., Rooney A.P., Yi H., Xu X.W., De Meyer S., Trujillo M.E.* Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes // *International journal of systematic and evolutionary microbiology*. 2018. Vol. 68. No. 1. P. 461–466. DOI: [10.1099/ijsem.0.002516](https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002516).

15. *Connon S.A., Lester E.D., Shafaat H.S., Obenhuber D.C., Ponce A.* Bacterial diversity in hyperarid Atacama Desert soils // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. Vol. 112. No. G4. DOI: [10.1029/2006JG000311](https://doi.org/10.1029/2006JG000311).

16. *Fontana Jr A.J.* Minimum Water Activity Limits for Growth of Microorganisms // *Water Activity in Foods*. 2020. Vol. 406. P. 571–572. DOI: [10.1002/9781118765982](https://doi.org/10.1002/9781118765982).

17. *Goodfellow M., Nouioui I., Sanderson R., Xie F., Bull A.T.* Rare taxa and dark microbial matter: novel bioactive actinobacteria abundant in Atacama Desert soils // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2018. Vol. 111. No. 8. P. 1315–1332. DOI: [10.1007/s10482-018-1088-7](https://doi.org/10.1007/s10482-018-1088-7).

18. *Grant W.D.* Life at low water activity // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 2004. Vol. 359. No. 1448. P. 1249–1267. DOI: [10.1098/rstb.2004.1502](https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1502).

19. *Harwani D.* Biodiversity of rare thermophilic actinomycetes in the great Indian Thar desert: an overview // *Indo American Journal of Pharmaceutical Research*. 2013. Vol. 3. P. 9349–9356.

20. *Jackson R.B., Anderson L.J., Pockman W.T.* Measuring water availability and uptake in ecosystem studies // *Methods in ecosystem science*. Springer, New York, NY, 2000. P. 199–214. DOI: [10.1007/978-1-4612-1224-9_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1224-9_14).

21. *Kakumanu M.L., Cantrell C.L., Williams M.A.* Microbial community response to varying magnitudes of desiccation in soil: a test of the osmolyte accumulation hypothesis // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 57. P. 644–653. DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.08.014](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.08.014).
22. *Kudrevatykh I.Y., Kalinin P.I., Mitenko G.V.* The effect of changes vegetation cover on the chemical properties of steppe soils during climate aridization // *Plant and Soil*. 2022. P. 1–20. DOI: [10.1007/s11104-022-05704-x](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05704-x).
23. *Lebre P.H., De Maayer P., Cowan D.A.* Xerotolerant bacteria: surviving through a dry spell // *Nature Reviews Microbiology*. 2017. Vol. 15. No. 5. P. 285–296. DOI: [10.1038/nrmicro.2017.16](https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.16).
24. *Lin L., Li Z., Hu C., Zhang X., Chang S., Yang L., An Q.* Plant growth-promoting nitrogen-fixing enterobacteria are in association with sugarcane plants growing in Guangxi, China // *Microbes and environments*. 2012. Vol. 27. No. 4. P. 391–398. DOI: [10.1264/jsme2.ME11275](https://doi.org/10.1264/jsme2.ME11275).
25. *Luo X., Wang J., Zeng X.C., Wang Y., Zhou L., Nie Y., Fang C.* *Mycetocola manganoxydans* sp. nov., an actinobacterium isolated from the Taklamakan desert // *International journal of systematic and evolutionary microbiology*. 2012. Vol. 62. No. 12. P. 2967–2970. DOI: [10.1099/ijs.0.038877-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.038877-0).
26. *Margesin R., Schinner F.* Potential of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology // *Extremophiles*. 2001. Vol. 5. No. 2. P. 73–83. DOI: [10.1007/s007920100184](https://doi.org/10.1007/s007920100184).
27. *Mohammadipanah F., Wink J.* Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity // *Frontiers in microbiology*. 2016. Vol. 6. P. 1541. DOI: [10.3389/fmicb.2015.01541](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01541).
28. *Molina-Menor E., Gimeno-Valero H., Pascual J., Peretó J., Porcar M.* High culturable bacterial diversity from a European desert: The Tabernas desert // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 11. P. 583120. DOI: [10.3389/fmicb.2020.583120](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.583120).
29. *Montero-Calasanz M., Göker M., Rohde M., Schumann P., Pötter G., Spröer C., Klenk H. P.* *Geodermatophilus siccatus* sp. nov., isolated from arid sand of the Saharan desert in Chad // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2013. Vol. 103. No. 3. P. 449–456. DOI: [10.1007/s10482-012-9824-x](https://doi.org/10.1007/s10482-012-9824-x).
30. *Nithya K., Muthukumar C., Biswas B., Alharbi N.S., Kadaikunnan S., Khaled J.M., Dhanasekaran D.* Desert actinobacteria as a source of bioactive compounds production with a special emphases on Pyridine-2, 5-diacetamide a new pyridine alkaloid produced by *Streptomyces* sp. DA3-7 // *Microbiological Research*. 2018. Vol. 207. P. 116–133. DOI: [10.1016/j.micres.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.11.012).

31. *Porres J.M., Harris D.* Rapid gelatin liquefaction test // *American Journal of Clinical Pathology*. 1974. Vol. 62. No. 3. P. 428–430. DOI: [10.1093/ajcp/62.3.428](https://doi.org/10.1093/ajcp/62.3.428).
32. *Reasoner D.J., Geldreich E.E.* A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water // *Applied and Environmental Microbiology*. 1985. Vol. 49. No. 1. P. 1–7. DOI: [10.1128/aem.49.1.1-7.1985](https://doi.org/10.1128/aem.49.1.1-7.1985).
33. *Santhanam R., Rong X., Huang Y., Andrews B.A., Asenjo J.A., Goodfellow M.* *Streptomyces bullii* sp. nov., isolated from a hyper-arid Atacama Desert soil // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2013. Vol. 103. No. 2. P. 367–373. DOI: [10.1007/s10482-012-9816-x](https://doi.org/10.1007/s10482-012-9816-x).
34. *Savage M.J., Ritchie J. T., Bland W.L., Dugas, W.A.* Lower limit of soil water availability // *Agronomy Journal*. 1996. Vol. 88. No. 4. P. 644–651. DOI: [10.2134/agronj1996.00021962008800040024x](https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040024x).
35. *Solden L., Lloyd K., Wrighton K.* The bright side of microbial dark matter: lessons learned from the uncultivated majority // *Current opinion in microbiology*. 2016. Vol. 31. P. 217–226. DOI: [10.1016/j.mib.2016.04.020](https://doi.org/10.1016/j.mib.2016.04.020).
36. *Stanaszek-Tomal E.* Environmental factors causing the development of microorganisms on the surfaces of national cultural monuments made of mineral building materials // *Coatings*. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1203. DOI: [10.3390/coatings10121203](https://doi.org/10.3390/coatings10121203).
37. *Stevenson A., Hallsworth J.E.* Water and temperature relations of soil Actinobacteria // *Environmental microbiology reports*. 2014. Vol. 6. No. 6. P. 744–755. DOI: [10.1111/1758-2229.12199](https://doi.org/10.1111/1758-2229.12199).
38. *Sun Y., Shi Y.L., Wang H., Zhang T., Yu L.Y., Sun H., Zhang Y.Q.* Diversity of bacteria and the characteristics of actinobacteria community structure in Badain Jaran Desert and Tengger Desert of China // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. P. 1068. DOI: [10.3389/fmicb.2018.01068](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01068).
39. *Warren-Rhodes K.A., Lee K.C., Archer S.D., Cabrol N., Ng-Boyle L., Wettergreen D., Pointing S.B.* Subsurface microbial habitats in an extreme desert Mars-analog environment // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 69. P. 1–11. DOI: [10.3389/fmicb.2019.00069](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00069).
40. *Winston P.W., Bates D.H.* Saturated solutions for the control of humidity in biological research // *Ecology*. 1960. Vol. 41. No. 1. P. 232–237. DOI: [10.2307/1931961](https://doi.org/10.2307/1931961).
41. *Zalibekov Z.G.* The arid regions of the world and their dynamics in conditions of modern climatic warming // *Arid Ecosystems*. 2011. Vol. 1 No. 1. P. 1–7. DOI: [10.1134/S2079096111010094](https://doi.org/10.1134/S2079096111010094).
42. *Zenova G.M., Gryadunova A.A., Doroshenko E.A., Likhacheva A.A., Sudnitsyn I.I., Pochatkova T.N., Zvyagintsev D.G.* Influence of moisture on the vital activity of actinomycetes in a cultivated low-moor peat soil. // *Eurasian*

Soil Science. 2007. Vol. 40. No. 5. P. 560–564. DOI: [10.1134/S1064229307050110](https://doi.org/10.1134/S1064229307050110).

43. Zenova G.M., Manucharova N.A., Zvyagintsev D.G. Extremophilic and extremotolerant actinomycetes in different soil types // Eurasian Soil Science 2011. Vol. 44. No. 4. P. 417–436. DOI: [10.1134/S1064229311040132](https://doi.org/10.1134/S1064229311040132).

44. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Sudnitsyn I.I., Gracheva T.A., Lapygina E.V., Napol'skaya K.R., Sydnitsyna A.E. Development of actinomycetes in brown semidesert soil under low water pressure // Eurasian soil science. 2012. Vol. 45. No. 7. P. 717–723. DOI: [10.1134/S1064229312030155](https://doi.org/10.1134/S1064229312030155).

45. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Sudnitsyn I.I., Gracheva T.A., Napol'skaya K.R., Belousova M.A. Dynamics of spore germination and mycelial growth of streptomycetes under low humidity conditions // Microbiology. 2009. Vol. 78. No. 4. P. 440–444. DOI: [10.1134/S0026261709040079](https://doi.org/10.1134/S0026261709040079).

REFERENCES

1. Belov A.A., Cheptsov V.S., Lysak L.V., Soil microorganisms' identification methods, Moscow: MAKS Press, 2020, 196 p.
2. Adhikari K., Hartemink A.E., Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, Vol. 262, pp. 101–111, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009).
3. Alotaibi M.O., Sonbol H.S., Alwakeel S.S., Suliman R.S., Fodah R.A., Jaffal A.S.A., Alothman N.I., Mohammed A.E., Microbial diversity of some sabkha and desert sites in Saudi Arabia, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, Vol. 27, No. 10, pp. 2778–2789, DOI: [10.1016/j.sjbs.2020.06.038](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.038).
4. Azua-Bustos A., González-Silva C., Biotechnological applications derived from microorganisms of the Atacama Desert, *BioMed research international*, 2014, Vol. 2014, DOI: [10.1155/2014/909312](https://doi.org/10.1155/2014/909312).
5. Belov A.A., Cheptsov V.S., Manucharova N.A., Ezhelev Z.S., Bacterial communities of Novaya Zemlya archipelago ice and permafrost, *Geosciences*, 2020, Vol. 10, No. 2, p. 67, DOI: [10.3390/geosciences10020067](https://doi.org/10.3390/geosciences10020067).
6. Belov A.A., Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Soil bacterial communities of Sahara and Gibson deserts: Physiological and taxonomical characteristics, *AIMS Microbiol*, 2018, Vol. 4, No. 4, p. 685, DOI: [10.3934/microbiol.2018.4.685](https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.685).
7. Belov A.A., Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Manucharova N.A., Ezhelev Z.S., Stress-tolerance and taxonomy of culturable bacterial communities isolated from a central Mojave Desert soil sample, *Geosciences*, 2019, Vol. 9, No. 4, p. 166, DOI: [10.3390/geosciences9040166](https://doi.org/10.3390/geosciences9040166).

8. Bodor A., Bounedjoum N., Vincze G.E., Erdeiné Kis Á., Laczi K., Bende G., Szilágyi A., Kovács T., Perei K., Rákhely G. Challenges of unculturable bacteria: environmental perspectives, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020, Vol. 19, No. 1, pp. 1–22, DOI: [10.1007/s11157-020-09522-4](https://doi.org/10.1007/s11157-020-09522-4).
9. Bull A.T., Actinobacteria of the extremobiosphere, In: *Extremophiles Handbook*, K. Horikoshi (Ed.), Tokyo: Springer, 2011, pp. 1203–1240, DOI: [10.1007/978-4-431-53898-1_58](https://doi.org/10.1007/978-4-431-53898-1_58).
10. Cervenka L., Vytrasova M., Jelinek D., Brezina P., Determination of minimum water activity values for the survival of bacteria in a culture medium, *Bulletin of Food Research*, 2002, Vol. 41, No. 1, pp. 59–68, URL: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=SK2002000296>.
11. Cheptsov V., Vorobyova E., Belov A., Pavlov A., Tsurkov D., Lomasov V., Bulat S., Survivability of soil and permafrost microbial communities after irradiation with accelerated electrons under simulated Martian and open space conditions, *Geosciences*, 2018, Vol. 8, No. 8, p. 298, DOI: [10.3390/geosciences8080298](https://doi.org/10.3390/geosciences8080298).
12. Cheptsov V.S., Belov A.A., Sotnikov I.V. Diversity of Bacteria Cultured from Arid Soils and Sedimentary Rocks Under Conditions of Available Water Deficiency, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 56, No. 5, In press.
13. Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Manucharova N.A., Gorlenko M.V., Pavlov A.K., Vdovina M.A., Bulat S.A., 100 kGy gamma-affected microbial communities within the ancient Arctic permafrost under simulated Martian conditions, *Extremophiles*, 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 1057–1067, DOI: [10.1007/s00792-017-0966-7](https://doi.org/10.1007/s00792-017-0966-7).
14. Chun J., Oren A., Ventosa A., Christensen H., Arahal D.R., da Costa M.S., Rooney A.P., Yi H., Xu X.W., De Meyer S., Trujillo M.E., Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2018, Vol. 68, No. 1, pp. 461–466, DOI: [10.1099/ijsem.0.002516](https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002516).
15. Connors S.A., Lester E.D., Shafaat H.S., Obenhuber D.C., Ponce A., Bacterial diversity in hyperarid Atacama Desert soils, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, Vol. 112, No. G4, DOI: [10.1029/2006JG000311](https://doi.org/10.1029/2006JG000311).
16. Fontana Jr A.J., Minimum Water Activity Limits for Growth of Microorganisms, *Water Activity in Foods*, 2020, Vol. 406, pp. 571–572, DOI: [10.1002/9781118765982](https://doi.org/10.1002/9781118765982).
17. Goodfellow M., Nouioui I., Sanderson R., Xie F., Bull A.T., Rare taxa and dark microbial matter: novel bioactive actinobacteria abundant in Atacama Desert soils, *Antonie van Leeuwenhoek*, 2018, Vol. 111, No. 8, pp. 1315–1332, DOI: [10.1007/s10482-018-1088-7](https://doi.org/10.1007/s10482-018-1088-7).

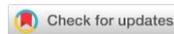
18. Grant W.D., Life at low water activity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2004, Vol. 359, No. 1448, pp. 1249–1267, DOI: [10.1098/rstb.2004.1502](https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1502).
19. Harwani D., Biodiversity of rare thermophilic actinomycetes in the great Indian Thar desert: an overview, *Indo American Journal of Pharmaceutical Research*, 2013, Vol. 3, pp. 9349–9356.
20. Jackson R.B., Anderson L.J., Pockman W.T., Measuring water availability and uptake in ecosystem studies, In: *Methods in ecosystem science*, New York: Springer, 2000, pp. 199–214, DOI: [10.1007/978-1-4612-1224-9_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1224-9_14).
21. Kakumanu M.L., Cantrell C.L., Williams M.A. Microbial community response to varying magnitudes of desiccation in soil: a test of the osmolyte accumulation hypothesis // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 57. P. 644–653. DOI: [10.1016/j.soilbio.2012.08.014](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.08.014).
22. Kudrevatykh I.Y., Kalinin P.I., Mitenko G.V., The effect of changes vegetation cover on the chemical properties of steppe soils during climate aridization, *Plant and Soil*, 2022, pp. 1–20, DOI: [10.1007/s11104-022-05704-x](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05704-x).
23. Lebre P.H., De Maayer P., Cowan D.A., Xerotolerant bacteria: surviving through a dry spell, *Nature Reviews Microbiology*, 2017, Vol. 15, No. 5, pp. 285–296, DOI: [10.1038/nrmicro.2017.16](https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.16).
24. Lin L., Li Z., Hu C., Zhang X., Chang S., Yang L., An Q., Plant growth-promoting nitrogen-fixing enterobacteria are in association with sugarcane plants growing in Guangxi, China, *Microbes and environments*, 2012, Vol. 27, No. 4, pp. 391–398, DOI: [10.1264/jsme2.ME11275](https://doi.org/10.1264/jsme2.ME11275).
25. Luo X., Wang J., Zeng X.C., Wang Y., Zhou L., Nie Y., Fang C., *Mycetocola manganoxydans* sp. nov., an actinobacterium isolated from the Taklamakan desert, *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2012, Vol. 62, No. 12, pp. 2967–2970, DOI: [10.1099/ijs.0.038877-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.038877-0).
26. Margesin R., Schinner F., Potential of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology, *Extremophiles*, 2001, Vol. 5, No. 2, pp. 73–83, DOI: [10.1007/s007920100184](https://doi.org/10.1007/s007920100184).
27. Mohammadipanah F., Wink J., Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity, *Frontiers in microbiology*, 2016, Vol. 6, pp. 1541, DOI: [10.3389/fmicb.2015.01541](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01541).
28. Molina-Menor E., Gimeno-Valero H., Pascual J., Peretó J., Porcar M., High culturable bacterial diversity from a European desert: The Tabernas desert, *Frontiers in Microbiology*, 2021, Vol. 11, pp. 583120, DOI: [10.3389/fmicb.2020.583120](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.583120).
29. Montero-Calasanz M., Göker M., Rohde M., Schumann P., Pötter G., Spröer C., Klenk H.P., *Geodermatophilus siccatus* sp. nov., isolated from arid

- sand of the Saharan desert in Chad, *Antonie van Leeuwenhoek*, 2013, Vol. 103, No. 3, pp. 449–456, DOI: [10.1007/s10482-012-9824-x](https://doi.org/10.1007/s10482-012-9824-x).
30. Nithya K., Muthukumar C., Biswas B., Alharbi N.S., Kadaikunnan S., Khaled J.M., Dhanasekaran D., Desert actinobacteria as a source of bioactive compounds production with a special emphases on Pyridine-2, 5-diacetamide a new pyridine alkaloid produced by *Streptomyces* sp. DA3-7, *Microbiological Research*, 2018, Vol. 207, pp. 116–133, DOI: [10.1016/j.micres.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.11.012).
31. Porres J.M., Harris D., Rapid gelatin liquefaction test, *American Journal of Clinical Pathology*, 1974, Vol. 62, No. 3, pp. 428–430, DOI: [10.1093/ajcp/62.3.428](https://doi.org/10.1093/ajcp/62.3.428).
32. Reasoner D.J., Geldreich E.E., A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water, *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, Vol. 49, No. 1, pp. 1–7, DOI: [10.1128/aem.49.1.1-7.1985](https://doi.org/10.1128/aem.49.1.1-7.1985).
33. Santhanam R., Rong X., Huang Y., Andrews B.A., Asenjo J.A., Goodfellow M., *Streptomyces bullii* sp. nov., isolated from a hyper-arid Atacama Desert soil, *Antonie van Leeuwenhoek*, 2013, Vol. 103, No. 2, pp. 367–373, DOI: [10.1007/s10482-012-9816-x](https://doi.org/10.1007/s10482-012-9816-x).
34. Savage M.J., Ritchie J. T., Bland W.L., Dugas, W.A., Lower limit of soil water availability, *Agronomy Journal*, 1996, Vol. 88, No. 4, pp. 644–651, DOI: [10.2134/agronj1996.00021962008800040024x](https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040024x).
35. Solden L., Lloyd K., Wrighton K., The bright side of microbial dark matter: lessons learned from the uncultivated majority, *Current opinion in microbiology*, 2016, Vol. 31, pp. 217–226, DOI: [10.1016/j.mib.2016.04.020](https://doi.org/10.1016/j.mib.2016.04.020).
36. Stanaszek-Tomal E., Environmental factors causing the development of microorganisms on the surfaces of national cultural monuments made of mineral building materials, *Coatings*, 2020, Vol. 10, No. 12, p. 1203, DOI: [10.3390/coatings10121203](https://doi.org/10.3390/coatings10121203).
37. Stevenson A., Hallsworth J.E. Water and temperature relations of soil Actinobacteria // *Environmental microbiology reports*. 2014. Vol. 6. No. 6. P. 744–755. DOI: [10.1111/1758-2229.12199](https://doi.org/10.1111/1758-2229.12199).
38. Sun Y., Shi Y.L., Wang H., Zhang T., Yu L.Y., Sun H., Zhang Y.Q., Diversity of bacteria and the characteristics of actinobacteria community structure in Badain Jaran Desert and Tengger Desert of China, *Frontiers in Microbiology*, 2018, Vol. 9, p. 1068, DOI: [10.3389/fmicb.2018.01068](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01068).
39. Warren-Rhodes K.A., Lee K.C., Archer S.D., Cabrol N., Ng-Boyle L., Wettergreen D., Pointing S.B., Subsurface microbial habitats in an extreme desert Mars-analog environment, *Frontiers in Microbiology*, 2019, Vol. 69, pp. 1–11, DOI: [10.3389/fmicb.2019.00069](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00069).

40. Winston P.W., Bates D.H., Saturated solutions for the control of humidity in biological research, *Ecology*, 1960, Vol. 41, No. 1, pp. 232–237, DOI: [10.2307/1931961](https://doi.org/10.2307/1931961).
41. Zalibekov Z.G., The arid regions of the world and their dynamics in conditions of modern climatic warming, *Arid Ecosystems*, 2011, Vol. 1, No. 1, pp. 1–7, DOI: [10.1134/S2079096111010094](https://doi.org/10.1134/S2079096111010094).
42. Zenova G.M., Gryadunova A.A., Doroshenko E.A., Likhacheva A.A., Sudnitsyn I.I., Pochatkova T.N., Zvyagintsev D.G., Influence of moisture on the vital activity of actinomycetes in a cultivated low-moor peat soil, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 5, pp. 560–564, DOI: [10.1134/S1064229307050110](https://doi.org/10.1134/S1064229307050110).
43. Zenova G.M., Manucharova N.A., Zvyagintsev D.G., Extremophilic and extremotolerant actinomycetes in different soil types, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 4, pp. 417–436, DOI: [10.1134/S1064229311040132](https://doi.org/10.1134/S1064229311040132).
44. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Sudnitsyn I.I., Gracheva T.A., Lapygina E.V., Napol'skaya K.R., Sydnitsyna A.E., Development of actinomycetes in brown semidesert soil under low water pressure, *Eurasian soil science*, 2012, Vol. 45, No. 7, pp. 717–723, DOI: [10.1134/S1064229312030155](https://doi.org/10.1134/S1064229312030155).
45. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Sudnitsyn I.I., Gracheva T.A., Napol'skaya K.R., Belousova M.A., Dynamics of spore germination and mycelial growth of streptomycetes under low humidity conditions, *Microbiology*, 2009, Vol. 78, No. 4, pp. 440–444, DOI: [10.1134/S0026261709040079](https://doi.org/10.1134/S0026261709040079).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-155-187



Ссылки для цитирования:

Аверьянов А.А., Андросова Е.Д., Русаков А.В. Винодельческий терруар – ориентир при выборе сортов подвоев винограда для почв с разными характеристиками // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 155-187. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-155-187

Cite this article as:

Averianov A.A., Androsova E.D., Rusakov A.V., Winemaking terroir – the guideline for choosing of grape rootstocks for soils with different characteristics, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 155-187, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-155-187

Винодельческий терруар – ориентир при выборе сортов подвоев винограда для почв с разными характеристиками¹

© 2023 г. А. Аверьянов^{1,2*}, Е. Д. Андросова^{1**},
А. В. Русаков^{1***}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.

*<https://orcid.org/0000-0002-6884-5769>,

e-mail: averianov@terroirconcept.com,

**<https://orcid.org/0000-0002-2799-0628>,

e-mail: jane.androsova@yandex.ru,

***<https://orcid.org/0000-0002-1351-9050>,

e-mail: spp-06@mail.ru.

²ООО “Терруар Концепт СПбГУ”,
198261, Санкт-Петербург, пр-кт Маршала Жукова, д. 60, к. 1, литера В.

Поступила в редакцию 22.01.2023, после доработки 03.02.2023,
принята к публикации 27.06.2023

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Резюме: Выбор сортов подвоев является одной из первых и наиболее важных стадий при закладке виноградных насаждений в условиях привитой культуры, от которой зависит продуктивность подвойно-привитой комбинаций и дальнейшая цепочка проектных решений: пространственное размещение рядов на земельном участке, сопутствующие производственному процессу агротехнические и агрохимические приемы. Принимая во внимание высокую значимость факторов терруара для виноградарства и виноделия, нами была осознана необходимость его детального учета на этой проектной стадии. Целью работы являлось создание алгоритма подбора сортов подвоев, опирающегося на локальные факторы терруара земельного участка и его дальнейшее применение в проектировании виноградных насаждений. На основании анализа литературных источников и агрономического опыта специалистов виноградарства и виноделия нами были определены ключевые стрессовые факторы, которые в целом необходимо учитывать при выборе сортов подвоев. По результатам комплексного исследования терруара и аналитической диагностики почвенных проб, отобранных на земельном участке, располагающемся в Бахчисарайском районе Республики Крым, были уточнены и приоритизированы локальные стрессовые факторы, представляющие риски непосредственно на участке апробации ландшафтно-адаптированного подхода к выбору подвоев: карбонатное состояние, риск заражения филлоксерой, высокое содержание тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе, кратковременные засухи, риск локального переувлажнения, дефицит фосфора. Всего для каждого выделенного почвенного ареала было рассмотрено 20 наиболее распространенных в коммерческом отношении сортов подвоев. В результате применения сценария сокращения выборки, основанного на приоритизации вышеупомянутых стрессовых факторов, количество рассматриваемых сортов подвоев было сокращено до трех вариантов: I103 Paulsen, 140 Ruggeri и Fercal, – которые были оценены в баллах между собой и относительно локальных условий терруара земельного участка для дальнейшего сопоставления их с рыночными и логистическими аспектами при принятии окончательного проектного решения.

Ключевые слова: терруар, агрообраземы, агроземы, подвой, привой, виноградарство, виноделие.

Winemaking terroir – the guideline for choosing of grape rootstocks for soils with different characteristics¹

© 2023 A. A. Averianov^{1,2*}, E. D. Androsova^{1**},
A. V. Rusakov^{1***}

¹*Saint-Petersburg State University,
7–9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russian Federation.*

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-6884-5769>,

e-mail: averianov@terroirconcept.com,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-2799-0628>,

e-mail: jane.androsova@yandex.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-1351-9050>,

e-mail: spp-06@mail.ru.

²*Terroir Concept SPBU LLC,
lit. B, Bld.1, Marshal Zhukov Ave., St. Petersburg 198261,
Russian Federation.*

Received 21.01.2023, Revised 03.02.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The selection of rootstocks is one of the first and most important stages in the establishment of grape plantations under grafted conditions, which determines the productivity of rootstock-scion combinations and the further chain of design solutions: spatial placement of rows on the land plot, accompanying the production process of agronomic and agrochemical methods. Given the high importance of terroir factors for viticulture and winemaking, we were aware of the need to consider them in detail at this design stage. The aim was to create an algorithm for selecting varieties based on local terroir factors and apply it to the design of vineyards. Based on the analysis of literary sources and the agronomic experience of viticulture and winemaking specialists, we have identified key stress factors that in general, should be taken into account when selecting varieties of rootstocks. Based on the results of a comprehensive study of terroir and analytical diagnostics of soil samples taken on a land plot located in the Bakhchisaray district of the Republic of Crimea, local stress factors representing risks were clarified and prioritized neo-medially at the site of testing the landscape-adapted approach

¹ *Proceedings of the VI Conference of Young Scientists. “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.*

to the selection of rootstocks: carbonate condition, risk of phylloxera infestation, high content of fine fractions in granulometric composition, short-term droughts, risk of local overwatering, phosphorus deficiency. In total 20 the most common commercial varieties of rootstocks were considered for each selected soil area. The sample reduction scenario, based on the prioritization of the above stressors, reduced the number of varieties considered to three variants: 1103 Paulsen, 140 Ruggeri, and Fercal, which were scored against each other and considering the local terroir conditions of the plot, for further comparison in terms of market and logistics in making the final design decision.

Keywords: terroir, Calcaric Cambisols (aric), Calcic Chernozems (aric), rootstock, scion, viticulture, winemaking.

ВВЕДЕНИЕ

Виноградарство и виноделие в России являются одними из наиболее динамично развивающихся направлений сельского хозяйства, особенно в последние годы, которые характеризуются устойчивым ростом площадей виноградников, развитием винодельческих хозяйств, увеличением урожайности винограда и непосредственно потребления вина ([Гагерова, Гармашова, 2020](#)). Для удовлетворения высоких показателей спроса в условиях современных экономических и политических реалий в том числе возможных санкционных ограничений на импорт винодельческой продукции и средств производства, а также уже существующих логистических проблем, актуальной является задача увеличения собственных площадей виноградников и посадочного материала ([Итоги первого Российского винодельческого форума, 2022](#)).

В виноградарстве и виноделии большое значение имеет концепция терруара – совокупность почвенно-климатических и орографических характеристик местности, придающая уникальные качественные и органолептические особенности вину, произведенному из винограда, выращенного на конкретной территории ([Resolution OIV, 2010](#)). Терруар – определяющий фактор при оценке пригодности земельного участка для возделывания винограда, выборе сортовой композиции виноградника, пространственного размещения насаждений и направления производства в целом ([Seguin, 1986](#)).

В условиях широко распространенной привитой культуры, одно из наиболее важных проектных решений – это определение подвойно-привойной комбинации, где первым этапом является выбор сорта подвоя, который можно рассматривать как инструмент адаптации к широкому перечню стрессовых факторов почвенного компонента винодельческого терруара. К сожалению, в настоящее время в производственной практике зачастую пренебрегают важностью этой стадии реализации проекта виноградника: используются шаблонные подходы, ориентиром выступает выбор соседних землепользователей, что в дальнейшем приводит к необходимости осуществлять различные виды коррекции плодородия почв.

Целью данной работы являлось создание алгоритма подбора сортов подвоев, опирающегося на факторы терруара земельного участка и его дальнейшее применение в проектировании виноградных насаждений. Основной задачей, поставленной перед разрабатываемым подходом, являлось рациональное сокращение выборки множества широко представленных на рынке сортов подвоев до наиболее подходящих к локальным условиям и ранжирование их в порядке приоритета, что имеет значение при дальнейшем сопоставлении их рыночной и логистической доступности.

По результатам анализа литературных источников, данных топографической съемки и лабораторных исследований почвенных образцов, взятых послойно по почвенному профилю, нами были выявлены и приоритизированы ключевые стрессовые факторы, оказывающие влияние на продуктивность подвоев в целом и непосредственно на участке работ, на основании чего был разработан сценарий сокращения выборки по степени их устойчивости к данным стрессовым факторам.

Стрессовые факторы продуктивности сортов подвоев и существующие подходы их приоритизации

Первоначально способ возделывания европейских сортов винограда с использованием привитых саженцев являлся ответом на филлоксерный кризис, погубивший большие площади виноградных насаждений Старого света в XIX в. ([Жуков и др., 1989](#)). Альтернативой привитой культуре было применение пестицидов,

которые и без того являются неотъемлемой частью производственного процесса при возделывании винограда из-за другого и не менее значимого биотического фактора стресса – грибных заболеваний ([Аверьянов, Овчинников, 2018](#)).

Впоследствии успешное применение филлоксероустойчивых подвоев стало отправной точкой для более широкого использования данной технологии уже не только для противодействия филлоксере, но и другим биотическим и абиотическим стрессовым факторам: грибным заболеваниями, бактериальному раку, высокому содержанию активной извести, сильнощелочной реакции среды и другим ([Rahemi et al., 2022](#)).

В таблице 1 нами были генерализованы ключевые биотические и абиотические стрессовые факторы, оказывающие влияние на продуктивность подвойно-привойных комбинаций ([Жуков и др., 1989](#); [Christensen et al., 2003](#); [Guide des Vignobles Rhône Méditerranée, 2015](#); [Rahemi et al., 2022](#)). Также не менее важную роль играют иные производственные аспекты, не включенные в таблицу 1, но которые тем не менее необходимо учитывать в отдельных случаях: энергия роста, передаваемая подвоем привою, сила роста привоя, степень укоренения, адаптация к зимней настольной прививке и к прививке в поле, совместимость с конкретными культурными сортами. Причем для каждого из приведенных параметров существует ранжированный по степени устойчивости и адаптации перечень сортов подвоев.

В связи с тем, что в подавляющем большинстве случаев при реализации проекта виноградника производители сталкиваются не с одним проблемным почвенным параметром, а с ансамблем сопутствующих друг другу стрессовых факторов, актуализируется необходимость разработки алгоритмов подбора сортов подвоев.

Andrew G. Reynolds и Douglas A. Wardle в 2001 г. предложили следующий алгоритм подбора подвоев для закладки промышленных виноградников, основанный на последовательном отборе по семи критериям устойчивости в следующем порядке: устойчивость к филлоксере, устойчивость к нематодам, приспособленность к почвам с высоким рН (содержание извести), приспособленность к засоленным почвам;

Таблица 1. Биотические и абиотические стрессовые факторы продуктивности подвоев винограда
Table 1. Biotic and abiotic stress factors of the productivity of grape rootstocks

Биотические факторы	Абиотические факторы
Филлоксера	Глинистые почвы
Нематоды (роды: <i>Hemicriconemoides</i> , <i>Longidorus</i> , <i>Meloidogyne</i> , <i>Mesocriconema</i> , <i>Paratylenchus</i> , <i>Partytlenchus</i> , <i>Tylenchulus</i> , <i>Xiphinema</i>)	Песчаные почвы
	Каменистые почвы
	Маломощные почвы
	Риск дефицита почвенной влаги
Заболевания вирусной природы (семейства: <i>Alphajflexiviridae</i> , <i>Betaflexiviridae</i> , <i>Bromoviridae</i> , <i>Bunyaviridae</i> , <i>Caulimoviridae</i> , <i>Closteroviridae</i> , <i>Endornaviridae</i> , <i>Geminiviridae</i> , <i>Luteoviridae</i> , <i>Partitiviridae</i> , <i>Phenuiviridae</i> , <i>Potyviridae</i> , <i>Reoviridae</i> , <i>Secoviridae</i> , <i>Tombusviridae</i> , <i>Tymoviridae</i> , <i>Virgaviridae</i> , <i>Unassigned</i>)	Риск избытка почвенной влаги
	Низкие значения pH
	Содержание активной извести
	IPC (индекс продуктивности хлороза)
	Валовое содержание карбонатов в почве
Псевдогрибы, оомицеты (виды: <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Phytophthora cryptogea</i> , <i>Phytophthora drechsleri</i>)	Переуплотнение почвы
	Засоление почвы
Бактериальный рак (<i>Agrobacterium Tumefaciens</i>)	Дефицит макро- и микроэлементов
Грибные болезни (<i>Diatrypaceae</i> , <i>Botryosphaeriaceae</i> , <i>Basidiomycetes</i> , <i>Phaeoacremonium</i> , <i>Pa. chlamydospore</i> , <i>Cadophora luteo-olivacea</i> , <i>Cylindrocarpon</i>)	Избыток макро- и микроэлементов
	Низкие температуры почвы

приспособленность к почвам с низким pH; приспособленность к влажным или плохо дренированным почвам и приспособленность к засухе (2001).

L. Peter Christensen в коллективной монографии “Wine Grape Varieties in California” в 2003 г. опубликовал следующий порядок подбора подвоев: устойчивость к существующим и потенциальным почвенным вредителям, адаптация к текстуре и мощности почвы, совместимость с химическим составом почвы (pH, засоление, содержание извести), адаптация к ожидаемой доступности почвенной влаги, дренажу и практике орошения, соответствие дизайну виноградника и совместимость с потенциальным сортом (привоем), его ростом и плодоношением (2003).

При общей схожести рассматриваемых подходов, которая заключается в приоритетном анализе биотических стрессовых факторов с последующим переходом к абиотическим, порядок оценки, изложенный в коллективной монографии “Wine Grape Varieties in California”, охватывает не только стрессовые факторы, но и иные производственные аспекты, такие как соответствие дизайну виноградника, планируемая практика орошения и совместимость с привоем. Такой подход представляется более комплексным, так как уже на стадии выбора подвоя землепользователь должен обладать видением характеристик конечной продукции.

Французские авторы в коллективной монографии “Guide des Vignobles Rhône Méditerranée” в 2015 г. предложили несколько сокращенный алгоритм из двух групп критериев устойчивости и двух производственных параметров: толерантность к активной форме извести, адаптация к почвенным характеристикам (чувствительность к засухе, гидроморфизм и мощность почвы), совместимость с сортом винограда (подвой не должен подчеркивать недостатки сорта привоя: силу роста, урожайность, чувствительность к недостатку/избытку микроэлементов и т. д.) и направление производства (2015).

Данный вариант в корне отличается от предыдущих, так как предлагает приоритетным образом рассматривать абиотические факторы с последующим учетом производственных аспектов. Настораживает в данном подходе то, что не предусматривается оценка степени устойчивости к биотическим стрессовым факто-

рам: филлоксере, нематодам, заболеваниям вирусной и грибной природы.

Еще более сокращенный порядок, состоящий из двух этапов, предложил Morton L.T., при котором выбор подвоя должен начинаться с агрономических соображений, таких как устойчивость к филлоксере, нематодам, а также морозам и адаптивность к структуре и химическому составу почвы, доступности воды, потенциалу роста ([2007](#)).

Перспективной видится методика, реализуемая компанией Wine Australia в собственном программном обеспечении, суть которой заключается в проведении пользователя через серию опросов с несколькими вариантами ответов, которые требуют лабораторных исследований почв земельного участка и понимания процессов управления виноградной лозой. Программное обеспечение спрашивает: Как бы вы описали климат вашего региона (варианты ответа: прохладный климат, теплый климат и жаркий климат)? Какое количество оросительной воды вы, вероятно, будете использовать (варианты ответа: обильное орошение, ограниченное орошение и отсутствие орошения)? Какой желаемый уровень жизнеспособности лозы (варианты ответа: низкий, умеренный и высокий)? Какое содержание соли в вашей почве (варианты ответа: незасоленная, слабозасоленная, умеренно засоленная и сильно засоленная)? Как дренируется почва на вашем винограднике (варианты ответа: плохо или хорошо)? Какой pH вашей почвы (варианты ответа: сильнокислая, слабокислая, нейтральная, слабощелочная и сильнощелочная)? Нужны ли вам подвои, устойчивые к нематоде корневой системы, для вашего типа почвы (варианты ответа: да или нет)? Затем программное обеспечение использует эту информацию для определения рекомендуемых подвоев ([Grapevine rootstock selector tool, 2021](#)).

При некоторой доле инновационности, присущей подходу Wine Australia, слабым звеном его содержательной части является закладываемая в микросервис унифицированность вклада каждого фактора из фигурирующих в опросе пользователя, которые на различных участках могут представлять сильно отличающуюся степень значимости.

Для рассмотренных выше подходов характерной общностью

является последовательный отбор подвоев по степени устойчивости к биотическим или абиотическим стрессовым факторам, а также по соотношению с иными производственными аспектами, связанными с рассматриваемыми привоями или проектом виноградника в целом.

Исторически, а также особенно в настоящее время, для виноградарства свойственно проникновение в природные зоны, характеризующиеся контрастными почвенно-климатическими и орографическими условиями, в связи с пластичностью винограда как сельскохозяйственной культуры ([Seguin, 1986](#)). Соответственно, в каждом терруаре те или иные стрессовые факторы будут представлять различную степень риска, а подбор подвоев в унифицированной последовательности и со стандартизированными весовыми коэффициентами может привести к отсечению на ранних стадиях перспективного для локальных условий варианта.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования и апробации подхода локальной приоритизации стрессовых факторов продуктивности сортов подвоев был выбран планируемый для закладки виноградников земельный участок, расположенный на пологом склоне к северу от с. Плотинное Бахчисарайского района Республики Крым, в геоморфологическом отношении приуроченный к северному макросклону Крымских гор ([Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий, 2009](#)) (рис. 1).

Географическое положение Крымского полуострова, особенности рельефа и атмосферных процессов обуславливают широкое разнообразие климатических условий на его сравнительно небольшой территории. В целом для Крыма характерны высокая инсоляция, относительно мягкая зима, жаркое лето и дефицит атмосферной влаги практически на всей территории ([Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма, 1982](#)).

Климат Бахчисарайского района характеризуется как горный умеренно континентальный. Среднегодовая минимальная температура +7 °С, среднегодовая максимальная температура +18 °С, сумма активных температур варьирует в пределах 3700–4100 °С. Годовое количество осадков 400–600 мм в год, пик выпа-

дения которых приходится на летнее время. К наиболее значимым для почвенного покрова опасным атмосферным явлениям относятся засухи и суховеи ([Драган, 2004](#); [Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий, 2009](#)).

Для Бахчисарайского района характерно большое разнообразие дочетвертичных отложений разного возраста. На его севере располагаются относительно молодые породы неогена и палеогена – известняки, глины, песчаники, мергели, алевролиты, юго-западнее находятся более древние отложения мелового периода, а еще ближе к Внешней гряде находятся самые древние породы района – юрские аргиллиты, алевролиты и триасовые песчано-глинистые флиши. Четвертичные отложения района в основном представлены элювием и элюво-делювием, редко делюво-пролювием в понижениях речных долин и аллювием по долинам и руслам рек ([Атлас: Автономная Республика Крым, 2003](#)).

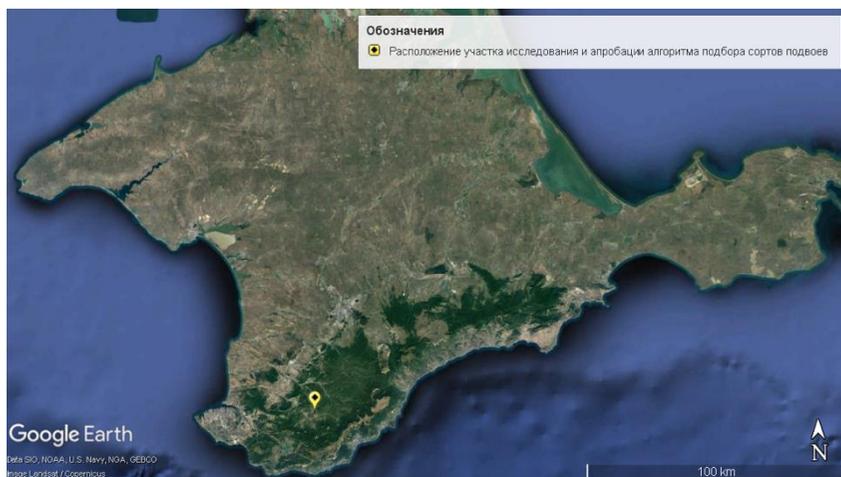


Рис. 1. Расположение участка исследования и апробации алгоритма подбора сортов подвоев.

Fig. 1. Location of the research and testing site of the algorithm for selection of rootstock varieties.

В почвенном покрове предгорья представлены почти все зо-

нальные почвы Крыма (черноземы, коричневые почвы и буроземы). Также здесь широко представлены такие азональные почвы, как дерновые карбонатные ([Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий, 2009](#)).

Всего на ключевом участке был заложено 3 репрезентативных почвенных разреза.

Для полевой и аналитической диагностики почв применялись методы исследования, соответствующие абиотическим стрессовым факторам продуктивности подвоев, представленным в таблице 1: валовое содержание карбонатов определялось гравиметрическим методом ([Растворова и др., 1995](#)); активная известь – методом Дриуно-Гале ([Drouineau, 1942](#)); оксалаторастворимое железо – методом пламенной фотометрии ([Воробьева, 1988](#)); плотность сложения – буровым методом ([Растворова и др., 1995](#)); плотный остаток – гравиметрически ([Растворова и др., 1995](#)); гранулометрический состав – пипеточным методом ([ГОСТ 12536-2014](#)); гигроскопическая влажность – термостатно-массовым методом ([Растворова и др., 1995](#)); каменистость – ситовым методом ([ГОСТ 12536-2014](#)); величина водородного показателя (рН) – потенциметрически в водной суспензии, которая была приготовлена в отношении почва: вода 1 : 2.5 ([Растворова и др., 1995](#)); содержание подвижного фосфора и обменного калия – методом Б.П. Мачигина ([Крейер и др., 2005](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Локальные стрессовые факторы

Почвенный покров ключевого участка представлен агрообразцами типичными и агроземами светлыми типичными, в соответствии с Классификацией почв России ([2004](#)) (рис. 2).

По результатам полевого почвенного обследования и уточняющей аналитической диагностики (табл. 2) нами были определены ключевые стрессовые факторы, к которым должны быть устойчивы перспективные подвои.

Агрообразец типичный (разрез П1) характеризуется широким диапазоном валового содержания карбонатов с минимальным значением 4.7% в горизонте РВса, соответствующим низкому

уровню, и максимальным значением 36.2% в горизонте Cca2, что является уже высоким уровнем.

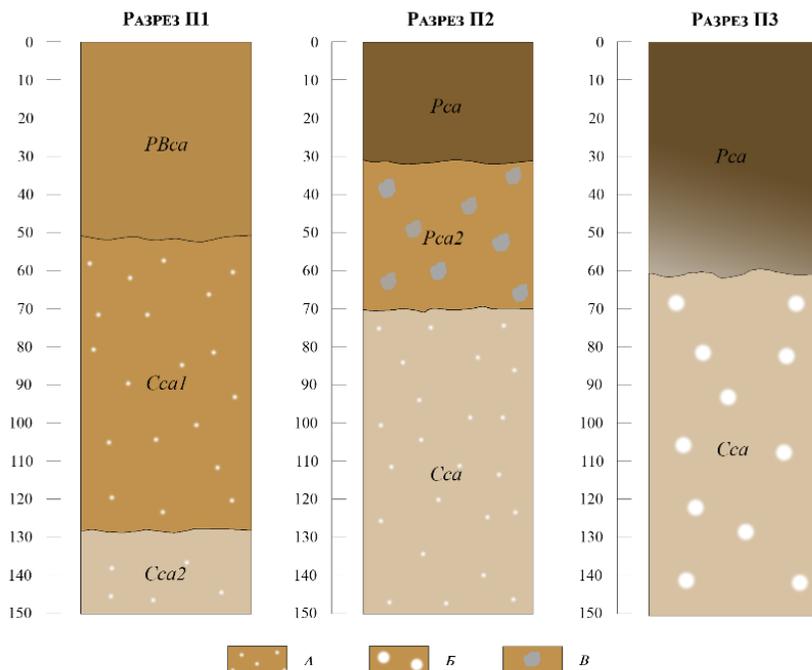


Рис. 2. Схематическое изображение почвенных профилей. Разрез П1 – Агрообразец типичный, Разрезы П2, П3 – Агроземы светлые типичные; **А** – белесые мелкие пятна остаточных карбонатов, **Б** – карбонатные новообразования, **В** – обломки известняка.

Fig. 2. Schematic representation of soil profiles. Soil profile П1 – Calcaric Cambisols (aric), Soil profiles П2, П3 – Calcic Chernozems (aric) light typical; **A** – whitish small spots of residual, **B** – carbonate neoplasms, **B** – limestone fragments.

Таблица 2. Химические свойства почв исследуемого участка
Table 2. Chemical properties of soils of the studied sites

Наименование почвы	№ разреза	Горизонт	CaCO ₃ , %	Активная известь, %	*IPC	Плотный остаток, %	рН Н ₂ O	Фракция <0.01 мм, %	** <i>dv</i> , кг/м ³	P ₂ O ₅	K ₂ O
										мг/кг	
Агрообразем типичный	П1	PВса	4.7	0	0	0.072	8.15	23	1.35	6.2	171
		Сса1	4.9	1.3	3	0.074	8.43	27	1.29	4.7	173
		Сса2	36.2	2.5	6	0.088	8.49	57	1.30	1.4	342
Агрозем светлый типичный	П2	Pса	13.5	3.9	1	0.064	8.17	53	1.27	1.2	353
		Pса2	30.7	11.9	5	0.037	8.46	54	1.29	0.3	337
		Сса	42.9	12.9	28	0.041	8.50	57	1.31	0.3	223
	П3	Pса	12.7	3.3	4	0.071	8.28	51	1.33	3.5	305
		Сса	45.4	13.2	33	0.083	8.54	55	1.35	1.7	363

Примечание. *Полужирным курсивом* отмечены максимальные значения показателей в почвенных разрезах, учитываемые при количественном сопоставлении с лимитирующими значениями для рассматриваемых сортов подвоев; * IPC – индекс продуктивности хлороза; ***dv* – плотность сложения почвы.

Note. *Bold italics* indicate maximum values of indicators in soil profiles, taken into account in quantitative comparison with limiting values for the considered varieties of rootstocks; *IPC – index of chlorosis productivity; ***dv* – soil density.

При этом содержание активной извести и показатели ИРС (индекса продуктивности хлороза) минимальны, не превышают значений 2.5% и 6 соответственно. В гранулометрическом составе наблюдается заметное утяжеление вниз по профилю. Горизонты РВса и Сса1 классифицируются как легкосуглинистые с диапазоном содержания физической глины от 23% до 27%, которое в горизонте Сса2 возрастает до уровня 57%, что относит его к средним глинам. Все горизонты агрообразема типичного характеризуются очень низким содержанием подвижного фосфора с максимальным значением P_2O_5 6.2 мг/кг в горизонте РВса. Содержание обменного калия в горизонтах РВса и Сса1 низкое, значения K_2O составляют 171 и 173 мг/кг соответственно, которое резко возрастает до повышенного уровня в горизонте Сса2 – 342 мг/кг. Реакция среды по всему профилю агрообразема типичного щелочная, с диапазоном значений рН водной вытяжки от 8.15 до 8.49. Плотность сложения не превышала лимитирующего для роста и развития корневой системы винограда значения – 1.4 кг/м^3 (Унгуриян, 1979), ее максимальный уровень был установлен в горизонте РВса и составлял 1.35 кг/м^3 . Результаты определения плотного остатка водной вытяжки варьруют от 0.072 до 0.088%.

Агроземы светлые типичные (разрезы П2, П3) характеризуются значительно более высоким уровнем валового содержания карбонатов, чем агрообразем типичный, возрастающим вниз по профилю в обоих почвенных разрезах, достигая максимального значения в горизонтах Сса разреза П2 – 42.9%, разреза П3 – 45.4%. Помимо высокого уровня валового содержания карбонатов, в агроземах светлых типичных установлены высокие значения активной извести. В разрезе П2 ее диапазон составляет 3.9–12.9% с максимумом в горизонте Сса, в разрезе П3 – 3.3–13.2% с максимумом также в горизонте Сса. Уровням содержания активной извести коррелируют значения ИРС, их максимумы составляют 28 и 33 в разрезах П2 и П3 соответственно. В гранулометрическом составе изученных разрезов отсутствует выраженная дифференциация по профилю, все горизонты относятся к средним глинам. Как и в агрообраземе типичном, все исследованные горизонты агроземов светлых типичных характеризуются низким уровнем содержания подвижных соединений фосфора, щелочной

реакцией среды, плотностью сложения, не превышающей критического уровня для развития корневой системы винограда и отсутствием выраженного засоления. Содержание обменного калия во всех горизонтах повышенное, за исключением горизонта Сса разреза ПЗ, в котором оно соответствует среднему уровню.

Таким образом, обобщая результаты полевого исследования земельного участка и лабораторной аналитической диагностики почвенных проб, были выделены следующие локальные стрессовые факторы, которые необходимо учитывать при выборе подвоев на ключевом участке: карбонатное состояние, риск заражения филлоксерой, высокое содержание тонкодисперсной фракции гранулометрического состава, недостаток фосфора, риск дефицита влаги во всех ареалах, обусловленный высокими температурами и периодическими засухами в летнее время года, риск локального переувлажнения в ареале агрообразца типичного, в связи с его локализацией в микропонижении, водоудерживающей почвообразующей породой и ливневым характером осадков.

Приоритизация стрессовых факторов и построение алгоритма

В качестве метода выбора подвоев мы остановились на подходе последовательного сокращения выборки сортов по качественным и количественным показателям устойчивости. При сопоставлении параметров устойчивости и адаптации подвоев с данными аналитической диагностики почвенных разрезов, учитывались максимальные значения и критические уровни показателей по всему профилю из-за большой глубины проникновения корневой системы винограда, которая может достигать полутора и более метров ([Физиология винограда ..., 1981](#)). Для каждого почвенного ареала рассматривалось 20 сортов подвоев, наиболее часто используемых в коммерческом отношении: Kober 5BB, Selection Oppenheim 4, 420 A Millardet et de Grasset, 161.49 Couderc, 1103 Paulsen, 110 Richter, 140 Ruggeri, 779 Paulsen, Rupestris Du Lot, 101-14 Millardet et de Grasset, 3309 Couderc, 196-17 Castel, Gravesac, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, Börner, Richter 99, Riparia Gloire, 44–53 Malègue, 333 Ecole de Montpellier. Сценарий сокращения выборки представлен на рисунке 3.

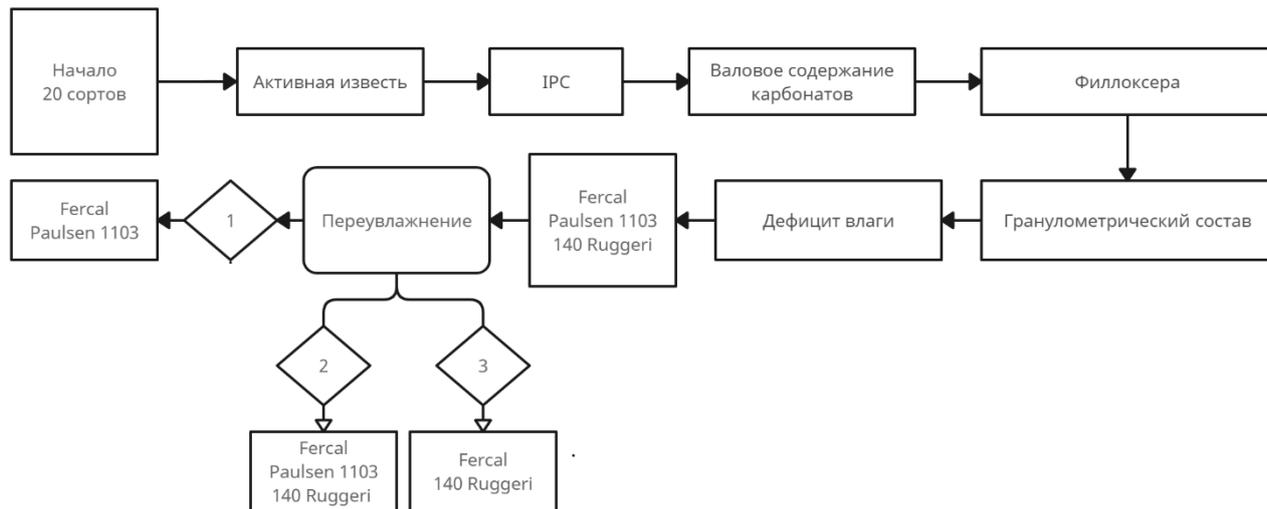


Рис. 3. Сценарий сокращения выборки подвоев.
Fig. 3. Scenario for reducing the selection of rootstocks.

Лимитирующим фактором терруара на исследуемом земельном участке было определено карбонатное состояние, которое характеризуется тремя показателями: валовым содержанием CaCO_3 , содержанием активной извести и значением ИРС (индексом продуктивности хлороза).

В ареале агрообразема типичного данный лимитирующий фактор проявляется в высоком содержании валовой формы CaCO_3 . Ареалы агрозема светлого типичного, в дополнение к высокому уровню валовой формы CaCO_3 , характеризуются высокими значениями активной извести и ИРС.

Сокращение выборки подвоев посредством соотнесения значений исследованных показателей в почвенных пробах и параметров устойчивости рассматриваемых сортов к установленному карбонатному состоянию осуществлялось в три последовательные итерации.

Первично было выполнено количественное сопоставление с результатами определения активной извести и ИРС с последующим качественным сравнением степени устойчивости сортов подвоев с уровнем содержания валовых карбонатов. Разграничение на количественное и качественное сравнение обусловлено тем, что для показателей активной извести и ИРС в рассматриваемых сортах подвоев известны конкретные предельно допустимые значения, в случае же валового содержания карбонатов – для рассматриваемых подвоев известны их уровни устойчивости.

Выбор активной извести в качестве первой итерации обусловлен тем, что ее высокие значения на данном участке могут потенциально стать причиной заболевания насаждений известковым хлорозом, при котором нарушается водно-воздушный, окислительно-восстановительный режимы и в целом условия минерального питания растений, что сильно ограничивает продуктивность будущих виноградных насаждений ([Перова и др., 2013](#)).

После первой итерации сокращения выборки количество сортов подвоев по устойчивости к активной форме извести следующее: ареал агрообразема типичного – 20 сортов подвоев, т. к. выборка не сократилась, ареалы агрозема светлого типичного № 1 и № 2 – 14 сортов подвоев (Kober 5BB, Selection Oppenheim 4, 420 A Millardet et de Grasset, 161.49 Couderc, 1103 Paulsen, 110 Richter,

140 Ruggeri, 779 Paulsen, Rupestris Du Lot, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, Börner, Richter 99, 333 Ecole de Montpellier).

Уточняет степень риска хлороза в аспекте доступности растворимых форм железа показатель IPC, который рассчитывается по следующей формуле:

$$IPC = \frac{CaCO_3}{(Fe)^2} \times 10^4,$$

где $CaCO_3$ – содержание активной извести, %, Fe – содержание оксалаторастворимого железа, мг/кг.

Показатель IPC характеризует степень доступности железа для корневой системы винограда – необходимого микроэлемента для построения белковых комплексов, участвующих в биохимических процессах, предшествующих образованию хлорофилла ([Кабата-Пендиас, 1989](#)).

Как следует из вышеприведенной формулы, показатель IPC является зависимым от содержания активной извести и индексирует риск заболевания виноградных насаждений хлорозом, вызванным недоступностью железа, а не комплексным балансом минерального питания винограда, риск нарушения которого характеризует уровень содержания активной извести ([Перова и др., 2013](#)).

Уточняющий характер показателя IPC и его зависимость от содержания активной извести мотивировали нас на сопоставление с ним во второй, а не в первой итерации.

Количество подвоев для почвенных ареалов после сокращения выборки по значению IPC следующее: ареал агрообразема типичного – 14 сортов подвоев (Kober 5BB, Selection Oppenheim 4, 420 A Millardet et de Grasset, 161.49 Couderc, 1103 Paulsen, 110 Richter, 140 Ruggeri, 779 Paulsen, Rupestris Du Lot, 101-14 Millardet et de Grasset, 3309 Couderc, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, 333 Ecole de Montpellier); ареал агрозема светлого типичного № 1 – 10 сортов (Kober 5BB, Selection Oppenheim 4, 420 A Millardet et de Grasset, 161.49 Couderc, 1103 Paulsen, 110 Richter, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, 333 Ecole de Montpellier), ареал агрозема светлого типичного № 2 – 7 сортов подвоев (Kober 5BB, 420 A Millardet et de Grasset, 161.49 Couderc, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, 333 Ecole de Montpellier).

Заключительной итерацией первого этапа, на котором нами было рассмотрено карбонатное состояние, являлось качественное сопоставление параметров устойчивости подвоев с уровнем валового содержания CaCO_3 , которое характеризуется как высокое во всех исследованных почвенных ареалах.

Количество подвоев для почвенных ареалов после третьей итерации сокращения выборки следующее: ареалы агрообразема типичного и агрозема светлого типичного № 1 – 6 сортов подвоев (Kober 5BB, 1103 Paulsen, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, 333 Ecole de Montpellier), ареал агрозема светлого типичного № 2 – 5 сортов подвоев (Kober 5BB, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal, 333 Ecole de Montpellier).

На следующем этапе осуществлялся отбор подвоев исходя из их устойчивости к филлоксере. Так как в настоящее время данный вредитель является широко распространенным в Крыму и представляет большую угрозу для виноградных насаждений ([Алейникова, 2016](#)), на четвертой итерации были отобраны подвои с высоким уровнем устойчивости.

Количество подвоев для почвенных ареалов после сокращения выборки по устойчивости к филлоксере следующее: ареалы агрообразема типичного и агрозема светлого типичного № 1 – 5 сортов подвоев (Kober 5BB, 1103 Paulsen, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal), ареал агрозема светлого типичного № 2 – 4 сорта подвоев (Kober 5BB, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset, Fercal).

Далее оценивалась устойчивость подвоев к почвам с преобладанием тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе. Рассмотрение данного фактора пятой итерацией обосновано тем, что гранулометрический состав можно рассматривать как интегральный показатель, прямым или косвенным образом влияющий на многие почвенные характеристики, определяющие продуктивность насаждений ([Шеин, 2005](#)). Также стоит отметить, что степень адаптации сортов подвоев к почвам того или иного гранулометрического состава можно отнести к одним из наиболее часто встречаемых параметров в индивидуальных характеристиках подвоев в контексте исследования ([Жуков и др., 1989](#); [Christensen et al., 2003](#); [Guide des Vignobles Rhône Méditerranée, 2015](#); [Rahemi et](#)

[al., 2022](#)).

Количество подвоев для почвенных ареалов после сокращения выборки по степени адаптации к почвам с преобладанием тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе следующее: ареалы агрообразема типичного и агрозема светлого типичного № 1 – 3 сорта подвоев (1103 Paulsen, 140 Ruggeri, Fercal), ареал агрозема светлого типичного № 2 – 2 сорта подвоев (140 Ruggeri, Fercal).

Для агроклиматической зоны, в которой располагается исследуемый земельный участок, характерны такие опасные атмосферные явления, как засухи и суховеи ([Драган, 2004](#)). Поэтому после сокращения выборки подвоев по степени адаптации к установленному гранулометрическому составу была осуществлена оценка сортов подвоев в отношении степени их устойчивости к аридным климатическим условиям, по результатам которой выборка не сократилась, так как все сорта подвоев в той или иной степени подходят для климатических условий, где располагается земельный участок ([Guide des Vignobles Rhône Méditerranée, 2015](#); [Драган, 2004](#)).

На заключительном этапе были отобраны подвои, устойчивые к кратковременному переувлажнению. Поскольку риск данного явления локализован только для почвенной разности № 1, которая находится в микропонижении, выборка подвоев сократилась только для данного ареала.

Количество подвоев для почвенных ареалов после заключительной итерации сокращения выборки следующее: ареал агрообразема типичного – 2 сорта подвоев (1103 Paulsen, Fercal), ареал агрозема светлого типичного № 1 – 3 сорта подвоев (1103 Paulsen, 140 Ruggeri, Fercal), ареал агрозема светлого типичного № 2 – 2 сорта подвоев (140 Ruggeri, Fercal).

Среди стрессовых факторов, выявленных по результатам лабораторных исследований, фигурирует также недостаток фосфора. Принимая во внимание высокую значимость данного макроэлемента в биохимических процессах винограда ([Физиология винограда и основы его возделывания, 1981](#)), в отличие от других стрессовых факторов, он является корректируемым посредством внесения минеральных удобрений, в связи с этим он не присут-

ствовал в вышеприведенном алгоритме сокращения выборки рассматриваемых сортов подвоев, но будет учтен на следующем этапе работы.

Таким образом, на исследуемом земельном участке нами были выявлены и приоритизированы локальные стрессовые факторы терруара, оказывающие влияние на продуктивность подвоев с привязкой к установленным почвенным ареалам. Был построен сценарий последовательного сокращения выборки сортов подвоев по следующим показателям: устойчивость к активной извести, значению ICP, валовому содержанию карбонатов, филлоксере, высокому содержанию тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе, засухам, кратковременному переувлажнению. Наибольшее сокращение рассматриваемой выборки произошло на первом этапе – оценке устойчивости сортов подвоев к карбонатному состоянию, которое является лимитирующим фактором для локальных условий.

Для каждого ареала установлено не менее двух подходящих сортов подвоев из группы: 1103 Paulsen, 140 Ruggeri, Fercal. Итоговая вариативность обуславливается не только непосредственным результатом вышеприведенного сценария, но и необходимостью в определенном пространстве для маневра при закладке виноградных насаждений, так как в момент принятия проектных решений, особенно в условиях текущей экономической турбулентности, необходимо учитывать ценовой фактор, наличие саженцев на рынке сбыта в данный момент и логистическую доступность, а также сопутствующие риски при сотрудничестве с зарубежными поставщиками.

Тем не менее даже при столь ограниченном количестве вариантов каждый подвой обладает собственным спектром преимуществ и недостатков относительно других подвоев в пределах сокращенной выборки, которые необходимо учитывать в принятии проектных решений. В связи с этим для объективизации решения о закупке саженцев при сопоставлении с другими указанными ранее экономическими и логистическими параметрами нами была осуществлена относительная балльная оценка итоговых вариантов в сокращенной выборке.

Относительная балльная оценка вариантов подвоев

С целью определения наиболее подходящих вариантов подвоев была осуществлена относительная балльная оценка по степени устойчивости к биотическим и абиотическим стрессовым факторам терруара.

Сравнение осуществлялось по следующим параметрам: устойчивость к активной извести, значению ИСР, валовому содержанию карбонатов, филлоксере, высокому содержанию тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе, засухам, кратковременному переувлажнению, недостатку фосфора, бактериальному раку.

Таким образом, на этапе относительной балльной оценки вводятся дополнительные показатели, ранее не учтенные в сценарии сокращения выборки сортов подвоев: устойчивость к недостатку фосфора и бактериальному раку.

Бактериальный рак (Crown Gall) распространен во всем мире и является одной из наиболее вредоносных болезней винограда. Его биотип *Agrobacterium tumefaciens*, который в настоящее время называется *Rhizobium vitis* ([Ophel, Kerr, 1990](#); [Lehoczky, 1978](#); [Pu, Goodman, 1993](#)), поражает в основном виноград, хотя при этом потери урожая от данного заболевания в мире составляют 75–80% ([Конуп, Власов, 2016](#)). На текущий момент эффективного средства по лечению винограда от этого заболевания нет, единственным приемом является раскорчевка насаждений. Его опасность заключается также в том, что бактерия заражает почву, что в дальнейшем может вызвать заболевание и у вновь посаженных растений ([Burr, Katz, 1983](#); [Burr et al., 1987](#); [Manulis et al., 2002](#)).

Так как вклад каждого из показателей в продуктивность насаждений не одинаков, то в балльной оценке были применены весовые коэффициенты для каждого параметра, определенные методом парного сравнения критериев (табл. 3).

Показатель важности параметра рассчитывался как сумма баллов при парном сравнении с другими критериями. Весовой коэффициент параметра рассчитывался как отношение индивидуального показателя важности к суммарному показателю важности всех критериев. Первичные весовые коэффициенты были преобразованы с учетом ранжирования по 10-балльной шкале.

Таблица 3. Матрица парного сравнения критериев
Table 3. Matrix for paired criterion comparison

Критерий	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	К9	Σ	Вес
К1	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	10.20	1.26
К2	0.8	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	9.80	1.21
К3	0.8	0.8	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	9.40	1.16
К4	0.8	0.8	0.8	1	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	9.00	1.11
К5	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1.2	1.2	1.2	0.8	8.60	1.06
К6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1.2	1.2	0.8	8.20	1.01
К7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1.2	0.8	7.80	0.96
К8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	0.8	7.40	0.91
К9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1	10.60	1.31
Σ										81	10

Примечание. Критерии: К1 – устойчивость к активной извести, К2 – устойчивость к значению ICP, К3 – устойчивость к валовому содержанию карбонатов, К4 – устойчивость к филлоксере, К5 – устойчивость к высокому содержанию тонкодисперсных фракций в гранулометрическом составе, К6 – устойчивость к засухам, К7 – устойчивость к кратковременному переувлажнению, К8 – устойчивость к недостатку фосфора, К9 – устойчивость к бактериальному раку.

Note. Criteria: K1 – tolerance to active lime, K2 – tolerance to ICP value, K3 – tolerance to gross carbonate content, K4 – tolerance to phylloxera, K5 – tolerance to high content of fine fractions in granulometric composition, K6 – tolerance to drought, K7 – tolerance to short-term overwatering, K8 – tolerance to phosphorus deficiency, K9 – tolerance to bacterial canker.

При парном сравнении критериев, ранее рассмотренных в рамках сценария сокращения выборки сортов, была сохранена приоритизация, используемая при построении алгоритма. Введенный в сравнительную балльную оценку показатель устойчивости к бактериальному раку при сравнении со всеми другими критериями расценивался как более значимый, так как он не может быть откорректирован в ходе производственного процесса и приводит к раскорчевке насаждений. Диаметральным противоположным образом оценивался критерий устойчивости к недостатку фосфора, так как он может быть откорректирован посредством внесения минеральных удобрений.

В таблице 4 приведены результаты относительной балльной оценки. Итоговый балл подвоя представляет собой средневзвешенное значение по отношению к 10 – максимально возможному баллу. Количественные и качественные параметры устойчивости были ранжированы по 10-балльной шкале. При преобразовании количественных параметров максимально возможный балл (10) был присвоен значению 40%, которое характеризует устойчивость к активной извести сортов подвоев Fercal, 140 Ruggeri, 41 B Millardet et de Grasset и 333 Ecole de Montpellier, для параметра устойчивости к ИСР максимально возможный балл был присвоен значению 120 подвоя Fercal ([Guide des Vignobles Rhône Méditerranée, 2015](#)).

По результатам сравнительного анализа итоговым вариантам были присвоены следующие баллы: 1103 Paulsen – 6.0/10, 140 Ruggeri – 7.1/10, Fercal – 7.5/10.

Таким образом, наиболее приоритетным подвоем для закладки насаждений на исследуемом земельном участке является сорт Fercal. Он подходит для всех ареалов, включая ареал агрообразема типичного, находящегося в микропонижении, где может застаиваться вода при ливневом характере осадков, так как он является устойчивым непосредственно к кратковременному переувлажнению и к грибным заболеваниям, которые им интенсифицируются.

Таблица 4. Относительная балльная оценка вариантов сортов подвоев
Table 4. Relative scoring of rootstock variety variants

Параметры устойчивости	1103 Paulsen		140 Ruggeri		Fercal		Max	Вес
	Балл	Балл×Вес	Балл	Балл×Вес	Балл	Балл×Вес		
Активная известь	4.3	5.4	10.0	12.6	10.0	12.6	10.0	1.3
ICP	2.5	3.0	7.5	9.1	10.0	12.1	10.0	1.2
Валовое содержание карбонатов	8.0	9.3	10.0	11.6	10.0	11.6	10.0	1.2
Филлоксера	10.0	11.1	10.0	11.1	10.0	11.1	10.0	1.1
Преобладание тонкодисперсных фракций в ГС	6.0	6.4	7.0	7.4	6.0	6.4	10.0	1.1
Недостаток влаги	9.0	9.1	10.0	10.1	7.0	7.1	10.0	1.0
Избыток влаги	6.0	5.8	2.0	1.9	7.0	6.7	10.0	1.0
Недостаток Р	7.5	6.9	7.5	6.9	5.0	4.6	10.0	0.9
Бактериальный рак	2.5	3.3	0.0	0.0	2.5	3.3	10.0	1.3
Относительная балльная	6.0/10		7.1/10		7.5/10		-	-

На основании генетических анализов, проведенных в Монпелье, этот сорт получен 1959 г. во Франции в результате скрещивания сорта *Berlandieri Colombarde* № 1 B (от скрещивания между *Vitis berlandieri* и *Vitis vinifera* cv. *Ugni blanc*) и 31 Richter (от скрещивания между *Vitis berlandieri* cv. *Rességuier* № 2 и *Vitis longii* cv. *Novo-mexicana*). Главной особенностью сорта Fercal является его очень высокая устойчивость к хлорозу и адаптация к известковым почвам, кратковременному переувлажнению, засухе, филлоксере и другим локальным стрессовым факторам, которые могут оказывать непосредственное влияние на продуктивность подвойно-привойных комбинаций на исследуемом земельном участке ([Catalogue of grapevines cultivated in France, 2007](#)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология привитой культуры глубоко интегрирована в производственную практику виноградарства, первоначально являясь мерой для противодействия филлоксере, но со временем применение такого инструмента, как подвойно-привойная комбинация стало распространяться и на другие стрессовые факторы, связанные с физико-химическими и биологическими характеристиками почвенного покрова земельных участков, планируемых для закладки виноградных насаждений.

Применение алгоритма, учитывающего степень важности стрессовых факторов терруара, и относительная оценка итоговых вариантов позволили подобрать сорта подвоев, наиболее адаптированные к локальным условиям проектируемого виноградника: Fercal, 140 Ruggeri, 1103 Paulsen, – и в будущем сопоставить их с рыночными и логистическими параметрами.

Представленный в данной статье подход к локально адаптивному подбору сортов подвоев был внедрен в деятельность малого инновационного предприятия ООО “Терруар Концепт СПбГУ” и использовался для реализации винодельческих проектов в Республике Крым и Краснодарском крае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов А.А., Овчинников В.П.* Тяжелые металлы в почвах виноградников департамента Атлантическая Луара (Французская

- Республика) и автономного территориального образования Гагаузия (Республика Молдова) // География: развитие науки и образования. LXXI Герценовские Чтения. Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2108. С. 14–19.
2. *Алейникова Н.В., Борисенко М.Н., Галкина Е.С., Радионовская Я.Э.* Современные тенденции развития вредных организмов в ампелоценозах Крыма // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2016. № 42(06). С. 119–133.
3. Атлас: Автономная Республика Крым, Киев–Симферополь, 2003. 80 с.
4. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
5. *Гагерова А.В., Гармашова Е.П.* Обзор рынка виноградарства и виноделия Российской Федерации на фоне общемировых тенденций. // Экономика. Информатика. 2020. № 47(3). С. 501–511. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-3-501-511.
6. ГОСТ 12536-2014. Межгосударственный стандарт. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: изд-во Стандартиформ, дата введения: 01.07.2015.
7. *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма. Научная монография. Симферополь: ДОЛЯ, 2004. 208 с.
8. Итоги первого Российского винодельческого форума // Новости Фонда Росконгресс. URL: <https://roscongress.org/news/podvedeny-itogi-pervogo-rossijskogo-vinodelcheskogo-foruma/>.
9. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. *К.Т. Логвинова и М.Б. Барабаш.* Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 318 с.
12. *Конуп Л.А., Власов В.В.* Бактериальный рак винограда и борьба с ним (на примере Юга Украины) // Наука Юга России. Вестник Южного Научного Центра. 2016. Т. 12. № 3. С. 44–50.
13. *Крейер К.Г., Банкина Т.А., Орлова Н.Е., Юрьева Г.М.* // Практикум по агрохимическому анализу почв. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2005. 88 с.
14. *Перова Л.И., Лукьянов А.А., Денисова Т.А.* Известковый хлороз винограда, его предупреждение и лечение // Инновационные технологии и тенденции в развитии и формировании современного виноградарства и

- виноделия. Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия. Анапа, 2013. С. 170–176.
15. Привитая культура винограда / *А.И. Жуков, Н.Н. Перов, О.М. Ильяшенко*. М.: Росагропромиздат, 1989. 160 с.
16. *Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н.* Химический анализ почв. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1995. 264 с.
17. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / Науч. ред. *Е.А. Позаченюк*. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 611 с.
18. *Унгурян В.Г.* Почва и виноград. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1979. 211 с.
19. Физиология винограда и основы его возделывания. Том 1 / Под ред. *Стоева К.Д.* София: издательство Болгарской Академии наук, 1981. 332 с.
20. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
21. *Burr T.J., Katz B.H.* Isolation of *Agrobacterium tumefaciens* biovar 3 from grapevine galls and sap, and from vineyard soil // *Phytopathology*. 1983. Vol. 73. P. 163–165.
22. *Burr T.J., Katz B.H., Bishop A.L.* Population of *Agrobacterium* in vineyard and nonvineyard soils and grape roots in vineyards and nurseries // *Plant Dis*. 1987. Vol. 71. P. 617–620.
23. *Christiansen L.P., Wolpert J.A., Bettiga, Dokoozlian N., Walker M.A.* Wine Grape Varieties in California. California: UC Agriculture and Natural Resources, 2003. 188 p.
24. *Drouineau G.* Dosage rapide du calcaire actif des sols // *Ann. Agron*. 1942. P. 441–450.
25. Guide des Vignobles Rhône Méditerranée. URL: <https://fliplhtml5.com/bdgl/yjfp/basic>.
26. *Lehoczky J.* Root system of the grapevine as a reservoir of *Agrobacterium tumefaciens* cells // *Proc. 4th Int. Conf. Plant Pathol. Bacteriol. Angers*, 1978. P. 239–243.
27. *Manulis S., Chalupowicz L., Dror O., Kleitman F.* Molecular diagnostic procedures for production of pathogen – free propagation material // *Pest Manag. Science*. 2002. Vol. 58. P. 1126–1131.
28. *Morton L.T.* Rootstock review, how to set priorities when choosing rootstocks // *Wines and Vines*, 2007.
29. *Ophel K., Kerr A.* *Agrobacterium vitis*, new species for strains of *Agrobacterium* biovar 3 from grapevines // *Int. J. Syst. Bacteriol*. 1990. Vol. 40. P. 236–241.
30. Plantgrape. Catalogue of grapevines cultivated in France. 2007. URL: <https://plantgrape.plantnet-project.org/en/>.

31. *Pu X.A., Goodman R.N.* Tumor formation by *Agrobacterium tumefaciens* is suppressed by *Agrobacterium radiobacter* HLB-2 on grape plants // *Am. J. Enol. Vitic.* 1993. Vol. 44. P. 249–254.
32. *Rahemi A., Dodson Peterson J.C., Lund K.T.* Choosing Grape Rootstock // *Grape Rootstocks and Related Species.* Springer, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99407-5_9
33. Resolution OIV. Viti 333. Definition of vitivinicultural “Terroir”. The General Director of the International Organisation of Vine and Wine. General assembly Tbilisi (Georgia), 2010. P. 1.
34. *Reynolds A.G., Wardle D.A.* Rootstocks impact vine performance and fruit composition of grapes in British Columbia // *Hort Technology.* 1993. Vol. 11. P. 419–427.
35. *Seguin G.* Terroirs and pedology of vine growing // *Experientia.* 1986. Vol. 42. P. 861–873.
36. Wine Australia // Grapevine rootstock selector tool. URL: <http://www.grapevinerootstock.com/>.

REFERENCES

1. Aver'yanov A.A., Ovchinnikov V.P., *Tyazhelye metally v pochvakh vinogradnikov departamenta Atlanticheskaya Luara (Frantsuzskaya Respublika) i avtonomnogo territorial'nogo obrazovaniya Gagauziya (Respublika Moldova).* (Heavy metals in the soils of vineyards in the Atlantic Loire Department (French Republic) and the autonomous territorial unit of Gagauzia (Republic of Moldova)), In: *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya. LXXI Gertsenovskie Chteniya.* (Geography: development of science and education. LXXI Herzen Readings.), Saint-Petersburg: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University, 2018, pp. 14–19.
2. Aleinikova N.V., Borisenko M.N., Galkina E.S., Radionovskaya Ya.E., *Sovremennye tendentsii razvitiya vrednykh organizmov v ampelotsenozakh Kryma* (Current trends in the development of pests in the Crimean ampelocenoses), *Plodovodstvo i vinogra-darstvo Yuga Rossii*, 2016, No. 42(06), pp. 119–133.
3. *Atlas: Avtonomnaya Respublika Krym* (Atlas: Autonomous Republic of Crimea), Kiev-Simferopol', 2003, 80 p.
4. Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochv* (Soil chemical analysis), Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 272 p.
5. Gagerova A.V., Garmashova E.P., *Obzor rynka vinogradarstva i vinodeliya Rossiiskoi Federatsii na fone obshchemirovykh tendentsii* (Overview of viticulture and winemaking market of the Russian Federation

- against the background of global trends), *Ekonomika. Informatika*, 2020, Vol. 47(3), pp. 501–511, DOI: 10.18413/2687- 0932- 2020- 47- 3- 501- 511.
6. GOST 12536-2014 (Interstate Standard), Moscow: izd-vo Standartinform, 2015.
7. Dragan N.A., *Pochvennye resursy Kryma* (Soil resources of the Crimea), Simferopol': DOLYa, 2004, 208 p.
8. Itogi pervogo Rossiiskogo vinodel'cheskogo foruma (The results of the first Russian Wine Forum), *Novosti Fonda Roskongress*, URL: <https://roscongress.org/news/podvedeny-itogi-pervogo-rossijskogo-vinodelcheskogo-foruma/>.
9. Kabata-Pendias A., Pendias X., *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* (Trace elements in soils and plants), Mocsow: Mir, 1989, 439 p.
10. *Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Ojkumena, 2004, 342 p.
11. Logvinova K.T., Barabash M.B., *Klimat i opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya Kryma* (Climate and dangerous hydrometeorological phenomena in the Crimea), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 318 p.
12. Konup L.A., Vlasov V.V., Bakterial'nyi rak vinograda i bor'ba s nim (na primere Yuga Ukrainy) (Bacterial cancer of grapes and its control (by the example of the South of Ukraine)), *Nauka Yuga Rossii. Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 44–50.
13. Kreier K.G., Bankina T.A., Orlova N.E., Yur'eva G.M., *Praktikum po agrokhimicheskomu analizu pochv* (Practical Guide to Agrochemical Soil Analysis), Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2005, 88 p.
14. Perova L.I., Luk'yanov A.A., Denisova T.A., *Izvestkovyi khloroz vinograda, ego predupre-zhdenie i lechenie* (Lime chlorosis of grapes, its prevention and treatment), In: *Innovatsionnye tekhnologii i tendentsii v razviti i formirovanii sovremennogo vinogradarstva i vinodeliya*, Anapskaya zonal'naya opyt'naya stantsiya vinogradarstva i vinodeliya, Anapa, 2013, pp. 170–176.
15. Zhukov A.I., Perov N.N., Il'yashenko O.M., *Privitaya kul'tura vinograda* (A grafted grape crop), Mocsow: Rosagropromizdat, 1989, 160 p.
16. Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I., Kasatkina G.A., Fedorova N.N., *Khimicheskii analiz pochv* (Soil chemical analysis), Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1995, 264 p.
17. Pozachenyuk E.A., *Sovremennye landshafty Kryma i sopredel'nykh akvatorii* (Modern Landscapes of the Crimea and Adjacent Waters), Simferopol': Biznes-Inform, 2009, 611 p.
18. Unguryan V.G., *Pochva i vinograd* (Soil and grapes), Kishinev: Kartya Moldovenyaskie, 1979, 211 p.

19. Stoeva K.D., *Fiziologiya vinograda i osnovy ego vozdeliyaniya* (Physiology of grapes and basics of their cultivation, Vol. 1, Sofiya: izdatel'stvo Bolgarskoi Akademii nauk, 1981, 332 p.
20. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil Physics Course), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 432 p.
21. Burr T.J., Katz B.H., Isolation of *Agrobacterium tumefaciens* biovar 3 from grapevine galls and sap, and from vineyard soil, *Phytopathology*, 1983, Vol. 73, pp. 163–165.
22. Burr T.J., Katz B.H., Bishop A.L., Population of *Agrobacterium* in vineyard and nonvineyard soils and grape roots in vineyards and nurseries, *Plant Dis.*, 1987, Vol. 71, pp. 617–620.
23. Christiansen L.P., Wolpert J.A., Bettiga, Dokoozlian N., Walker M.A., *Wine Grape Varieties in California*, California: UC Agriculture and Natural Resources, 2003, 188 p.
24. Drouineau G., Dosage rapide du calcaire actif des sols, *Ann. Agron.*, 1942, pp. 441–450.
25. Guide des Vignobles Rhône Méditerranée, URL: <https://flihtml5.com/bdgl/yjfp/basic>.
26. Lehoczyk J., Root system of the grapevine as a reservoir of *Agrobacterium tumefaciens* cells, *Proc. 4th Int. Conf. Plant Pathol. Bacteriol. Angers*, 1978, pp. 239–243.
27. Manulis S., Chalupowicz L., Dror O., Kleitman F., Molecular diagnostic procedures for production of pathogen – free propagation material, *Pest Manag. Science*, 2002, Vol. 58, pp. 1126–1131.
28. Morton L.T., Rootstock review, how to set priorities when choosing rootstocks, In: *Wines and Vines*, 2007.
29. Ophel K., Kerr A., *Agrobacterium vitis*, new species for strains of *Agrobacterium* biovar 3 from grapevines, *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 1990, Vol. 40, pp. 236–241.
30. Plantgrape, Catalogue of grapevines cultivated in France, 2007, URL: <https://plantgrape.plantnet-project.org/en/>.
31. Pu X.A., Goodman R.N., Tumor formation by *Agrobacterium tumefaciens* is suppressed by *Agrobacterium radiobacter* HLB-2 on grape plants, *Am. J. Enol. Vitic.*, 1993, Vol. 44, pp. 249–254.
32. Rahemi A., Dodson Peterson J.C., Lund K.T., *Choosing Grape Rootstock, Grape Rootstocks and Related Species*, Springer, 2022, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99407-5_9.
33. Resolution OIV. Viti 333. Definition of vitivinicultural “Terroir”, The General Director of the International Organisation of Vine and Wine, General assembly Tbilisi (Georgia), 2010, p. 1.

34. Reynolds A.G., Wardle D.A., Rootstocks impact vine performance and fruit composition of grapes in British Columbia, *Hort. Technology*, 1993, Vol. 11, pp. 419–427.
35. Seguin G., Terroirs and pedology of vine growing, *Experientia*, 1986, Vol. 42, pp. 861–873.
36. *Wine Australia, Grapevine rootstock selector tool*, URL: <http://www.grapevinerootstock.com/>.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 116

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

Сдано в набор 25.09.2023 г.
Подписано в печать 25.09.2023 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 11 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