

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 121

Москва
2024

<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 121

**Moscow
2024**

<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 (Stellenbosch 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”, 2024 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

О совершенствовании регулирования утилизации отвалов почв и грунтов

*Иванов А.Л., Столбовой В.С.,
Бакуменко Л.С., Гребенников А.М. 6*

Влияние деградационных процессов на ферментативную активность и содержание форм минерального азота почв сельхозугодий

Сыщиков Д.В., Березовский А.С., Агурова И.В. 28

Пермангант-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов

Прохоров А.А., Борисов Б.А., Ефимов О.Е. 47

NDVI посевов как дистанционный индикатор качества пахотных почв

Хутуев А.М., Занилов А.Х., Тутукова Д.А., Савин И.Ю. . 70

Восстановление структуры и почвозащитная роль прямого посева в черноземах и каштановых почвах Ставропольского края

*Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Белобров В.П.,
Дридигер В.К., Гаджиумаров Р.Г.,
Ярославцева Н.В., Надуткин И.А. 86*

Углерод микробной биомассы альфегумусовых почв северо-запада России

*Медведева М.В., Никитин Д.А., Семенов М.В.,
Ахметова Г.В. 111*

Сообщества беспозвоночных и микроорганизмов в почвах полей фильтрации Львовского сахарного завода (Курская область)

*Рахлеева А.А., Михеев П.В., Замотаев И.В.,
Грачева Р.Г., Конопляникова Ю.В.,
Белоновская Е.А., Карелин Д.В. 152*

Почвенные карты городов для унифицированной цифровой модели почвенного покрова России <i>Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.</i>	200
Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” в течение полувека <i>Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И.</i>	241
Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор) <i>Клюева В.В.</i>	281

CONTENTS

Improving regulation of the use of soils and subsoils dumps in the Russian Federation <i>Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Bakumenko L.S., Grebennikov A.M.</i>	6
The influence of degradation processes on enzymatic activity and the content of forms of mineral nitrogen in agricultural soils <i>Syshchykov D.V., Berezovskiy A.S., Agurova I.V.</i>	28
Permangan-oxidizable carbon as a marker of soil quality in agrolandscapes <i>Prokhorov A.A., Borisov B.A., Efimov O.E.</i>	47
NDVI of crops as a remote indicator of arable soils quality <i>Khutuev A.M., Zanirov A.Kh., Tutukova D.A., Savin I.Yu.</i>	70

Restoration of the structure and soil protection role of no-till in chernozems and chestnuts soils of the Stavropol Territory <i>Yudin S.A., Ermolaev N.R., Belobrov V.P., Dridiger V.K., Gadzhiumarov R.G., Yaroslavtseva N.V., Nadutkin I.A.</i>	86
Carbon of microbial biomass in Al-Fe-humus soils of the northwestern Russia <i>Medvedeva M.V., Nikitin D.A., Semenov M.V., Akhmetova G.V.</i>	111
Communities of invertebrates and microorganisms in the soils of filtration fields of the Lgov sugar factory (Kursk region) <i>Rakhleeva A.A., Mikheev P.V., Zamotaev I.V., Gracheva R.G., Konoplyanikova J.V., Belonovskaya E.A., Karelin D.V.</i>	152
Soil maps of cities for the unified digital model of the soil cover of Russia <i>Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V.</i>	200
Retrospective analysis of agricultural land use of experimental station “Oroshaemaya” during a half century <i>Kruglyakova N.G., Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I.</i>	241
The rheometry approach in modern soil studies: a review <i>Klyueva V.V.</i>	281

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-6-27



Ссылки для цитирования:

Иванов А.Л., Столбовой В.С., Бакуменко Л.С., Гребенников А.М. О совершенствовании регулирования утилизации отвалов почв и грунтов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 6-27. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-6-27

Cite this article as:

Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Bakumenko L.S., Grebennikov A.M., Improving regulation of the use of soils and subsoils dumps in the Russian Federation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 6-27, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-6-27

О совершенствовании регулирования утилизации отвалов почв и грунтов

© 2024 г. А. Л. Иванов, В. С. Столбовой*,
Л. С. Бакуменко, А. М. Гребенников

*ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

Поступила в редакцию 12.08.2024, принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Проведен анализ нормативно-правовых основ регулирования утилизации отвалов почв и грунтов в РФ. Показано, что существующие регламенты не отвечают современным требованиям охраны и рационального использования почв. Выявлено отсутствие единого подхода к утилизации отвалов почв и грунтов. В ряде нормативно-правовых документов отвалы почв и грунтов рассматриваются как материал для рекультивации нарушенных земель, в других – как отходы производства. Обосновано несоответствие практики отнесения всех типов отвалов почв и грунтов к отходам 3–5-го классов опасности и подлежащих к вывозу на спецполигоны. Утилизация таких отвалов административно или уголовно наказуема. Такой подход к материалу почвенных выемок наносит большой вред экономике и окружающей среде в целом. Предложено изменить практику нерационального использования материала отвалов почв и внести соответствующие изменения в нормативные документы. Одним из таких изменений может быть введение в документы об определении класса опасности отходов

градации “экологически безопасные отходы” с предписанием использования относящихся к этой категории материала отвалов почв и грунтов без ограничений использования в народном хозяйстве. Предлагается внести уточнение мощности почвы (почвенного слоя) до 5 м, включив в него максимальную глубину залегания плодородного слоя почв (ПСП) и потенциально плодородный слой (ППС). Эта величина соответствует принятому стратиграфическому положению об общей закономерности строения осадочной оболочки Земли. Согласно этому взгляду, почвы подстилаются недрами, что не предполагает наличия промежуточных геологических слоев между почвами и недрами.

Ключевые слова: охрана; рациональное использование; рекультивация.

Improving regulation of the use of soils and subsoils dumps in the Russian Federation

© 2024 A. L. Ivanov, V. S. Stolbovov*,
L. S. Bakumenko, A. M. Grebennikov

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: vladimir.stolbovov@gmail.com.

Received 12.08.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The analysis of the practice for regulating the use of dumps of soils and subsoils in the Russian Federation is carried out. It is shown that the existing regulations do not meet modern requirements for the protection and rational use of dumps of soils and subsoils. The absence of a unified recycling approach has been revealed. In some regulatory documents, dumps of soils and subsoils are considered as material for the reclamation of disturbed lands, in others – as industrial waste. Disagreement with the practice of classifying all dumps of soils and subsoils as waste of hazard classes 3–5 and subject to export to special polygons is justified. Disposal of such waste materials is administratively or criminally punishable. This approach to the material of soil excavation causes great harm to both the economy and the environment as a whole. It is proposed to change the practice of irrational use of soil and subsoil dump material and make appropriate changes to regulatory documents. One of such changes may be the introduction of the gradation “environmentally safe waste” into the documents on the definition of the hazard class of waste, with the prescription for the use of soil and subsoil dumps belonging to this category without restrictions on use in the national economy. It is proposed to clarify the magnitude of the soil thickness (soil layer) of 5 m, including the

maximum depth of occurrence of fertile soil layer and potentially fertile layer. This value corresponds to the accepted stratigraphic rule on the general regularity of the structure of the sedimentary shell of the Earth. According to this point of view, soils are underlain by subsurface geological rocks, which does not imply the presence of intermediate geological layers between soils and subsurface.

Keywords: protection; rational use; reclamation.

ВВЕДЕНИЕ

Почва играет планетарную жизненно важную роль в производстве продовольствия и сырья, обеспечивает очистку и фильтрацию дождевой воды, контролирует концентрацию парниковых газов в атмосфере. Почва представляет основу пищевых цепей для человечества и выступает регулятором поверхностного биоразнообразия. Почва также составляет крупнейший резервуар хранения и поглощения влаги, снижая риски наводнений и засух. Улучшение качества почв или, напротив, усиление их деградации оказывает влияние на здоровье населения, условия жизни людей и экономическое развитие.

Понимание огромного значения почв для социально-экономического развития РФ находит отражение в совершенствовании нормативно-правовой базы. С позиций современного природоохранного законодательства РФ, почва, наряду с землей, недрами, поверхностными и подземными водами, атмосферным воздухом, растительным, животным миром и др., является одним из компонентов природной среды, обеспечивающих в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле (Статья 1, Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ). Признано, что почвы формируют природные, природно-антропогенные и антропогенные объекты природных ресурсов, которые используются или могут быть использованы при осуществлении хозяйственной и иной деятельности в качестве источников энергии, продуктов производства и предметов потребления. В контексте законодательства предписывается, что почва, как часть окружающей среды, подлежит охране, т. е. почва подпадает под деятельность государственной власти, органов местного самоуправления, общественных объединений, иных юридических лиц и граждан,

направленную на сохранение, восстановление, рациональное использование, воспроизводство, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности и ликвидацию ее последствий. Охрана почв тесно связана с организацией их рационального использования, которая включает совершенствование распределения почвенных ресурсов в соответствии с перспективами развития экономики, улучшения организации территорий и др. (Федеральный закон от 18.06.2001 N 78-ФЗ).

Перечисленные нормативно-правовые положения, принятые в РФ, созвучны с современными международными трендами. Так в странах ЕС отмечается значительное усиление внимания к сохранению почв, проблеме, которая до недавнего времени рассматривалась только в связи с охраной других компонентов окружающей среды (воздуха, поверхностных вод и др.). В ноябре 2021 г. принята новая “Почвенная Стратегия 2030” (далее Стратегия), которая фокусируется на использовании “преимуществ здоровых почв для людей, продуктов питания, природы и климата” (Soil Strategy..., 2021). Стратегия развивает идею о том, что “земля и почвы – хрупкие и ограниченные ресурсы, подверженные постоянно растущему дефициту пространства: разрастание городов и запечатывание почв поглощают природу и превращают ценные экосистемы в бетонные пустыни”. Принципиально важным в Стратегии является то, что почве отводится роль ведущего звена в ресурсо-эффективной и циркуляционной (безотходной) экономике будущего. Приоритет отдается безотходному использованию земли, по сравнению с “застройкой с нуля”. Это позволяет ограничить нагрузку на почвы при их перекрытии и значительно уменьшить изъятие земельных ресурсов. Перекрытие почв, происходящее при застройке, влечет за собой безвозвратную потерю их экосистемных услуг, подвергая города воздействию более высоких пиков паводков (Pistocchi et al., 2015) и более сильных “эффектов теплового острова” (European Commission..., 2012).

Важным является также то, что механизмы циркуляционной экономики распространяются как на поверхностные горизонты почв, так и на подстилающие почвообразующие породы, извлекаемые в процессе хозяйственной деятельности человека. Рассматриваются возможности повторного использования почвенного

минерального материала, отвалы которого образуются при различной хозяйственной деятельности (рытье траншей, котлованов, удаление поверхностной вскрыши в местах разработки карьеров полезных ископаемых, инженерная планировка территории и т. п.). При этом сообщается, что в большинстве своем минеральный материал почвенных выемок является незагрязненным, плодородным и здоровым, и его следует повторно использовать в том же или другом подходящем месте. Если невозможно повторно использовать срезанный грунт, например, из-за неприемлемого уровня загрязнения, то такие грунты должны быть приоритетными для переработки или иной формы восстановления, а не захоронения в соответствии с иерархией отходов.

На первый взгляд, рассмотренное значение почв в Стратегии преувеличено, что объясняется ограниченностью почвенных ресурсов в странах ЕС. В РФ, которая имеет около 44 млн га залежных земель, сложилось мнение об избыточности почвенных ресурсов. Однако мнение об “избыточности” не находит подтверждения по данным новейшей цифровой инвентаризации почвенных ресурсов страны.

Согласно Единому государственному реестру почвенных ресурсов России (2014), почвенный фонд включает 1586.7 млн га, что составляет 93% земельного фонда страны (Национальный доклад..., 2018). Оставшиеся 7% представлены непочвенными образованиями, такими как внутренние водоемы, выходы плотных пород, ледники и др. Почвы с теплым благоприятным для сельского хозяйства температурным режимом (среднегодовая температура выше 0 °С) занимают 182.4 млн га или около 11% почвенного фонда страны. Почвы с холодным неблагоприятным для сельского хозяйства температурным режимом (среднегодовая температура меньше 0 °С) составляют 1406.3 млн га или почти 89% почвенного фонда. Территории с холодным климатом неблагоприятны для проживания населения, мало населены и имеют ограниченный потенциал для сельскохозяйственной деятельности. По данным Росреестра на 1 января 2019 г. площадь сельскохозяйственных угодий РФ включает около 197.7 млн га (Государственный (национальный)..., 2023), что покрывает 14% почвенного фонда страны. Разница между площадями теплых и сельскохозяйственных почв

превышает 15.3 млн га или около 3%. Эти почвы имеют холодный температурный режим, определяющий пониженную биологическую активность и сниженное плодородие. Приведенные подсчеты показывают, что, несмотря на огромный почвенный фонд РФ, площадь почв сельскохозяйственных угодий с благоприятными почвенно-климатическими условиями в РФ ограничена и составляет около 182 млн га. Эта величина близка к площади сельскохозяйственных земель ЕС (в 2021 г. составляла 169 млн га¹).

Согласно статистическим данным², численность населения ЕС на 1-ое января 2024 г. составляет около 449 млн чел. Численность жителей РФ на 1-ое января 2024 г. составляет около 144 млн чел. Таким образом, нагрузка на почвенные ресурсы в РФ почти в 3 раза меньше, чем в странах ЕС. Вместе с тем проблема охраны и рационального использования почв в РФ остается весьма важной в связи с увеличением численности населения, нарастающим дефицитом почвенных ресурсов, увеличением потребности в продовольствии и сырье.

Целью настоящей работы является анализ нормативно-правовых документов, определяющих практику утилизации отходов почвогрунтов в РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы нормативно-правовые документы, регламентирующие охрану земельных и почвенных ресурсов РФ. Анализ этих документов позволяет разработать положения по улучшению практики землепользования и рационального использования почвенных ресурсов.

Термины:

Утилизация – деятельность, включающая: *рециклинг* (вторичное применение), *регенерацию* (возвращение в технологический цикл производства после предварительной переподготовки), *рекуперацию* (извлечение полезных составляющих для вторичного

¹ Доступно на сайте:

<https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?locations=EU>.

² Доступно на сайте: <https://www.worldometers.info/population/countries-in-the-eu-by-population/>

использования).

Грунт – поверхностный слой земли, состоящий из минеральных и (или) органических веществ.

Плодородный слой почвы – поверхностный естественный или искусственно созданный органический / органо-минеральный³ слой, состав, строение и свойства которого обеспечивают плодородие почвы.

Охрана почв – деятельность органов государственной власти РФ, органов государственной власти субъектов РФ, органов местного самоуправления, общественных объединений и других негосударственных некоммерческих организаций, иных юридических лиц, граждан, направленная на их сохранение и восстановление, рациональное использование и воспроизводство, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности и ликвидацию ее последствий.

Рациональное использование почв – использование, обоснованное экономически, экологически и социально.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отвалы почв и грунтов, образующиеся при выполнении разного рода земляных работ, в одних нормативных документах РФ рассматриваются как материал для рекультивации нарушенных земель, в других – как отходы производства.

Согласно ГОСТ Р 59057-2020, нарушенными считаются земли, утратившие в связи с их нарушением первоначальную хозяйственную ценность и являющиеся источником отрицательного воздействия на окружающую среду. Под нарушением земель подразумевается процесс, приводящий к регрессии почвенного покрова, гидрологического режима местности, образованию техногенного рельефа и другим качественным изменениям состояния земель.

Как следует из нормативных документов и литературы (ГОСТ Р 58486-2019; ГОСТ 17.5.1.03-86; Дербенцева и др., 2006;

³ Наименования совокупности диагностических почвенных морфогенетических горизонтов, согласно Единому государственному реестру почвенных ресурсов России (2014).

Моторина, Овчинников, 1975; Сметанини др., 2000), основными источниками нарушения земель являются:

- горнодобывающая промышленность (карьерные выемки, отвалы вскрышных пород; шахтные провалы, прогибы, терриконы, хвостохранилища);
- промышленность строительных материалов (карьеры песка, глины, гравия и т. д.);
- торфоразработки (карьеры гидроторфа, фрезерные поля, машиноформовочные и резные карьеры);
- строительство объектов различного назначения (рытье котлованов, траншей, отсыпка и срезка грунтов при инженерной планировке территории, устройство насыпей, линейных объектов – автодорог, дамб, железнодорожного полотна, нефте-, газопроводов, водопроводов, ЛЭП и т. д.);
- эксплуатация хозяйственных объектов (золоотвалы, шлакоотвалы, шламонакопители; нефтеразливы, стравливание газа, токсиканты, содержащиеся в выбросах и сбросах предприятий, всевозможные отходы производства);
- георазведка и изыскательские работы (нарушение почв и растительности, загрязнение земель отходами бурения);
- военные действия (устройство оборонительных укреплений и применение различного оружия по объектам противника);
- селитебные территории (свалки ТБО).

Некоторые авторы к нарушенным относят земли сельскохозяйственного назначения, загрязненные средствами химизации (пестицидами и удобрениями), тяжелыми металлами и другими токсикантами, а также деградированные сельскохозяйственные угодья.

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 10 июля 2018 г. N 800, Земельным Кодексом (2023), требованиями ГОСТ Р 59057-2020 и других федеральных и ведомственных нормативно-правовых документов, земли всех категорий, нарушенные в процессе хозяйственной деятельности, подлежат рекультивации. Согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 г. N 87, мероприятия по рекультивации нарушенных или загрязненных земельных участков и почвенного по-

кровка должны быть неотъемлемой частью проектной документации на различные виды объектов капитального строительства и реконструкции.

Под рекультивацией следует понимать комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и народнохозяйственной ценности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды в соответствии с интересами общества (ГОСТ Р 59057-2020).

В ГОСТ Р 57447-2017 выделено 9 направлений рекультивации.

1. Сельскохозяйственное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для осуществления сельскохозяйственной деятельности, в том числе создание на нарушенных землях плодородного слоя почвы, характеризующегося высоким содержанием гумуса, иными физико-химическими и агрохимическими свойствами, необходимыми для ведения сельскохозяйственного производства, создания защитных лесных насаждений и иных связанных с сельскохозяйственным производством целей, а также для целей аквакультуры (рыбоводства).

2. Лесохозяйственное направление рекультивации земель и земельных участков. Приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для ведения лесного хозяйства с лесонасаждениями различных направлений (противоэрозионные, водоохранные, лесопарковые, насаждения производственного назначения).

3. Водохозяйственное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для ведения водного хозяйства, в том числе в целях создания в понижениях рельефа нарушенных земель и земельных участков водных объектов различного назначения.

4. Рыбохозяйственное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для создания на рекультивированных землях водоемов для рыборазведения.

5. Рекреационное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение в населенных пунктах нарушенных земель, занятых городскими лесами, скверами, парками, город-

скими садами, прудами, озерами, водохранилищами, в состоянии, пригодное для использования населением указанных объектов в целях отдыха, туризма, занятий спортом.

6 Природоохранное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для восстановления биологического разнообразия и гидрологического режима, в том числе в форме создания особо охраняемых природных территорий регионального и местного значения для сохранения и воспроизводства природных ресурсов.

7. Санитарно-гигиеническое направление рекультивации земель и земельных участков: биологическая или техническая консервация нарушенных земель, оказывающих отрицательное воздействие на окружающую среду, рекультивация которых для использования в народном хозяйстве экономически неэффективна.

8. Строительное направление рекультивации земель и земельных участков: приведение нарушенных земель и земельных участков в состояние, пригодное для промышленного, гражданского и прочего строительства.

9. Консервационное направление рекультивации: проведение работ в целях консервации земель, не поддающихся качественному восстановлению и представляющих угрозу в качестве источников негативного воздействия на окружающую среду.

Общие требования к рекультивации земель по указанным направлениям изложены в ГОСТ Р 58486-2019. Более детальная проработка некоторых аспектов рекультивации представлена в ГОСТ Р 59057-2020, ГОСТ Р 57447-2017, ГОСТ Р 59060-2020, ГОСТ 17.5.3.05-84, ГОСТ 17.4.3.02-85, ГОСТ 17.5.3.-06-85. Кроме того, требования к рекультивации земель, состав работ, последовательность их выполнения и порядок передачи рекультивированных земель землевладельцу (землепользователю) включен в ряд ведомственных нормативных документов. Так, для объектов нефтегазового комплекса эта информация содержится в ВСН 014-89 (1990) и РД 39-00147105-006-97 (1997), транспортного строительства – в методических рекомендациях (1983), для теплоэлектростанций – в РД 34.02.202-95 (1995), объектов связи – в РП.1.279-2-89 (1989).

Рекультивация нарушенных земель включает два этапа –

технический и биологический (ГОСТ Р 59057-2020).

При рекультивации отвалов вскрышных пород (терриконов, хвосто- и шламохранилищ), карьерных выработок часто технический этап рекультивации именуется горнотехническим.

После завершения строительных работ или выработки месторождения выполняются в основном следующие мероприятия технического (горнотехнического) этапа (ГОСТ Р 59057-2020):

- грубая и чистовая планировка поверхности отвалов, засыпка нагорных, водоподводящих, водоотводных каналов; выполаживание или террасирование откосов; засыпка и планировка шахтных провалов;

- освобождение рекультивируемой поверхности от крупногабаритных обломков пород, производственных конструкций и строительного мусора с последующим их захоронением или организованным складированием;

- строительство подъездных путей к рекультивированным участкам, устройство въездов и дорог на них с учетом прохода сельскохозяйственной, лесохозяйственной и другой техники;

- устройство, при необходимости, дренажной, водоотводящей оросительной сети и строительство других гидротехнических сооружений;

- устройство дна и бортов карьеров, оформление остаточных траншей, укрепление откосов;

- ликвидация или использование плотин, дамб, насыпей, засыпка техногенных озер и протоков, восстановление естественного стока, благоустройство русел ручьев и рек;

- создание и улучшение структуры рекультивационного слоя, мелиорация токсичных пород и загрязненных почв, если невозможна их засыпка слоем потенциально плодородных пород;

- создание, при необходимости, экранирующего слоя;

- покрытие поверхности потенциально плодородными и (или) плодородными слоями почвы;

- проведение мероприятий по предотвращению негативных экзогенных процессов (водной линейной и плоскостной эрозии, дефляции, солифлюкции, оползневания, термокарста и т. п.).

Мероприятия по технической рекультивации и последовательность их выполнения в каждом конкретном случае зависит от

множества различных факторов, определяемых спецификой природных условий, техногенных нарушений, направлением рекультивации (ГОСТ Р 59057-2020), ресурсами пригодных для рекультивации пород.

На биологическом этапе проводится комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий по восстановлению плодородия нарушенных земель (ГОСТ Р 59057-2020).

Однако этот этап рекультивации в полной мере соответствует только сельскохозяйственному и лесохозяйственному направлениям. Для остальных биологический этап проводится не на всей рекультивируемой площади и в разной степени оказывается замененным строительным этапом (строительство различного рода водохранилищ, водоемов, бассейнов, разных спортивных площадок и других сооружений). Эти работы не входят в сферу деятельности по рекультивации земель и должны выполняться по проектам, нормам и правилам водохозяйственного, гражданского и промышленного строительства.

Биологический этап сельскохозяйственного направления рекультивации состоит в проведении интенсивного мелиоративного воздействия с выращиванием однолетних, многолетних злаковых и бобовых культур для восстановления и формирования корнеобитаемого слоя и его обогащения органическими веществами при применении специальных агрохимических, агротехнических, агролесомелиоративных, инженерных и противозерозионных мероприятий. После проведения этого этапа должны быть получены заключения от агрохимической и санитарно-эпидемиологической служб об отсутствии опасности выноса растениями веществ, токсичных для человека и животных.

Биологический этап при лесохозяйственном направлении рекультивации имеет целью создание в неблагоприятных почвенно-грунтовых условиях лесонасаждений, выполняющих мелиоративные функции. Подбор древесных и кустарниковых растений осуществляется в соответствии с классификацией горных пород, характером гидрогеологического режима и других экологических факторов. При этом проводятся противопожарные мероприятия.

Менее подробно рассмотрен биологический этап рекультивации при водохозяйственном, санитарно-гигиеническом и рекре-

ационном направлениях рекультивации.

Провозглашение в ГОСТ Р 57447-2017 рыбохозяйственного, природоохранного, консервационного и строительного направлений рекультивации этим и ограничилось. Мероприятия по техническому и биологическому этапам рекультивации, регламенты, порядок и последовательность их проведения для этих направлений рекультивации к настоящему времени не имеют никакой нормативно-правовой базы федерального уровня.

Большое значение для рекультивации земель, особенно при ее сельскохозяйственном направлении, является снятие перед производством планируемых работ и нанесение после их окончания плодородного слоя почв (ПСП). Еще до начала работ, сопровождаемых нарушением земель, производится снятие и складирование ПСП. В случае нехватки материала ПСП для планируемой в будущем рекультивации необходимое для этой цели количество компенсируют материалом потенциально-плодородного слоя (ППС). Его размещают в отдельных буртах. Смешивание материала плодородного и потенциально-плодородного слоя не допускается (ГОСТ 17.4.3.02-85). Особенно часто возникает потребность в материале ППС и потенциально-плодородных пород при рекультивации отвалов плотных пород, когда он может быть использован вместо материала плодородного слоя или же подстилать последний, что приводит к увеличению общей мощности покрытия плотных пород и значительному улучшению условий роста и развития растений на рекультивируемой поверхности.

Целесообразность снятия ПСП и ППС устанавливают в зависимости от уровня плодородия почвенного покрова конкретного региона, природной зоны, типов и подтипов почв и основных показателей их состава и свойств.

Используемый для рекультивации материал почв и грунтов должен соответствовать экологическим нормам по содержанию токсических и радиоактивных веществ, бактериологическим и паразитарным показателям, не содержать в своем составе существенное количество инородных включений в виде бытового, производственного и строительного мусора (ГОСТ 17.5.3.05-84).

Снятие и рациональное использование ПСП необходимо производить на землях всех категорий. Показатели состава и

свойств ПСП должны удовлетворять следующим условиям:

1. Если ПСП содержит радиоактивные элементы, тяжелые металлы, остаточные количества пестицидов и другие токсичные соединения в концентрациях, превышающих предельно допустимые уровни, установленные для почв, опасен в эпидемиологическом отношении, загрязнен и засорен отходами производства, твердыми предметами, камнями, щебнем, галькой, строительным мусором, то норма снятия такого ПСП также не устанавливается.

2. Мощность ПСП под лесом должна быть не менее 10 см.

3. Массовая доля гумуса в нижней границе ПСП должна составлять: в лесостепной и степной зонах – не менее 2%; в южно-таежно-лесной, сухостепной, полупустынной, предгорной пустынно-степной, субтропической предгорной полупустынно-пустынной, субтропической кустарниково-степной и сухолесной, субтропической, влажнолесной, в северной части лесостепной зоны для серых лесных почв, в почвах горных областей – не менее 1%; в пустынной и субтропической пустынной – не менее 0.7%.

4. Величина рН водной вытяжки в плодородном слое почвы должна составлять 5.5–8.2; в подзолисто-желтоземных почвах, красноземах и почвах горных областей – не менее 4.0.

5. Величина рН солевой вытяжки дерново-подзолистых почв должна составлять не менее 4.5; в торфяном слое – 3.0–8.2.

6. Массовая доля обменного натрия от емкости катионного обмена должна составлять: в ПСП черноземов, темно-каштановых, каштановых почв и сероземов в комплексах с солонцами – не более 5%; на слабо- и среднесолонцеватых разновидностях зональных и гидроморфных почв лесостепной и степной зон – менее 15%; на слабо- и среднесолонцеватых разновидностях малогумусных южных черноземов, бурых, каштановых почв и сероземов, а также гидроморфных полугидроморфных почв сухостепной и полупустынной зон – менее 10%.

7. Массовая доля водорастворимых токсичных солей в плодородном слое почвы не должна превышать 0.25% от массы почвы; предел допустимого количества водорастворимых токсичных солей в плодородном слое почвы может быть увеличен до 0.5% при использовании его на орошаемых участках.

8. Массовая доля почвенных частиц менее 0.1 мм должна

быть в интервале – от 10 до 75%; на пойменных, старичных, дельтовых песках и приарычных песчаных отложениях – 5–10%.

Для ППС в ГОСТ 17.5.3.-06-85 приведен лишь один показатель состава и качества: массовая доля гумуса в этом слое почвы должна быть в лесостепной и степной зонах – 1–2%; в сухостепной и пустынной зонах – 0.5–1%. При этом подразумевается, что остальные показатели ППС должны соответствовать ПСП.

Под ППС согласно ГОСТ Р 59057-2020 подразумеваются горные породы, обладающие ограниченно благоприятными для роста растений физическими и (или) химическими свойствами, но являющиеся пригодными для произрастания на них растений. Такими породами могут быть лёссы, лёссовидные, покровные и флювиогляциальные суглинки и другие породы, не обладающие токсичными для растений свойствами и не содержащие большого количества каменистого и щебнистого материала.

Породы легкого гранулометрического состава – пески, гравий, галечник, а также тяжелого – средние и тяжелые глины; породы кислые, солонцеватые, средnezасоленные, согласно большинству классификаций, относятся к следующей, более низкой категории – к породам малоприспособным. Хозяйственное использование малоприспособных пород возможно лишь при проведении комплексных мелиоративных мероприятий. После этого на сложенных данными породами отвалах можно создавать сенокосные угодья, выращивать лес.

Таким образом, согласно указанным документам в целях рекультивации могут использоваться плодородный слой и все нижележащие горизонты, а также породы зоны аэрации, не загрязненные токсичными и радиоактивными веществами и не содержащие значительного количества разного рода отходов и каменистого материала.

Рассмотренные выше нормативы имеют ряд неопределенностей в части величины мощности почвы, максимальной глубины залегания ПСП и ППС. Согласно толковому словарю по почвоведению⁴, “мощность почвы включает почвенный профиль от дневной поверхности до малоизмененной породы, которая может ко-

⁴ Доступно на сайте: <https://gufo.me/dict/pedology>.

лебаться в пределах от нескольких см до 2–3 м и более”. В этом определении неясным остается значение величины “более”. Вместе с тем с позиций стратиграфического взгляда на общие закономерности строения осадочной оболочки Земли принято, что почвы подстилаются недрами (Закон РФ..., 1992). Этот взгляд не предполагает наличие промежуточных отложений между почвами и недрами. Следовательно, мощность почвы, наряду с морфогенетическим профилем (по В.В. Докучаеву, соответствует формуле: А-В-С) и почвообразующими породами (соответствует горизонту С), определяется глубиной залегания недр, которая, по разным источникам, составляет 5 м (Маштаков, 2018; Богатырев, 2018; Перчик, 2002). Важно, что ответственность за нормирование использования почв и почвообразующих пород до глубины 5 м возлагается на почвоведение. Отметим, что в настоящее время землевладельцам (землепользователям) разрешено использование почв и грунтов на земельном участке до глубины не более 5 метров от поверхности без лицензирования, так как слой 0–5 м не является ни почвами, ни недрами (Маштаков, 2018).

Совсем иначе рассматривается материал почв и грунтов при отношении к нему как к отходу. Согласно приказу Минприроды РФ от 04.12.2014 N 536 “Об утверждении критериев отнесения отходов к 1–5-му классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду”, все без исключения отвалы почв и грунтов, образующиеся при строительстве объектов или иной хозяйственной деятельности, являются отходами (Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ), относимыми в зависимости от загрязненности к 3–5-му классам опасности (Приказ Минприроды РФ от 04.12.2014 N 536; Федеральный классификационный каталог отходов, 2021). С целью минимизации воздействия на окружающую среду эти отходы должны вывозиться на спецполигоны. Использование их как материала отсыпки или рекультивации на других территориях приравнивается к несанкционированному размещению загрязняющих веществ в окружающей среде, что влечет за собой административную и даже уголовную ответственность. Однако, поскольку отнесение грунтов и почв к 5-му классу опасности производится по последней градации оценки отходов, численно выражаемой неравенством, при котором показатель сте-

пень опасности отхода для окружающей среды не превышает 10, то логично считать, что в эту градацию, наряду с малоопасными отходами, входят и безопасные грунты и почвы. Однако с позиций существующего подхода разделения отходов по классам опасности безопасные грунты и почвы также относятся к опасным отходам. Их использование в качестве отсыпки или рекультивации территории считается недопустимым, то есть отвалы почв и грунтов, не содержащие загрязняющих веществ выше допустимых норм, считаются опасными отходами.

Такое отношение к отвалам почв и грунтов нельзя считать допустимым. Оно противоречит вышерассмотренным нормативным документам по охране почв в РФ, а также глобальному тренду по отношению к отходам, выражающемуся в применении к ним принципов циркуляционной экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие регламенты по утилизации отвалов почв и грунтов, образующихся при выполнении разного рода земляных работ, не отвечают современным требованиям охраны и рационального использования почв РФ. Проведенный анализ нормативно-правовых документов выявляет отсутствие единого подхода утилизации. В ряде нормативных документов отвалы почв и грунтов рассматриваются как материал для рекультивации нарушенных земель, в других – как отходы производства. Вызывает сомнение тот факт, что все отвалы почв и грунтов без исключения, в том числе и экологически безопасные, образующиеся при строительстве объектов или иной хозяйственной деятельности, относят к отходам 3–5-го классов опасности и подлежащих вывозу для размещения на спецполигонах. Использование материала таких отвалов административно или уголовно наказуемо. Более того, такой подход к материалу почвенных выемок наносит прямой и наведенный вред почвам и окружающей среде в целом. Необходимо изменить практику негативного отношения к отвалам материала почв и грунтов только как к отвалам токсичных отходов и внести соответствующие изменения в нормативные документы. Допустимым может быть введение в документы об определении класса опасности отходов дополнительной градации “экологиче-

ски безопасные отходы”, с предписанием использования относящихся к этой категории материала отвалов почв и грунтов без ограничений использования в народном хозяйстве.

Предлагается внести уточнение величины мощности почвы (почвенного слоя) до 5 м, включив в него максимальную глубину залегания плодородного слоя почв (ПСП) и потенциально-плодородный слой (ППС). Эта величина соответствует принятому стратиграфическому положению об общей закономерности строения осадочной оболочки Земли. Согласно этому подходу, почвы подстилаются недрами, что не предполагает наличия промежуточных геологических слоев между почвами и недрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богатырев И.Р.* Участок недр как самостоятельный объект гражданских прав // Молодой ученый. 2018. № 44(230). С. 110–112.
2. ВСН 014-89. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Охрана окружающей среды. Миннефтегазстрой. М., 1990. 46 с.
3. ГОСТ Р 59057-2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель.
4. ГОСТ Р 58486-2019. Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния.
5. ГОСТ 17.5.1.03-86. Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель.
6. ГОСТ Р 57447-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Основные положения.
7. ГОСТ Р 59060-2020. Охрана окружающей среды. Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации.
8. ГОСТ 17.5.3.05-84. Охрана природы. Рекультивация земель. Общие требования к землеванию.
9. ГОСТ 17.4.3.02-85. Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ.
10. ГОСТ 17.5.3.-06-85. Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ.
11. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2022 году

(официальный сайт Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, раздел “Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель”, ноябрь 2023 г.). URL: <http://www.rosreestr.gov.ru>.

12. *Дербенцева А.М., Крупская Л.Т., Степанова А.И.* Рекультивация деградированных и восстановление разрушенных почв. Владивосток: ДВГУ, 2006. 70 с.

13. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.

14. Закон РФ N 2395-I “О недрах” от 21.02.92 (в редакции от 25.12.2023 – действует с 01.03.2024).

15. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 15.08.2023).

16. *Маштаков К.М.* Участки недр как объекты гражданских прав // Юристъ-правоведь. 2018. № 1. С. 147–151.

17. Методические рекомендации по рекультивации земель, нарушаемых при транспортном строительстве. М., 1983. 17 с.

18. *Моторина Л.В., Овчинников В.А.* Промышленность и рекультивация земель. М. Мысль. 1975. 240 с.

19. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель, адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. *А.И. Бедрицкого*). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ГЕОС, 2018. 286 с.

20. *Перчик А.И.* Горное право. М.: Издательский Дом “Филология три”, 2002. 525 с.

21. Постановление Правительства РФ от 10 июля 2018 г. N 800 “О проведении рекультивации и консервации земель” (с изменениями и дополнениями).

22. Постановление Правительства РФ “О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию” от 16.02.2008 г. № 87.

23. Приказ Минприроды РФ от 04.12.2014 N 536 “Об утверждении критериев отнесения отходов к 1–5 классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду”.

24. РД 39-00147105-006-97. Инструкция по рекультивации земель, нарушенных и загрязненных при аварийном и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов. М.: Транснефть, 1997. 24 с.

25. РД 34.02.202-95. Рекомендации по рекультивации отработанных золошлакоотвалов тепловых электростанций. М., 1995. 9 с.

26. РП.1.279-2-89. Методическое руководство по проектированию. “Рекультивация земель, нарушенных при строительстве объектов связи”. М. 1989. 13 с.
27. *Сметанин В.И.* Рекультивация и обустройство нарушенных земель. М.: Колос, 2000. 96 с.
28. Федеральный закон от 18.06.2001 N 78-ФЗ (ред. от 30.12.2021) “О землеустройстве”.
29. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023) “Об охране окружающей среды” (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.07.2024).
30. Федеральный закон “Об отходах производства и потребления” от 24.06.1998 N 89-ФЗ.
31. Федеральный классификационный каталог отходов. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 02.11.2018) “Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов” (с изм. и доп., вступ. в силу с 04.10.2021).
32. European Commission. In depth report: soil sealing. 2012.
33. *Pistocchi A. et al.* Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna. Italy. 2015.
34. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD (2021) 323 final (Новая “Почвенная стратегия” ЕС до 2030 г.). URL: https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030_en.

REFERENCES

1. Bogatyrev I.R., Uchastok nedr kak samostojatel'nyj ob#ekt grazhdanskih prav (Subsoil plot as an independent object of civil rights), *Molodoj uchenyj*, 2018, No. 44(230), pp. 110–112.
2. VSN 014-89, Construction of trunk and field pipelines. Environmental protection. Minneftegazstroy, Moscow, 1990, 46 p.
3. State standard, GOST R 59057-2020, Environmental protection. Lands. General requirements for reclamation of disturbed lands.
4. State standard, GOST P 58486-2019, Environmental protection. Soils. Nomenclature of indicators of sanitary condition.
5. State standard, GOST 17.5.1.03-86, Nature protection. Earths. Classification of overburden and host rocks for biological recultivation of lands.
6. State standard, GOST P 57447-2017, Best available technologies. Recultivation of lands and land plots contaminated with oil and oil products. Basic provisions.
7. State standard, GOST P 59060-2020, Environmental protection. Lands.

Classification of disturbed lands for reclamation purposes.

8. State standard, GOST 17.5.3.05-84. Nature protection. Recultivation of lands. General requirements for land reclamation.

9. State standard, GOST 17.4.3.02-85. Nature protection. Soils. Requirements for the protection of the fertile soil layer during earthworks.

10. State standard, GOST 17.5.3.06-85. Nature protection. Earths. Requirements for determining the norms of removal of the fertile soil layer in the course of excavation works.

11. State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2022 (official website of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography, section ‘State (national) report on the state and use of land’, November 2023), URL: <http://www.rosreestr.gov.ru>.

12. Derbentseva A.M., Krupskaya L.T., Stepanova A.I., *Rekul'tivacija degradirovannyh i vosstanovlenie razrushennyh pochv* (Recultivation of degraded and restoration of destroyed soils), Vladivostok: DVGU. 2006, 70 p.

13. Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0. Collective monograph, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, RAS, 2014, 768 p.

14. Law of the Russian Federation N 2395-I “On Subsoil” dated 21.02.92 (as amended on 25.12.2023 – came into force from 01.03.2024).

15. Land Code of the Russian Federation of 25.10.2001 N 136-FZ (ed. of 04.08.2023) (with amendments and additions, in force from 15.08.2023).

16. Mashtakov K.M., Uchastki nedr kak ob'ekty grazhdanskih (Subsoil plots as objects of civil rights), *Jurist-pravoved*, 2018, No. 1, pp. 147–151.

17. Methodological recommendations for the reclamation of land disturbed during transport construction, Moscow, 1983, 17 p.

18. Motorina L.V., Ovchinnikov V.A., *Promyshlennost' i rekul'tivacija zemel'* (Industry and land reclamation), Moscow: Mysl, 1975, 240 p.

19. Bedritsky A.I. (Ed.), National report “Global climate and soil cover of Russia: assessment of risks and ecological and economic consequences of land degradation, adaptive systems and technologies of rational nature management (agriculture and forestry)”, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, GEOS, 2018, 286 p.

20. Perchik A.I., *Gornoe pravo* (Mining Law), Moscow: Izdatel'skij Dom “Filologija tri”, 2002, 525 p.

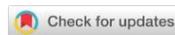
21. Resolution of the Government of the Russian Federation dated 10 July 2018 N 800 “On the reclamation and conservation of land” (as amended and supplemented).

22. Resolution of the Government of the Russian Federation “On the composition of sections of project documentation and requirements for their content” dated 16.02.2008, No. 87.

23. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 04.12.2014 N 536 “On Approval of criteria for attributing wastes to 1–5 hazard classes by the degree of negative impact on the environment”.
24. RD 39-00147105-006-97, Instruction on recultivation of the lands disturbed and polluted during emergency and overhaul of main oil pipelines, Moscow: Transneft, 1997, 24 p.
25. RD 34.02.202-95, Recommendations on reclamation of spent ash and slag dumps of thermal power plants, Moscow: 1995, 9 p.
26. RP.1.279-2-89, Methodical design guide “Recultivation of lands disturbed during construction of communication facilities”, Moscow: 1989, 13 p.
27. Smetanin V.I., *Rekul'tivacija i obustrojstvo narushennyh zemel'* (Recultivation and arrangement of disturbed lands), Moscow: Kolos, 2000, 96 p.
28. Federal Law from 18.06.2001 N 78-FZ (ed. from 30.12.2021) “On land management”.
29. Federal Law of 10.01.2002 N 7-FZ (ed. of 25.12.2023) “On Environmental Protection” (with amendments and additions, in force since 01.07.2024).
30. Federal Law “On Production and Consumption Waste” dated 24.06.1998 N 89-FZ.
31. Federal classification catalogue of wastes. Order of Rospirodnadzor dated 22.05.2017 No. 242 (ed. 02.11.2018) “On Approval of the Federal classification catalogue of wastes” (with amendments and additions, effective from 04.10.2021).
32. European Commission. In depth report: soil sealing. 2012.
33. Pistocchi A. et al., Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna. Italy. 2015.
34. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD (2021) 323 final. New EU Soil Strategy for 2030, URL: https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030_en.

УДК 632.125+631.416.1+631.465

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-28-46



Ссылки для цитирования:

Сыщиков Д.В., Березовский А.С., Агурова И.В. Влияние деградационных процессов на ферментативную активность и содержание форм минерального азота почв сельхозугодий // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 28-46. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-28-46

Cite this article as:

Syshchikov D.V., Berezovskiy A.S., Agurova I.V., The influence of degradation processes on enzymatic activity and the content of forms of mineral nitrogen in agricultural soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 28-46, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-28-46

Благодарность:

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ “Донецкий ботанический сад” по теме FREG-2023-0002 “Качественные и функциональные характеристики почв сельскохозяйственных угодий в степной зоне и пути восстановления их биологической продуктивности”, № 123101300198-3.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state task of FSBSI DBG on the theme FREG-2023-0002 “Qualitative and functional characteristics of agricultural soils in the steppe zone and ways to restore their biological productivity”, No. 123101300198-3.

Влияние деградационных процессов на ферментативную активность и содержание форм минерального азота почв сельхозугодий

© 2024 г. Д. В. Сыщиков^{*}, А. С. Березовский^{**}, И. В. Агурова^{***}

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Донецкий ботанический сад”, Россия,
ДНР, 283023, Донецк, пр. Ильича, 110,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-4044-1129>, e-mail: 2007dmitry@rambler.ru,

^{**}<https://orcid.org/0009-0006-1260-1921>, e-mail: berezovskiias@list.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-4583-6480>, e-mail: ir.agur@mail.ru.

*Поступила в редакцию 26.01.2024, после доработки 08.04.2024,
принята к публикации 14.11.2024*

Резюме: Целью работы было изучение концентрации различных форм минерального азота и ферментов цикла азота в почвах сельхозугодий. В задачи исследований входило изучение содержания аммонийной и нитратной форм азота, а также активности уреазы и нитратредуктазы в почвах сельхозугодий на территории Донецкой Народной Республики (ДНР). Для исследования почв сельскохозяйственных угодий были выбраны модельные участки, расположенные в южной части Шахтерского района ДНР, представленные черноземами среднесмытыми мало-, слабо- и среднегумусированными. Контролем являлся участок со степной растительностью (чернозем обыкновенный мощный среднегумусный). Результаты проведенных исследований позволяют сделать выводы о развитии деградационных процессов на ряде модельных участков и об их влиянии на содержание аммонийного и нитратного азота в почвах сельхозугодий. Выращивание сельскохозяйственных культур с высоким уровнем выноса элементов минерального питания, склоновая поверхность участков, длительность возделывания зерновых культур на одних и тех же участках приводят к существенному снижению концентрации аммонийного и нитратного азота. Так, наиболее существенное снижение концентрации азота аммонийных соединений (на 77–82%) зафиксировано на модельных склоновых участках под кукурузой и подсолнечником. Анализ данных показал приуроченность обменного аммония к нижележащим генетическим горизонтам. Минимальная концентрация нитратов в пахотном горизонте зафиксирована при совместном влиянии таких неблагоприятных факторов, как: нерациональное расположение полей по элементам рельефа; нарушение условий севооборота; использование культур-предшественников с существенным уровнем выноса питательных элементов (пшеница, кукуруза). При изучении активности уреазы установлено, что низкое количество почвенных микроорганизмов, связанное с выращиванием кукурузы и подсолнечника, а также с развитием деградационных процессов различного генезиса, приводило к угнетению функционирования уреазы почв модельных участков. Максимальная активность уреазы наблюдалась на участках под озимой пшеницей и составила 68–72% по отношению к контрольным показателям. В результате проведенных исследований активности нитратредуктазы также установлено снижение ее значений на участках, используемых для выращивания культур, формирующих большую фитомассу (кукуруза и подсолнечник).

Ключевые слова: деградация почв; нитратный азот; аммонийный азот; ферменты; уреазы; нитратредуктаза.

The influence of degradation processes on enzymatic activity and the content of forms of mineral nitrogen in agricultural soils

© 2024 D. V. Syschchykov^{*}, A. S. Berezovskiy^{**}, I. V. Agurova^{***}

*Federal State Budgetary Scientific Institution "Donetsk botanical garden", ,
110 Illicha aven., Donetsk, 283023, Russian Federation,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-4044-1129>, e-mail: 2007dmitry@rambler.ru,

^{**}<https://orcid.org/0009-0006-1260-1921>, e-mail: berezovskiiias@list.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-4583-6480>, e-mail: ir.agur@mail.ru.

Received 26.01.2024, Revised 08.04.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The purpose of the work was to study the concentration of various forms of mineral nitrogen and nitrogen cycle enzymes in farmland soils. The objectives of the research included studying the content of ammonium and nitrate forms of nitrogen, as well as the activity of urease and nitrate reductase in soils of farmland on the territory of the Donetsk People's Republic (DPR). To study the soils of agricultural lands, model sites located in the southern part of the Shakhtersky district of the DPR were selected and represented by moderately washed-out chernozems with low, low and medium humus. The control was an area with steppe vegetation (ordinary chernozem, thick, with medium humus content). The results of the researches allow us to draw conclusions about the development of degradation processes in a number of model sites and their impact on the content of ammonium and nitrate nitrogen in agricultural soils. Growing crops removing substantial amount of mineral nutrients, the slope of the sites surface, and the duration of cultivation of grain crops in the same sites lead to a significant decrease in the concentration of ammonium and nitrate nitrogen. Thus, the most significant decrease in the concentration of nitrogen of ammonium compounds (by 77–82%) was recorded in model slope areas under maize and sunflower. Analysis of the data showed that exchange ammonium is confined to the underlying genetic horizons. The minimum concentration of nitrates in the arable horizon was recorded under the joint influence of such unfavorable factors as: unreasonable layout of fields along the relief elements; violation of crop rotation conditions; use of precursor crops with a significant level of removal of nutrients (wheat, maize). When studying the activity of urease, it was found that a low number of soil microorganisms associated with the cultivation of maize and sunflower, as well as with the development of degradation processes of various genesis, led to the suppression of the functioning of the urease of soils in model areas. The maximum urease activity was observed in areas under winter wheat and amounted to 68–72% in relation to the control indicators. As a result of studies

of nitrate reductase activity, a decrease in its values was also found in areas used to grow crops that form a large phytomass (maize and sunflower).

Keywords: soil degradation; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; enzymes; urease; nitrate reductase.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров является основополагающим составным элементом земельных ресурсов страны, от состояния которого зависит продуктивность и устойчивость последних к деградиационным процессам. Не всегда возможно рассматривать урожай как критерий плодородия. К определяющим критериям состояния почв можно отнести такие показатели, как характеристики и режимы почв, а также их состав, поскольку в них заложены показатели изменений, обусловленных деградацией или мелиорацией. В связи с этим к объективному критерию плодородия почвы следует отнести оценку ее эколого-хозяйственного состояния, способности эффективно выполнять свои агрономические и экологические функции (Молчанов и др., 2017).

Очень долгое время в сельскохозяйственном производстве сохранялось устойчивое мнение о том, что черноземы – ресурс, из которого можно безнаказанно постоянно черпать те или иные энергетические запасы для жизнеобеспечения человека. Однако исследованиями многих ученых в последние десятилетия эта мысль опровергается. Так, с каждым годом уровень деградиационных процессов в черноземах возрастает, приводя зачастую к негативным последствиям (Кочетов и др., 2000; Корнейко, 2013). Исследования, посвященные изучению процессов агрогенной трансформации почв, выявлению влияния различных технологий на свойства почвенного покрова, оценке степени развития деградиационных процессов почв проводятся на территории России (Замотаев и др., 2016; Столбовой, Гребенников, 2020; Белобров и др., 2020; Слабунова, Арискина, 2022). Признаками деградации почв являются увеличение значений обменной и гидролитической кислотности, изменение качественного и количественного состава почвенно-поглощающего комплекса, снижение запасов гумуса, а также степени обеспеченности элементами минерального питания, нарушение физических свойств почв и снижение ферментативной

и биологической активности.

Основную роль в формировании плодородия почв и в продукционном процессе сельскохозяйственных культур выполняет азот как один из основных элементов минерального питания растений в связи с тем, что основная часть почвенного азота входит в состав гумуса и растений (Завалин и др., 2018). Особенности баланса азота в земледелии обусловлены тем, что он в процессах синтеза и распада органического вещества участвует в различных формах (окисленные NO_3^- , NO_2^- , NO^- ; восстановленные NH_4^+ , NH_2^+) (Васильченко, 2014). Из ряда соединений почвенного азота, непосредственно усвояемых растениями, выделяются его минеральные формы – нитраты и аммоний, причем последний может находиться в почве не только в обменном, но и в необменном состоянии (Кудеяров, 1989).

Одним из основных критериев плодородия почвы является ее ферментативная активность. Любая почва характеризуется определенным уровнем активности тех или иных ферментов, что обусловлено их многообразием и количественным содержанием (Швакова, 2013). Почвы, подверженные существенному антропогенному воздействию, характеризуются измененным составом микроорганизмов, а также тенденцией к снижению биологической активности, что приводит к трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов. Функционирование микроорганизмов цикла азота можно использовать в качестве интегрального показателя биологической активности почв и одного из главных критериев оценки плодородия. Уреаза – это фермент, который катализирует гидролиз мочевины до аммиака и диоксида углерода. Этот фермент поступает в почву в составе растительных остатков, органических и азотных удобрений, а также образуется в самой почве в качестве продукта превращения азотистых органических соединений (Дроздова и др., 2010). Нитратредуктаза – один из ключевых ферментов азотного обмена почвы, который используется как диагностический показатель ее состояния (Пронина, Баздырова, 2002; Казеев и др., 2003). Его функция заключается в восстановлении нитрат-иона до нитрит-иона.

Важность проведения фундаментальных научных исследований, связанных с изучением специфики процессов деградации

почв, не вызывает сомнений. Целью исследований было изучение концентрации различных форм минерального азота, а также ферментов цикла азота в почвах сельхозугодий. В задачи исследований входило изучение содержания аммонийной и нитратной форм азота, а также активности уреазы и нитратредуктазы в почвах сельхозугодий на территории Донецкой Народной Республики (ДНР).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований являлись почвы. Исследования проводились на модельных участках южной части Шахтерского района ДНР. Для исследования почвенного покрова деградированных агроэкосистем были выбраны модельные участки различной степени деградации. При их выборе учитывались такие факторы, как распространенность типа нарушения в пределах района исследований, степень антропогенной трансформации, тип возделываемой культуры. Отбор проб почвы проводился в сентябре 2023 г.

Участок № 1. Участок со степной растительностью, режим абсолютного заповедания (с. Самсоново, Новоазовский район, 47°17'18.42" N; 38°10'47.75" E). Чернозем обыкновенный мощный среднегумусный.

Участок № 2. Участок со степной растительностью для выгона скота (с. Самсоново, Новоазовский район, 47°17'25.66" N; 38°10'25.32" E). Чернозем обыкновенный мощный среднегумусный.

Участок № 3. Поле под озимой пшеницей (с. Розовка, Шахтерский район, 48°10'04.6" N; 38°12'32.7" E). Чернозем обыкновенный малогумусный.

Участок № 4. Склоновый участок поля под озимой пшеницей, второй год монокультуры (с. Новоселовка, Шахтерский район, 48°09'40.1" N; 38°08'16.7" E). Посевы значительно загрязнены сорно-рудеральной растительностью: *Ambrosia artemisiifolia* L., *Convolvulus arvensis* L., *Carduus crispus* L., *Bromus arvensis* L. Чернозем обыкновенный среднесмытый малогумусный.

Участок № 5. Склоновый участок поля под подсолнечником (с. Верхняя Крынка, Шахтерский район, 48°10'47.9" N;

38°08'58.0" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый слабо гумусированный.

Участок № 6. Поле под паром, первый год после подсолнечника (с. Розовка, Шахтерский район, 48°10'41.8" N; 38°15'07.2" E). Чернозем обыкновенный малогумусный.

Участок № 7. Склоновый участок поля под яровой пшеницей (г. Ждановка, Шахтерский район, 48°10'37.5" N; 38°16'06.1" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый среднегумусный.

Участок № 8. Склоновый участок поля под озимой пшеницей (п. г. т. Нижняя Крынка, Шахтерский район, 48°06'13.9" N; 38°12'05.9" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый малогумусный.

Участок № 9. Поле под пшеницей, второй год монокультуры (с. Ровное, Шахтерский район, 48°06'28.8" N; 38°33'51.9" E). Чернозем обыкновенный малогумусный.

Участок № 10. Поле под пшеницей, первый год после кукурузы (с. Ровное, Шахтерский район, 48°06'21.9" N; 38°33'57.5" E). Чернозем обыкновенный слабо гумусированный.

Участок № 11. Склоновый участок поля под озимой пшеницей (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'43.5" N; 38°35'49.3" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый малогумусный.

Участок № 12. Склоновый участок поля под паром после пшеницы (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'46.6" N; 38°35'43.7" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый малогумусный.

Участок № 13. Склоновый участок поля под паром после кукурузы (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'38.7" N; 38°35'49.9" E). Чернозем обыкновенный среднесмытый слабо гумусированный.

Описание почвенных разрезов проводили согласно общепринятым методикам (Методические рекомендации, 1999; Розанов, 1983). Отбор почвенных образцов проводили по почвенным горизонтам (Методы почвенной микробиологии, 1991).

Концентрация аммонийного азота (обменного аммония) определялась общепринятым методом (Практикум по агрохи-

мии..., 2001). Содержание нитратного азота – по методу Грандваль-Ляжу (Практикум по агрохимии..., 2001). Активность уреазы исследовалась по Казееву (Казеев и др., 2003), нитратредуктазы – по Хазиеву (Хазиев, 1982). Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по общепринятым методам параметрической статистики на 95%-ном уровне значимости по Б.А. Доспехову (Доспехов, 1985).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных, представленных в таблице 1, показал, что распределение аммонийного азота в пахотном горизонте большинства модельных участков достаточно монотонно и составляет 62–79% по сравнению с контрольными показателями. Это связано с тем, что на накопление обменного аммония слабое влияние оказывают обработка почвы и предшествующая культура. Можно предположить, что потери аммонийного азота на формирование растительной биомассы в достаточной степени компенсируются как наличием в почве пожнивных остатков прошлых лет, так и внесением минеральных удобрений в дозах, предусмотренных региональной агротехнологией культивирования сельскохозяйственных растений. Наряду с этим выращивание сельскохозяйственных культур с высоким уровнем выноса элементов минерального питания, а также усиление процессов нитрификации, обусловленной улучшением аэрации при выведении полей севооборота под пар, привели к существенному снижению концентрации азота аммонийных соединений на 77–82% на модельных участках №№ 5, 6 и 11. Наиболее приближенными к показателям зональной почвы по содержанию обменного аммония были участки №№ 2 и 11, в генетических горизонтах которых статистически достоверные различия, по отношению к контролю, отсутствовали.

Изучение распределения аммонийного азота по почвенному профилю показало, что он преимущественно локализуется в нижележащих генетических горизонтах.

Таблица 1. Содержание аммонийного азота (мг N-NH₄⁺/100 г почвы) в почвах сельскохозяйственных угодий

Table 1. Ammonium nitrogen content (mg N-NH₄⁺/100 g soil) in soils of agricultural lands

Участок/ горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 А	5.62 ± 0.09	–	–
№ 1 В	6.27 ± 0.11	–	–
№ 2 А	5.28 ± 0.16	94.0	1.85
№ 2 В	5.97 ± 0.14	95.2	1.68
№ 3 А	4.12 ± 0.22*	73.3	6.36
№ 3 В	4.88 ± 0.09*	77.9	9.67
№ 4 А	3.47 ± 0.03*	61.6	22.4
№ 4 В	4.19 ± 0.05*	66.9	17.66
№ 5 А	1.84 ± 0.02*	32.7	40.98
№ 5 В	2.42 ± 0.02*	38.6	35.25
№ 6 А	1.13 ± 0.09*	20.1	34.29
№ 6 В	1.67 ± 0.05*	26.7	39.03
№ 7 А	3.48 ± 0.41*	62.0	5.12
№ 7 В	4.02 ± 0.09*	64.2	15.77
№ 8 А	4.06 ± 0.16*	72.1	8.62
№ 8 В	4.37 ± 0.05*	69.8	16.18
№ 9 А	4.44 ± 0.16*	79.0	6.54
№ 9 В	4.72 ± 0.38*	75.3	3.92
№ 10 А	4.14 ± 0.16*	73.7	8.12
№ 10 В	4.73 ± 0.06*	75.5	12.28
№ 11 А	5.68 ± 0.13	101.1	0.38
№ 11 В	6.15 ± 0.11	98.1	0.81
№ 12 А	4.04 ± 0.29*	71.8	5.22
№ 12 В	4.37 ± 0.07*	69.8	14.77
№ 13 А	1.02 ± 0.03*	18.1	47.99
№ 13 В	1.45 ± 0.03*	23.1	42.99

Примечание. Здесь и далее М – среднее значение признака, m – ошибка среднего, % – процент превышения значений по отношению к аналогичным почвенным горизонтам участка № 1, Tst – значения критерия Стьюдента, * – различия статистически достоверны при p < 0.05.

Note. Here and after, M – is the average value of the characteristic, m – is the error of the mean, % – is the percentage of values exceeding those of similar

soil horizons in site No. 1, T_{st} – is the Student's t-test value, * – is the differences are statistically significant at $p < 0.05$.

По нашему мнению, данный факт связан с тем, что преимущественная масса корневой системы выращиваемых растений, распределена именно в пределах пахотного горизонта, что приводит к активному поглощению данной формы минерального азота, а также ростом иммобилизации соединений аммония вследствие усиления фиксации NH_4^+ глинистыми минералами. Наряду с этим в подпахотном горизонте почв модельных участков характер распределения обменного аммония по отношению к показателям зональной почвы был аналогичен отмеченному для пахотного горизонта.

При изучении содержания нитратного азота установлено, что, в отличие от обменного аммония, его концентрация в пахотном горизонте практически всех модельных участков существенно ниже последнего. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований В.О. Бусыгина с соавторами, которыми показано, что концентрации нитратов и аммония в почве не имеют прямой односторонней зависимости друг с другом (Бусыгин и др., 2019). Также следует отметить, что наиболее низкая концентрация нитратов в пахотном горизонте зафиксирована при совместном влиянии нескольких неблагоприятных факторов, таких как: нерациональное расположение полей по элементам рельефа, обуславливающее усиление внутрипочвенного и поверхностного выноса элементов; длительное возделывание зерновых культур на одних и тех же участках; использование в севообороте культур-предшественников с высоким уровнем выноса питательных элементов. Вероятнее всего, это и обусловило уменьшение количества нитратов на модельных участках №№ 5, 9, 10, 12 и 13 на 76–82% по сравнению с контрольными показателями (табл. 2).

На полях под озимой пшеницей (участки №№ 3, 8 и 11) снижение концентрации нитратного азота было выражено в меньшей степени, и его уровень находился в пределах 59–78% относительно зональной почвы, что, по нашему мнению, связано с видовыми особенностями культуры. Кроме того, низкий уровень антропогенного влияния на участке № 2 обусловил отсутствие

статистически достоверных различий в содержании нитратов по сравнению с контролем.

Таблица 2. Содержание нитратного азота (мг N-NO₃⁻/100 г почвы) в почвах сельскохозяйственных угодий

Table 2. Nitrate nitrogen content (mg N-NO₃⁻/100 g soil) in soils of agricultural lands

Участок/ горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 A	3.67 ± 0.04	–	–
№ 1 B	1.82 ± 0.11	–	–
№ 2 A	3.54 ± 0.08	96.5	1.45
№ 2 B	1.64 ± 0.04	90.1	1.54
№ 3 A	2.18 ± 0.01*	59.4	36.14
№ 3 B	0.73 ± 0.05*	40.1	9.02
№ 4 A	1.42 ± 0.04*	38.6	39.69
№ 4 B	0.72 ± 0.09*	39.8	7.89
№ 5 A	0.9 ± 0.01*	24.4	61.73
№ 5 B	0.63 ± 0.05*	34.7	9.92
№ 6 A	1.42 ± 0.03*	38.7	42.52
№ 6 B	0.71 ± 0.02*	39.3	10.11
№ 7 A	1.26 ± 0.05*	34.3	38.2
№ 7 B	0.64 ± 0.04*	35.1	10.4
№ 8 A	2.25 ± 0.01*	61.4	32.24
№ 8 B	0.77 ± 0.02*	42.5	9.56
№ 9 A	0.66 ± 0.03*	18.0	55.61
№ 9 B	0.16 ± 0.02*	8.6	15.2
№ 10 A	0.91 ± 0.03*	24.8	51.77
№ 10 B	0.34 ± 0.01*	18.9	13.76
№ 11 A	2.87 ± 0.07*	78.2	10.08
№ 11 B	0.77 ± 0.03*	42.2	9.43
№ 12 A	0.96 ± 0.01*	26.1	58.94
№ 12 B	0.59 ± 0.01*	32.3	11.44
№ 13 A	0.88 ± 0.03*	24.0	50.1
№ 13 B	0.61 ± 0.04*	33.5	10.63

Улучшение гидротермических условий и достаточно высокая биологическая активность верхнего слоя почвы, вероятнее всего, и обусловили максимальный уровень накопления нитратного азота в пределах пахотного горизонта по сравнению с нижележащим горизонтом (табл. 2). Характер распределения данной формы минерального азота в нижележащих почвенных горизонтах модельных участков по отношению к контрольным показателям был аналогичен таковому для пахотного горизонта.

При изучении активности уреазы получены данные, которые демонстрируют существенное варьирование показателя активности данного фермента, что зависит от расположения модельного участка, степени его деградации, почвенного горизонта (табл. 3).

Максимальная активность уреазы наблюдалась на участках под озимой пшеницей (участки №№ 3 и 11) и составила 68–72% по отношению к контрольным показателям. Практически аналогичные показатели были получены и на участке под озимой пшеницей (участок № 7). Высокие показатели ферментативной активности на данных участках обусловлены наличием большого количества растительных остатков, которые являются источником фермента и одновременно служат субстратом для его функционирования. Второй год монокультуры, а также выращивание кукурузы негативно сказались на уреазной активности почвы. Так, на участках №№ 4 и 10 активность уреазы оказалась несколько ниже и составила 41–49% по отношению к контролю.

Наиболее низкие показатели уреазной активности были зафиксированы на участках под кукурузой и подсолнечником (участки №№ 5, 6, 13) и составляли 16–36% по отношению к показателям зональной почвы.

Изменение активности уреазы по горизонтам имеет четкую картину распределения. Так, на всех мониторинговых участках ее активность в горизонте А на 33–54% выше, чем в горизонте В, так как уреазы иммобилизуется в месте своего образования, а именно в верхнем горизонте почвы, и слабо мигрирует по почвенному профилю.

Таблица 3. Активность уреазы (мг NH₃/10 г почвы за сутки) в почвах сельскохозяйственных угодий

Table 3. Urease activity (mg NH₃/10 g soil per day) in soils of agricultural lands

Участок/ горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 А	44.0 ± 1.77	–	–
№ 1 В	28.9 ± 1.03	–	–
№ 2 А	60.5 ± 3.40*	137.7	4.32
№ 2 В	39.1 ± 0.80*	135.3	7.83
№ 3 А	31.6 ± 0.64*	71.8	6.60
№ 3 В	20.6 ± 0.53*	71.4	7.15
№ 4 А	21.7 ± 0.96*	49.3	6.17
№ 4 В	14.0 ± 0.84*	48.6	11.19
№ 5 А	16.1 ± 0.33*	36.6	12.40
№ 5 В	9.7 ± 0.31*	33.5	17.93
№ 6 А	10.4 ± 0.27*	23.7	15.62
№ 6 В	4.8 ± 0.10*	16.7	23.33
№ 7 А	28.9 ± 0.69*	65.6	17.69
№ 7 В	17.4 ± 0.22*	60.2	10.97
№ 8 А	18.3 ± 0.21*	41.6	8.49
№ 8 В	11.4 ± 0.36*	39.5	16.07
№ 9 А	20.2 ± 1.16*	46.0	12.16
№ 9 В	13.0 ± 0.13*	45.2	15.30
№ 10 А	19.6 ± 0.61*	44.6	12.71
№ 10 В	12.0 ± 1.13*	41.6	11.08
№ 11 А	31.9 ± 1.46*	72.6	10.64
№ 11 В	19.8 ± 0.55*	68.4	7.83
№ 12 А	14.9 ± 0.79*	33.9	6.22
№ 12 В	8.2 ± 0.83*	28.5	15.66
№ 13 А	10.7 ± 0.19*	24.3	16.35
№ 13 В	5.9 ± 0.43*	20.5	20.61

Распашка почв ведет к угнетению активности уреазы, так как данный фермент активизируется преимущественно в верхнем, гумусоаккумулятивном горизонте. На склоновых участках также отмечено снижение функционирования данного фермента в связи

с вымыванием органической составляющей. Неодинаковая интенсивность выноса минеральных форм азота сельскохозяйственными культурами обусловила различия и в активности уреазы. Низкое количество почвенных микроорганизмов, связанное с культивированием кукурузы и подсолнечника, а также с развитием деградационных процессов различного генезиса, привело к угнетению функционирования уреазы почв модельных участков, а уровень ее активности, согласно Гапонюку и Малахову, определен как “средний” (Казеев и др., 2003).

При исследовании активности нитратредуктазы установлено, что регулярное использование минеральных азотсодержащих удобрений, которые являются субстратом для функционирования этого фермента, существенно повысило уровень ее активности в почвах изученных модельных участков (табл. 4).

Максимальные показатели активности нитратредуктазы были отмечены на мониторинговых участках №№ 3, 4, 7, 8, 9, 11 под озимой и яровой пшеницей и составили 124–288% относительно контрольных показателей.

На участках №№ 5, 6 и 13, которые использовались для выращивания культур с большой фитомассой (кукуруза и подсолнечник), выявлен гораздо меньший уровень функционирования данного фермента, составивший 23–52% по отношению к контрольному участку. Следует отметить, что практически во всех случаях активность нитратредуктазы в горизонте В выше, чем в горизонте А, так как максимальная активность фермента осуществляется в анаэробных условиях и при повышенной влажности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать выводы о развитии деградационных процессов в ряде модельных участков и их влиянии на содержание аммонийного и нитратного азота в почвах сельхозугодий. Выращивание сельскохозяйственных культур с высоким уровнем выноса элементов минерального питания, расположение полей, их уклон, длительность возделывания зерновых культур на одних и тех же участках приводят к существенному снижению концентрации азота аммонийных и нит-

ратных соединений.

Таблица 4. Активность нитратредуктазы (мг NO₃⁻/10 г почвы за сутки) в почвах сельскохозяйственных угодий

Table 4. Nitrate reductase activity (mg NO₃⁻/10 g soil per day) in soils of agricultural lands

Участок/ горизонт	M ± m	% к контролю	Tst
№ 1 А	38.1 ± 1.26	–	–
№ 1 В	14.4 ± 2.77	–	–
№ 2 А	34.2 ± 1.87	89.7	1.74
№ 2 В	13.7 ± 0.31	95.6	0.23
№ 3 А	66.6 ± 0.42*	174.8	21.46
№ 3 В	41.4 ± 2.56*	287.9	7.17
№ 4 А	57.4 ± 1.66*	150.8	9.29
№ 4 В	20.6 ± 2.47	143.0	1.66
№ 5 А	14.8 ± 1.97*	38.9	9.96
№ 5 В	12.8 ± 0.66	89.2	0.55
№ 6 А	18.6 ± 0.74*	48.9	13.31
№ 6 В	7.5 ± 0.84*	52.5	2.36
№ 7 А	56.6 ± 1.08*	148.6	11.18
№ 7 В	19.3 ± 1.16	134.5	1.65
№ 8 А	50.0 ± 0.37*	131.2	9.04
№ 8 В	20.2 ± 0.87	140.4	2.00
№ 9 А	48.7 ± 0.96*	127.8	6.68
№ 9 В	21.5 ± 0.85*	149.5	2.46
№ 10 А	47.2 ± 1.08*	123.8	5.46
№ 10 В	22.2 ± 0.32*	154.2	2.79
№ 11 А	46.3 ± 0.92*	121.5	5.26
№ 11 В	17.8 ± 0.97	124.0	1.18
№ 12 А	24.2 ± 3.18*	63.4	4.07
№ 12 В	8.60 ± 1.40	60.1	1.85
№ 13 А	9.10 ± 1.23*	23.9	16.44
№ 13 В	5.40 ± 1.44*	37.5	2.87

При изучении активности уреазы установлено, что низкое количество почвенных микроорганизмов, связанное с выращива-

нием ряда сельскохозяйственных культур, а также с развитием деградационных процессов различного генезиса, приводило к угнетению функционирования уреазы почв модельных участков. Наиболее низкие показатели уреазной активности были зафиксированы на участках под кукурузой и подсолнечником (участки №№ 5, 6, 13) и составляли 16–36% по отношению к контрольным показателям. В результате проведенных исследований активности нитратредуктазы также установлено снижение ее значений на участках, используемых для выращивания культур с большой биомассой (кукуруза и подсолнечник).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобров В.П., Дридригер В.К., Юдин С.А. Влияние технологий земледелия на морфометрические признаки черноземов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 125–142. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-125-142](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-125-142).
2. Бусыгин В.О., Бунин А.А., Даниленко Ю.А. Содержание нитратной и аммонийной форм азота в почвах санатория “Сосновая роща” и обеспеченность ими растений // Молодой ученый. 2019. № 5(243). С. 85–88.
3. Васильченко Н.И. Агрогенная трансформация азота в почвах северного Казахстана // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6(116). С. 67–71.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Изд-во “Агропромиздат”, 1985. 351 с.
5. Дроздова Н.И., Свириденко В.Г., Хаданович А.В., Панфиленко О.А. Исследование ферментативной активности дерново-подзолистых почв // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2010. № 3(60). С. 84–88.
6. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроecosистеме на черноземных почвах. М.: РАН, 2018. 180 с.
7. Замотаев И.В., Белобров В.П., Курбатова А.Н., Белоброва Д.В. Агрогенная и постагрогенная трансформация почв Львовского района Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. № 85. С. 97–114. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-97-114](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-97-114).
8. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований.

Ростов н/Д: изд-во РГУ, 2003. 216 с.

9. *Корнейко Н.И.* Мониторинг кислотности пахотных почв в Белгородской области // Успехи современного естествознания. 2013. № 9. С. 16–24.

10. *Кочетов И.С., Лукин С.В., Тютюнов С.И.* Экологические аспекты использования средств химизации в эрозионно-опасных ландшафтах // Агрохимический вестник. 2000. № 2. С. 15–18.

11. *Кудеяров В.Н.* Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.

12. Методические рекомендации по морфологическому описанию почв / сост. *Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Герасько Л.И.* Томск: Изд-во СО РАН, 1999. 39 с.

13. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. *Звягинцева Д.Г.* М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

14. *Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Разумов В.В., Макаров О.А., Цветнов Е.В., Ермияев Я.Р., Шишконокова Е.А., Харзинов С.М.* Деградация горных черноземов северного склона джинальского хребта (Центральный Кавказ) и ее эколого-экономические последствия // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. № 87. С. 86–99. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-86-99](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-86-99).

15. Практикум по агрохимии / под ред. *Минеева В.Г.* М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

16. *Пронина Н.Б., Баздыров Г.И.* Особенности ферментативной активности почв и растений в условиях эрозионного стресса // Известия ТСХА. 2002. Вып. 2. С. 50–65.

17. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: МГУ, 1983. 320 с.

18. *Слабунова А.В., Арискина Ю.Ю.* Оценка степени деградации почв на примере сельскохозяйственных земель Куйбышевского района Ростовской области // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4. № 1. С. 14–31. DOI: [10.31774/2658-7890-2022-4-1-14-31](https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-1-14-31).

19. *Столбовой В.С., Гребенников А.М.* Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. № 104. С. 31–67. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).

20. *Хазиев Ф.Х.* Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука, 1982. 204 с.

21. *Швакова Э.В.* Изменение активности уреазы при повышенных содержаниях тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu) в почве // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. 2013. № 2. С. 61–66.

REFERENCES

1. Belobrov V.P., Dridiger V.K., Yudin S.A., Influence of agricultural technologies on the morphological properties of chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, No. 102, pp. 125–142, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-125-142](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-125-142).
2. Busygin V.O., Bunin A.A., Danilenko Yu.A., Soderzhanie nitratnoi i ammoniinoi form azota v pochvakh sanatoriya “Sosnovaya roshcha” i obespechennost' imi rastenii (The content of nitrate and ammonium forms of nitrogen in the soils of the Sosnovaya Roshcha sanatorium and the provision of plants with them), *Molodoi uchenyi*, 2019, No. 5(243), pp. 85–88.
3. Vasil'chenko N.I., Agrogennaya transformatsiya azota v pochvakh severnogo Kazakhstana (Agrogenic transformation of nitrogen in soils of northern Kazakhstan), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No 6(116), pp. 67–71.
4. Dospekhov B.A., *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* (Field experience methodology (with the basics of statistical processing of research results), Moscow: Izd-vo “Agropromizdat”, 1985, 351 p.
5. Drozdova N.I., Sviridenko V.G., Khadanovich A.V., Panfilenko O.A., Issledovanie fermentativnoi aktivnosti dernovo-podzolistykh pochv (Study of enzymatic activity of soddy-podzolic soils), *Izvestiya Gorn'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny*, 2010, No. 3(60), pp. 84–88.
6. Zavalin A.A., Sokolov O.A., Shmyreva N.Ya., *Azot v agrosisteme na chernozemnykh pochvakh* (Nitrogen in the agricultural system on chernozem soils), Moscow: RAN, 2018, 180 p.
7. Zamotaev I.V., Belobrov V.P., Kurbatova A.N., Belobrova D.V., Anthropogenic and post-Anthropogenic transformation of soils of l'gov region of kursk oblast, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, No 85, pp. 97–114, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-97-114](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-97-114).
8. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., *Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniy* (Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods), Rostov n/D: Izd-vo RGU, 2003, 216 p.
9. Korneiko N.I., Monitoring kislotnosti pakhotnykh pochv v Belgorodskoi oblasti (Monitoring the acidity of arable soils in the Belgorod region), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2013, No. 9, pp. 16–24.
10. Kochetov I.S., Lukin S.V., Tyutyunov S.I., Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya sredstv khimizatsii v erozionno-opasnykh landshaftakh (Environmental aspects of the use of chemical agents in erosion-hazardous landscapes), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2000. No. 2, pp. 15–18.

11. Kudeyarov V.N., *Tsikl azota v pochve i effektivnost' udobrenii* (Soil nitrogen cycle and fertilizer efficiency), Moscow: Nauka, 1989, 216 p.
12. Dyukarev A.G., Pologova N.N., Geras'ko L.I. (comp.), *Metodicheskie rekomendatsii po morfologicheskomu opisaniyu pochv* (Guidelines for the morphological description of soils), Tomsk: Izd-vo "SO RAN", 1999, 39 p.
13. Zvyagintsev D.G. (Ed.), *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii* (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.
14. Molchanov E.N., Savin I.Yu., Razumov V.V., Makarov O.A., Tsvetnov E.V., Ermiyaev Ya.R., Shishkonakova E.A., Harzinov S.M., The Degradation of the Mountain Chernozems of the Slope of Djinal Ridge (Central Caucasus) and its Ecologic and Economic Consequences, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 87, pp. 86–99, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-86-99](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-86-99).
15. Mineev V.G. (Ed.), *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agricultural chemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 689 p.
16. Pronina N.B., Bazdyrov G.I., Osobennosti fermentativnoi aktivnosti pochv i rastenii v usloviyakh erozionnogo stressa (Features of enzymatic activity of soils and plants under conditions of erosion stress), *Izvestiya TSKhA*, 2002, Vol. 2, pp. 50–65.
17. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Isd-vo MGU, 1983, 320 p.
18. Slabunova A. V., Ariskina Yu. Yu., Otsenka stepeni degradatsii pochv na primere sel'skokhozyaistvennykh zemel' Kuibyshevskogo raiona Rostovskoi oblasti (Assessment of the degree of soil degradation using the example of agricultural lands in the Kuibyshevsky district of the Rostov region), *Ekologiya i vodnoe khozyaistvo*, 2022, Vol. 4, No 1, pp. 14–31, DOI: [10.31774/2658-7890-2022-4-1-14-31](https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-1-14-31).
19. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, No 104, pp. 31–67, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).
20. Khaziev F.Kh., *Sistemno-ekologicheskii analiz fermentativnoi aktivnosti pochv* (System-ecological analysis of soil enzymatic activity), Moscow: Nauka, 1982, 204 p.
21. Shvakova E.V., Izmenenie aktivnosti ureazy pri povyshennykh sodержaniyakh tyazhelykh metallov (Pb, Zn, Cu) v pochve (Changes in urease activity at elevated levels of heavy metals (Pb, Zn, Cu) in the soil), *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta*, 2013, No 2, pp. 61–66.

УДК 631.417.1

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-47-69



Ссылки для цитирования:

Проخورов А.А., Борисов Б.А., Ефимов О.Е. Пермангант-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 47-69.
DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-47-69

Cite this article as:

Prokhorov A.A., Borisov B.A., Efimov O.E., Permanganant-oxidizable carbon as a marker of soil quality in agrolandscapes, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 47-69, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-47-69

Благодарность:

Статья подготовлена по итогам исследований в рамках программы Приоритет 2030 по направлению научного исследования “Разработка региональной методики оценки влияния современных агротехнологий на устойчивость агроландшафтов и плодородие почв”.

Acknowledgments:

The article was prepared based on the results of research within the framework of the Priority 2030 programme in the research area “Development of a regional methodology for assessing the impact of modern agro-technologies on the sustainability of agrolandscapes and soil fertility”.

Пермангант-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов

© 2024 г. А. А. Проخورов *, Б. А. Борисов **, О. Е. Ефимов ***

РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия,

127434, Москва, Тимирязевская ул., 49,

**<https://orcid.org/0000-0002-2988-5055>,*

e-mail: artem.prokhorov.2016@inbox.ru,

*** e-mail: borisov@rgau-msha.ru,*

**** e-mail: efimovoe@yandex.ru.*

*Поступила в редакцию 26.10.2023, после доработки 16.02.2024,
принята к публикации 14.11.2024*

Резюме: На примере почв Северо-Предкавказской провинции рассмотрены различные лабораторные методы оценки качества почв. В работе приведен подробный протокол проведения количественного определения фракции Permanganate oxidizable carbon (ПОХС) при

использовании 0.2 н. раствора перманганата калия. Данные представлены для почв черноземного типа Ростовской области, принадлежащих к различным агроэкологическим группам. Были использованы образцы черноземов обыкновенных (Napric Chernozems) и лугово-черноземных (Gleyic Chernozems) почв агроландшафтов. Для оценки фоновых параметров использовались данные необрабатываемых участков. Оценивались корреляционные зависимости РОХС с фракцией бихромат-окисляемого углерода, легкой ($<1.6 \text{ г/см}^3$) и водоэкстрагируемой фракциями. Установлено, что содержание фракции РОХС варьировало в диапазоне 126–1 006 мг/кг, при этом максимальные значения, в среднем 925 мг/кг, отмечались в пробах гумусовых горизонтов обыкновенных черноземов плакорной агроэкологической группы необрабатываемых участков. Минимальным же содержанием фракции РОХС характеризовались пробы горизонтов АВ пахотных плакорных и пахотных слабо- и среднеэрозионных агроэкологических групп, в среднем 218 и 137 мг/кг соответственно. Установлено, что РОХС имеет значимые корреляции с фракцией бихромат-окисляемого углерода, содержанием легкой фракции, содержанием общего азота и плотностью почвы, и на данной выборке показал себя как хороший маркер агроэкологических условий.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество; агроэкологические группы почв; активный углерод.

Permanganant-oxidizable carbon as a marker of soil quality in agrolandscapes

© 2024 A. A. Prokhorov^{*}, B. A. Borisov^{**}, O. E. Efimov^{***}

*Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after K.A. Timiryazev,*

49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,

^{}<https://orcid.org/0000-0002-2988-5055>,*

e-mail: artem.prokhorov.2016@inbox.ru,

*^{**}e-mail: borisov@rgau-msha.ru,*

*^{***}e-mail: efimovoe@yandex.ru.*

Received 26.10.2023, Revised 16.02.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: Different laboratory methods of soil quality assessment are considered by the example of soils of the North-Pre-Caucasian province. The article presents a detailed protocol for quantitative determination of Permanganate oxidizable carbon (POXC) fraction using 0.2 M potassium permanganate solution. The data are presented for chernozem type soils of

Rostov region belonging to different agroecological groups. Samples of ordinary chernozems (Haplic Chernozems) and meadow-chernozems (Gleyic Chernozems) soils of agrolandscapes were used. Data from non-tilled plots were used to estimate background parameters. Correlation POXC with fraction of bichromate-oxidizable carbon, light fraction ($LF < 1.6 \text{ g/cm}^3$) and water-hydrolysable fractions were estimated. It was found that the content of POXC fraction varied in the range of 126–1 006 mg/kg, with maximum values, on average 925 mg/kg, in samples of humus horizons of ordinary chernozems of plakorny agroecological group of untreated plots. The minimum content of POXC fraction was characteristic for samples of AB horizons of arable plakorny and arable low- and medium eroded agroecological soil groups, on average 218 and 137 mg/kg, respectively. POXC has significant correlations with the fraction of bichromate-oxidizable carbon, the content of light fraction, the content of total nitrogen and soil density, and has shown to be a good marker of agro-ecological conditions on the studied set of samples.

Keywords: soil organic matter; agroecological soil groups; active carbon.

ВВЕДЕНИЕ

Почва – один из наиболее значимых резервуаров углерода в биосфере (Lal, 2004). Процессы стабилизации углерода преимущественно реализуются через фиксацию органического вещества в виде органоминеральных комплексов, устойчивых к биологическому разложению (Тулина, Семенов, 2015). С точки зрения устойчивости концептуально выделяют пулы по: химической структуре биополимеров (Холодов, 2011), связи с минеральной частью почвы (Борисов, 2022; John, 2005), способности к микробному разложению (Тулина, Семенов, 2015) и времени пребывания углерода в почве (Артемьева и др., 2021). Среди методов, характеризующих свойства органических веществ в почве, выделяют три основных кластера: химический, физический, биологический. В нашей стране традиционно наиболее широко используется химический анализ. Оксидиметрический метод Тюрина в различных его модификациях, в основе которого лежит использование хромовой смеси в качестве окислителя, остается единственным используемым показателем при проведении агрохимического обследования почв (Прохоров, 2022). Помимо валового определения окисляемого углерода, широко распространены методы оценки фракционно-группового состава (Фоминых и др., 2009). Соотно-

шения групп и фракций гумусовых веществ используют для характеристики качественного состава органического вещества и оценки плодородия почв (Заварзина и др., 2021). Следует отметить, что в отечественных работах достаточно мало внимания уделяется рассмотрению процессов окисления углерода при использовании различных окислителей, таких как: перманганат калия, перекись водорода, хлористая кислота и т. д. В работе (Weil, 2003) авторы отмечают высокую информативность количества РОХС при использовании в качестве окислителя KMnO_4 в концентрации 0.02 н. В дальнейшем в работе (Culman, 2012) было установлено, что фракция перманганат окисляемого углерода наиболее тесно связана с фракцией углерода микробной биомассы. В работе (Fine, 2017) РОХС была охарактеризована как лучший предиктор в модели комплексной оценки состояния почв “Soil health”. При этом фракция РОХС в рамках предложенного метода (Culman, 2012) выступает как часть наиболее активного почвенного углерода, а сама методика определения, с точки зрения оптимизации лабораторной работы, является интересным методом оценки гумусового состояния почв.

Цель данной работы состояла в изучении свойств почв разных агроэкологических групп, приуроченных к территории Северо-Предкавказской провинции с использованием различных групп лабораторных методов, а также поиск наиболее чувствительных маркеров качества почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для апробации методики были использованы образцы черноземов обыкновенных и луговато-черноземных почв агроландшафтов зерноградского района Ростовской области. Структура почвенного покрова исследуемого района, представлена неконтрастными вариациями черноземов, разной степени смытости, с луговато-черноземными почвами. В рамках данной работы почвы объединяли в агроэкологические группы (Кирюшин, 2005).

Образцы обыкновенных черноземов – (Haplic Chernozems) и луговато-черноземных почв (Gleyic Chernozems) (IUSS, 2014) были отобраны в рамках проведения почвенно-ландшафтного обследования территории зерноградского района Ростовской области

(п. Путь правды). Агроэкологические группы почв представлены плакорной группой – черноземы обыкновенные предкавказские, слабоэрозийной группой – черноземы обыкновенные предкавказские слабосмытые, слабополугидроморфной группой – луговато-черноземные почвы (Киришин, 2005). Помимо почв агроландшафтов анализы были проведены с пробами, отобранными на смежной территории, не входящей в состав пашни. Точки отбора проб представлены на рисунке 1. Отбор образцов производился из почвенных разрезов – средний образец для слоя горизонта $A_{\text{пах}}$, средний образец для горизонта АВ. Общее количество рассмотренных почвенных разрезов – 33 шт.

Образцы высушивали в течение двух недель на воздухе, после чего хранили при комнатной температуре в темном месте.

В пробах почв определяли: содержание бихромат-окисляемой фракции путем мокрого озоления пробы в присутствии $K_2Cr_2O_7 : H_2SO_4$ (1 : 1) в соответствии с методом Тюрина, выход легкой фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ (Прохоров, 2023), содержание водоекстрагируемого углерода (HWC) в соответствии с методом экстракции, предложенным в работе (Ghani, 2007) и последующим определением фотометрическим способом концентрации мг углерода в аликвоте вытяжки – 25 мл после выпаривания, при использовании 0.4 н. раствора хромовой смеси в качестве окислителя. Плотность почвы определяли методом режущего кольца, содержание общего азота (TN) на автоматическом анализаторе.

На основании известного протокола (Weil, 2003) анализа для определения фракции “активного углерода” или Permanganat oxidizable carbon (ПОХС) Испытательным центром почвенно-экологических исследований РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева был апробирован протокол, приведенный ниже.

Оптическую плотность измеряли на фотоэлектрокалориметре СФ-2000 при длине волны 550 нм в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см. При реализации схемы анализа возникали не прописанные в используемом протоколе проблемы, в том числе связанные с необходимостью корректировки рН раствора. Поэтому считаем полезным привести подробный протокол проведения анализа, принятый в нашей лаборатории, с рядом комментариев.

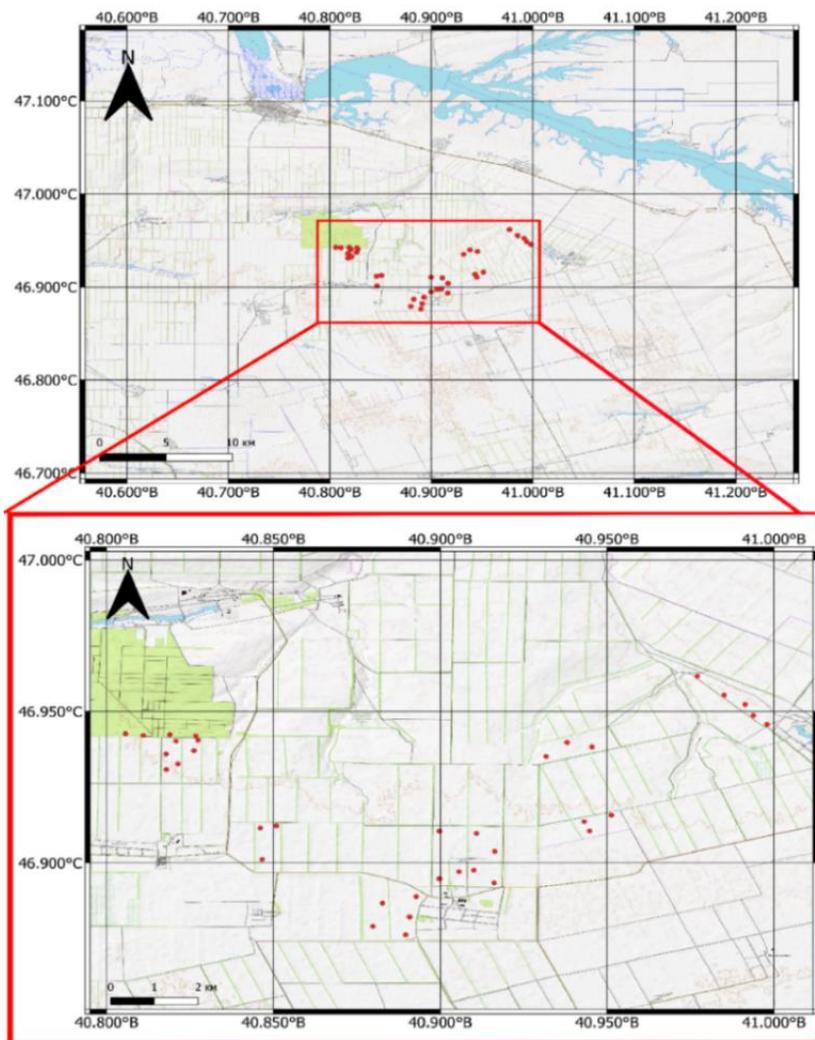


Рис. 1. Точки пробоотбора.
Fig. 1. Sampling points.

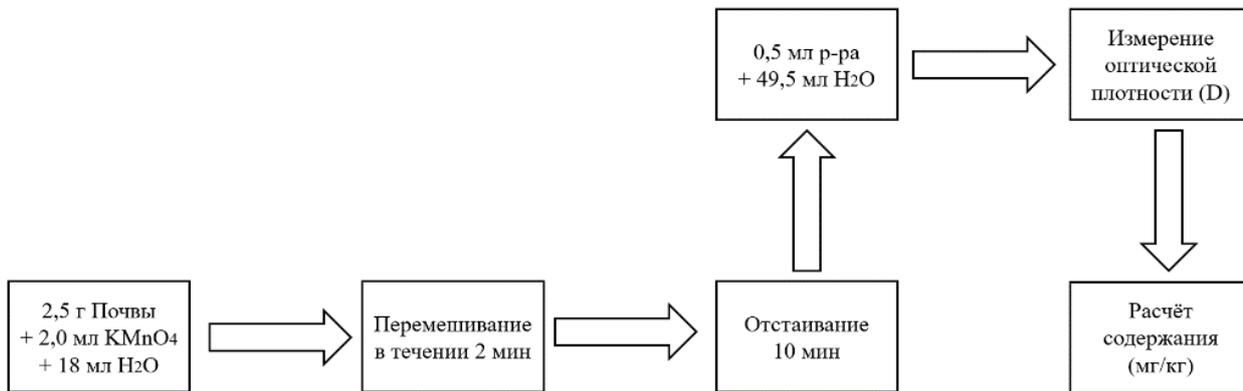


Рис. 2. Схема проведения анализа.

Fig. 2. Scheme of analysis.

Протокол оценки оксидиметрических фракций в Испытательном центре почвенно-экологических исследований РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Суть метода заключается в использовании MnO_4^- как мощного окислителя в нейтральной, слабокислой и слабощелочной среде за счет большой разницы потенциалов между ионами Mn^{2+} и MnO_4^- . Реагируя с почвенным органическим веществом (наиболее активной его частью), раствор, содержащий KMnO_4 , постепенно обесцвечивается: темно-фиолетовая окраска переходит в слабо-розовую, а затем раствор становится практически бесцветным.

Приготовление раствора окислителя производят согласно методике, предложенной в работе (Culman, 2012), 147 г хлористого кальция необходимо полностью растворить в 800 мл дистиллированной воды при использовании ультразвука, либо при слабом нагревании и использовании магнитной мешалки. По истечении 10–15 минут проверить раствор на наличие кристаллов нерастворенного KMnO_4 , при необходимости декантировать. Далее, в соответствии с методикой, pH раствора довести до величины 7.2 ед. с помощью 0.1 н растворов NaOH и HCl . После этого объем окислителя довести до 1 л, перенести в емкость из темного стекла и хранить в темном месте.

Градуировочный график строят по четырем калибровочным растворам при следующих концентрациях KMnO_4 : 0.005; 0.01; 0.015; и 0.02 н. Объем исходного 0.2 н раствора, необходимый для приготовления калибровочных растворов, указан в таблице 1.

Таблица 1. Приготовление калибровочных растворов
Table 1. Preparation of calibration solutions

Концентрация	Объем 0.2 н KMnO_4 , мл	Объем H_2O , мл
0.005 М	0.25	9.75
0.01 М	0.5	9.5
0.015М	0.75	9.25
0.02 М	1.0	9.0

Калибровочные растворы разбавляют аналогично исследуемым образцам: 0.5 мл раствора вносят в пробирки или колбы и добавляют 49.5 мл бидистиллированной воды.

Для повышения качества определения и исключения аналитических ошибок, связанных с приготовлением стандартных растворов, для лаборатории следует подготовить один–два стандартных образца почвы, которые будут храниться для проверки воспроизводимости результатов и оценки годности раствора окислителя.

Для анализа исследуемых образцов в центрифужные пробирки объемом 50 мл необходимо взять навеску 2.50 г воздушно-сухой почвы, добавить 18 мл дистиллированной воды, затем 2.0 мл исходного 0.2 н. раствора KMnO_4 . Далее, плотно закрыв крышку, в течение 2 мин. интенсивно перемешивать полученную суспензию вручную или на ротаторе. По истечении 2 мин. пробирки необходимо встряхнуть для исключения оседания почвы на крышке и в верхней части и поставить на 10 мин. в темное место для отстаивания. В рамках данного метода время экспозиции является одним из важнейших факторов, определяющих качество аналитических данных, поэтому следует его четко выдерживать, ограничивая количество образцов в одной партии до 7 шт., так как реакция окисления будет протекать в течение всего времени контакта почвы с KMnO_4 . По истечении 10 мин. отобрать 0.5 мл надосадочного раствора в колбу на 50 мл и добавить 49.5 мл дистиллированной воды. Затем измерить оптическую плотность (D) полученных растворов при длине волны 550 нм.

Количество окисленного углерода соответствует количеству восстановленного перманганата и, следовательно, чем меньше интенсивность окраски раствора, тем большее количество фракции РОХС содержится в пробе.

Для расчета содержания фракции РОХС необходимо использовать уравнение (1) (Weil, 2003):

$$\text{РОХС (мг/кг)} = [0.02 - (a + b * D)] * (9\ 000) * (0.02 \text{L} / \text{Wt}), \quad (1)$$

где: 0.02 – концентрация р-ра перманганата калия, контактирующего с пробой почвы, моль/л;

a – пересечение градуировочной кривой с осью ординат;

b – наклон (угловой коэффициент) градуировочной кривой;
 D – оптическая плотность при 550 нм;
9 000 – количество миллиграммов углерода, окисляемого 1 моль KMnO_4 при переходе Mn^{+7} в Mn^{+4} ;
0.02L – объем раствора перманганата, контактировавшего с почвой;
Wt – навеска почвы в кг.

Нами при проведении анализа на 5-ый день после приготовления исходного раствора было установлено, что его рН снизился до 6.89 ед. При определении содержания РОХС в образцах, которые были проанализированы ранее (в первый день после приготовления раствора), существенных отличий при измерениях зафиксировано не было. рН исходного раствора окислителя продолжал снижаться в течение 20 дней, после чего на уровне 6.62 ед. стабилизировался. При повторном измерении содержания РОХС, в образцах, анализ которых был произведен в первый день после приготовления раствора, установлено, что уровень рН не оказывал существенного влияния на итоговые числовые значений РОХС. Каждое измерение произведено в трехкратной повторности для каждого уровня рН для исключения и минимизации случайных ошибок. Для значений РОХС, полученных при каждом уровне рН исходного раствора, построены доверительные интервалы при уровне $p = 0.05$. Расчет доверительных интервалов производили в соответствии с формулой:

$$(\text{ДИ}) = X \pm Z (S \div \sqrt{n}), \quad (2)$$

где: X – среднее значение РОХС для выборки;
 Z – значение коэффициента Стьюдента (1.96);
 S – величина среднеквадратического отклонения;
 n – число наблюдений.

В таблице 2 представлены результаты измерения содержания РОХС при различном значении рН исходного раствора окислителя, показатели СКО, а также рассчитанные доверительные интервалы для измеренных значений РОХС:

Только для 2 значений из 45 показатель РОХС выходит за рамки рассчитанного доверительного интервала (выделены в таб-

лице). В соответствии с этим корректировка рН раствора до величины 7.2 ед. рН, согласно протоколу (Weil, 2003), с высокой долей вероятности не оказывает существенного влияния на результаты измерений.

Таблица 2. Содержание РОХС в зависимости от рН исходного раствора
Table 2. POXC content as a function of pH of the initial solution

№ пробы	РОХС средн. рН р-ра 7.20 ед.	РОХС средн. рН р-ра 6.90 ед.	РОХС средн. рН р-ра 6.68 ед.	Показатель СКО	Доверительный интервал при $p = 0.05$
1	848	835	868	27	831–868
2	716	701	731	27	698–734
3	848	859	842	16	839–860
4	423	396	409	21	396–423
5	783	765	749	29	747–785
6	408	365	389	30	367–407
7	753	720	742	29	719–757
8	681	692	671	31	661–702
9	433	400	412	25	399–431
10	753	735	746	16	734–755
11	459	482	472	29	457–495
12	349	342	347	24	330–362
13	402	421	392	32	384–426
14	450	465	447	29	435–473
15	798	779	756	25	761–794

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оксидиметрические фракции. С использованием методов перманганатного и бихроматного окисления оценивались пулы оксидиметрических фракций почвенного органического вещества (ПОВ). К фракции РОХС в данном случае следует отнести наиболее “активную” часть ПОВ, легкоокисляемую и потенциально-минерализуемую (Culman, 2012). Бихромат-окисляемая фракция показывает долю почвенного органического углерода входящую в состав как активных, так и медленных и стабильных пулов (Тулина, Семенов, 2015). Результаты определений представлены в виде коробчатых диаграмм на рисунке 3. Содержание фракции РОХС на исследуемых участках варьировало в диапазоне 126–1 006 мг/кг, при этом максимальные значения содержания углерода данной фракции, в среднем 925 мг/кг, отмечались в пробах гумусовых горизонтов необрабатываемых черноземов. Минимальным же содержанием углерода фракции РОХС характеризовались пробы горизонтов АВ (в среднем глубина отбора от 35 см и ниже) почв пахотных плакорных и пахотных слабо и среднеэрозионных агроэкологических групп (Кирюшин, 2005), в среднем 218 и 137 мг/кг соответственно. Стоит отметить, что для агроландшафтов максимальное содержание углерода фракции РОХС детектировалось на слабогидроморфных участках в пахотных горизонтах луговато-черноземных почв – в среднем 724 мг/кг. Оценивая плакорную и слабоэрозионную агроэкологические группы стоит отметить, что содержание фракции РОХС в пахотном горизонте черноземов обыкновенных, подверженных процессам водной эрозии, было выше фактически на 14–20% по всем наблюдаемым значениям. Напротив, содержание фракции бихромат-окисляемого углерода было в среднем на 17% ниже на участках, почвенный покров которых был представлен слабо- и среднесмытыми аналогами обыкновенных черноземов. Среднее содержание фракции для горизонтов А и А_{пах} снижалось в ряду: чернозем обыкновенный – естественный луг (в среднем 3.2%), луговато-черноземная – пашня (в среднем 2.6%), чернозем обыкновенный пашня (в среднем 2.6%), чернозем обыкновенный смытый – пашня (в среднем 2.2%). Для горизонтов АВ и АВ_{Ca} было характерно идентичное

распределение с учетом меньшего количественного содержания углерода данной фракции. Содержание углерода РОХС и бихромат-окисляемой фракции представлено на рисунке 3 в виде коробчатых диаграмм.

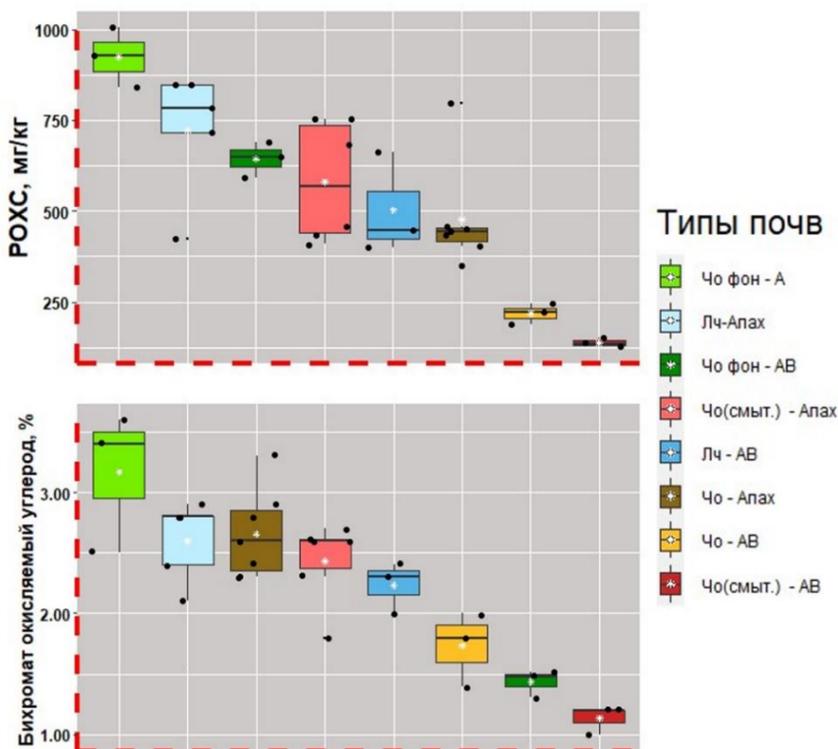


Рис. 3. Содержание фракции РОХС и бихромат-окисляемой фракции, определяемой методом Тюринга в разных типах почв.

Fig. 3. Content of POXC fraction and bichromate-oxidizable fraction determined by the Tyurin method in different soil types.

Гранулоденситометрические и водозэкстрагируемые фракции. В результате проведения гранулоденситометрического фракционирования были выделены фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, при этом участки, входящие в состав пашни, и необрабатываемые участки

существенно различались по массовому содержанию данной фракции. На рисунке 4 представлен ранжированный ряд коробчатых диаграмм. Анализируя полученные данные, следует отметить, что по массовому отношению данной фракции к объему почв следует выделить три кластера:

1. черноземы под естественной степной растительностью;
2. черноземы плакорной и луговато-черноземные слабополу- гидроморфной агроэкологических групп;
3. Черноземы эрозионной агроэкологической группы.

При этом идентичная тенденция характерна как для горизонтов А и А_{пах}, так и для горизонтов АВ и АВ_{Са}.

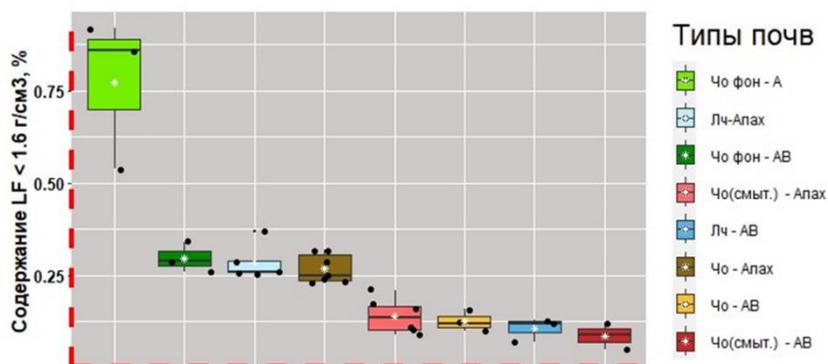


Рис. 4. Содержание легкой гранулоденситометрической фракции в разных типах почв.

Fig. 4. Content of light fraction in different soil types.

При оценке фракции водозэкстрагируемого углерода (НВС) все почвы, функционирующие в условиях агроландшафтов, попадали в единый кластер по количественному содержанию, существенно отличаясь лишь от группы черноземов обыкновенных под естественной степной растительностью. При проведении анализа в трехкратной повторности содержание углерода данной фракции так же характеризовалось высоким коэффициентом вариации даже в рамках одного и того же образца (выше 30%). С нашей точки

зрения, пул растворимого органического углерода, определяемый при термической экстракции дистиллированной водой при $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ghani, 2007), возможно с высокой точностью детектировать только при наличии в лаборатории анализатора общего углерода с возможностью определения C-total в жидкой фазе, а метод определения, используемый в данной работе, по окислению выпаренной аликвоты водной вытяжки не является точным.

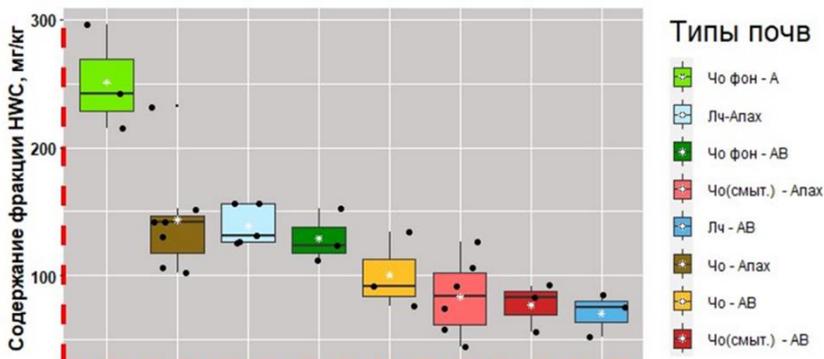


Рис. 5. Содержание фракции НВС в разных типах почв.
Fig. 5. HWC fraction content in different type soils.

Оценка линейных зависимостей между различными фракциями показала, что фракция РОХС имеет существенные взаимосвязи с такими показателями, как: содержание фракции $\text{LF} < 1.6\text{ г/см}^3$, содержание бихромат-окисляемой фракции, содержанием общего азота и плотностью почвы при $n = 33$ и величинами $r^2 = 0.45; 0.47; 0.42$ и 0.50 и уровне значимости $p = 0.05$ соответственно. В свою очередь бихромат-окисляемый углерод в линейной модели сильнее связан с показателем плотности почвы при $n = 33$, величина r^2 составила 0.88 , что согласуется с работами ряда авторов (Fine, 2017; Kuzyakov, 2020). Также следует отметить, что фракция РОХС, в отличие от бихроматной фракции, характеризуется большей изменчивостью между агроэкологическими группами при среднем содержании: на слабогидроморфной группе –

724 мг/кг, слабоэрозионной – 580 мг/кг, плакорной – 476 мг/кг, для пахотного горизонта, и 925 мг/кг – для плакорной группы горизонта А участка, не входящего в состав пашни. Содержание РОХС является более чувствительным к изменению экзогенных факторов, таких как гидроморфизм, проявление процессов эрозии, тип землепользования. Идентичная тенденция накопления на необрабатываемых участках характерна и для гранулоденситометрической фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. При этом фракцию $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в ряде работ было предложено использовать как маркер качества почв в агроландшафтах для оценки степени выпаханности (Борисов, 2022; Шпедт, 2015).

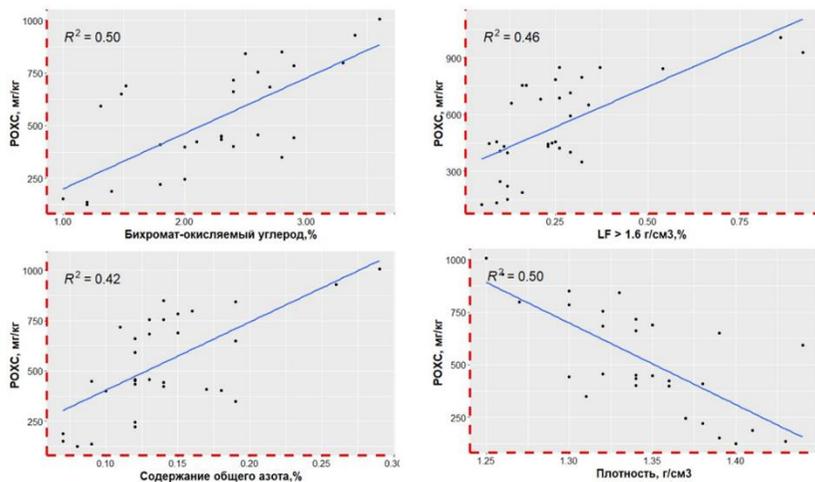


Рис. 6. Линейные зависимости между РОХС и другими маркерами качества почв агроландшафтов.

Fig. 6. Linear relationships between POXC and other agrolandscape soil quality markers.

Данные, представленные на рисунке 6, согласуются с выводами ряда авторов, среди которых стоит отметить работу (Culman, 2012), в которой при обработке агрегированных данных нескольких групп исследований установлено, что фракция РОХС значимо

связана со многими пулами ПОВ, а также является индикатором качества при оценке различных систем обработки почвы и систем минерального питания. В работе (Fine, 2017) при проведении многомерного анализа и построения оценочных функций, также было отмечено, что фракция РОХС является одним из лучших предикторов в модели оценки свойств почв “Comprehensive Assessment of Soil Health” (CASH).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования было установлено, что РОХС чувствителен к сокращению фракции бихромат-окисляемого углерода, определяемого методом Тюрина, а также к содержанию легкой фракции ($LF < 1.6 \text{ г/см}^3$). В условиях Северо-Предкавказской провинции на почвах черноземного типа данная фракция также может являться маркером агроэкологических условий. На почвах плакорной, слабоэрозионной и слабогидроморфной групп были отмечены закономерные тенденции к повышению или снижению содержания РОХС в горизонтах $A_{\text{пах}}$ и АВ, выраженные в большей степени, чем различия по содержанию бихроматного углерода. Фракция чувствительна к типу землепользования: содержание РОХС на землях, вовлеченных в пашню, в среднем на 20–50% ниже, чем на участках, не входящих в состав агроландшафтов. Содержание РОХС было связано с долей легкой фракции. В линейной модели при $n = 33$ величина r^2 соответствовала 0.46. Исходя из этого, можно утверждать, что использование такого простого в исполнении и относительно недорогого метода, как определение РОХС, в качестве альтернативы выделения фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ при проведении агрохимической оценки состояния почв может позволить уточнить оценки и снизить трудоемкость выполнения работ.

Также в рамках данной работы было установлено, что выделение одозкстрагируемого углерода (НWC) с последующим его определением по методике, предложенной в работе (Ghani, 2007), невозможно производить с фотометрическим окончанием при окислении выпаренной аликвоты водной вытяжки, т. к. воспроизводимость в таком подходе достаточно низкая.

При проведении анализа и определения РОХС в соответ-

ствии с протоколом (Weil, 2003) было установлено, что показатель рН исходного раствора снижался в период первых 14 дней после его приготовления. Было установлено, что при проведении измерений с использованием раствора с рН в диапазоне 6.6–7.2 существенных изменений концентрации РОХС не происходит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С., Данченко Н.Н., Зазовская Э.П. и др.* Изотопный состав углерода и химическая структура органического вещества типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2021. № 6. С. 686–700. DOI: [10.31857/S0032180X21060034](https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034).
2. *Борисов Б.А., Ефимов О.Е., Наумов В.Д., Прохоров А.А.* Органическое вещество и агрегатное состояние чернозема выщелоченного и его полугидроморфного аналога // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 2. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_236.pdf. DOI: [10.51419/202122236](https://doi.org/10.51419/202122236).
3. *Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемяева З.С., Козут Б.М.* Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1480. DOI: [10.31857/S0032180X21120169](https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169).
4. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. С. 86–98.
5. *Кирюшин В.И., Иванов А.Л. и др.* Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Методическое руководство МСХ РФ, РАСХН. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2005. 784 с.
6. *Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М.* Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 79–127. DOI: [10.19047/0136-1694-2024-118-79-127](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127).
7. *Прохоров А.А.* Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 6. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/6/st_604.pdf. DOI: [10.51419/202126604](https://doi.org/10.51419/202126604).
8. *Прохоров А.А., Борисов Б.А., Ефимов О.Е.* Индексная оценки степени выпашанности черноземов предкавказской провинции // Агрехимический

вестник. 2023. № 5. С. 50–55. DOI: [10.24412/1029-2551-2023-5-009](https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-5-009).

9. Смагин А.В. Структурно-функциональная организация почв как динамических биокосных систем: Автореф. дис. ... д. б. н. 03.02.13. М., 2004. 44 с.

10. Тулина А.С., Семенов В.М. Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению температуры и влажности // Почвоведение. 2015. № 8. С. 952–962. DOI: [10.7868/S0032180X15080109](https://doi.org/10.7868/S0032180X15080109).

11. Фоминых Л.А., Золотарева Б.Н., Холодов А.Л., Шишова Л.Т. Фракционно-групповой состав гумуса почв тундровой зоны Евразии // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 44–54.

12. Холодов В.А., Константинов А.И., Кудрявцев А.В., Перминова И.В. Строение гуминовых кислот почв зонального ряда по данным спектроскопии ЯМР 13 // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1064–1073.

13. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Данченко Н.Н., Ильин Б.С. Лазарев В.И. Водозэкстрагируемый и микробный углерод черноземов разного вида использования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. 112. С. 122–133. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-112-122-133](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133).

14. Шпедт А.А., Вергейчик П.В., Картавых В.В. Оценка легкоразлагаемого органического вещества почв сельскохозяйственных угодий Красноярского края // Агрохимия. 2015. № 12. С. 36–43.

15. Borisov B.A., Efimov O.E., Eliseeva O.V. et al. Organic matter of sod-podzolic soil after transition to a fallow state // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 022022. DOI: [10.1088/1755-1315/1010/1/012108](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012108).

16. Culman S., Freeman M., Snapp S. Procedure for determination of permanganate oxidizable carbon. Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, 2012. MI 49060. URL: <http://lter.kbs.msu.edu/protocols/133>.

17. Culman S. et al. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management // Soil Science Society of America Journal. 2012. Vol. 76. P. 494–504. DOI: [10.2136/sssaj2011.0286](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286).

18. den Boef G., Polak H.L. Oxidimetric determination of organic compounds by means of strong oxidising agents // Talanta. 1962. Vol. 9. Iss. 3. P. 271–284. DOI: [10.1016/0039-9140\(62\)80061-7](https://doi.org/10.1016/0039-9140(62)80061-7).

19. Fine A.K., van Es H., Schindlbeck R. Statistics, Scoring Functions, and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database // Soil Science Society of America Journal. 2017. Vol. 81. DOI: [10.2136/sssaj2016.09.0286](https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286).

20. Ghani A., Dexter M., Perrott K.W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and

- cultivation // *Soil Biology & Biochemistry*. 2003. Vol. 35. P. 1231–1243. DOI: [10.1016/S0038-0717\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00186-X).
21. *Hartemink A.E., Gerzabek M.H., Lal R., Mc. Sweeney K.* “Soil Carbon Research Priorities”. New York, Dordrecht London: Springer Cham Heidelberg, 2014. DOI: [10.1007/978-3-319-04084-4_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_48).
22. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
23. *John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa, H.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma*. 2005. Vol. 128. P. 63–79. DOI: [10.1016/j.geoderma.2004.12.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013).
24. *Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K., Tian J., Luo Y., Xu X., Yudina A., Aponte H., Alharbi H., Ovsepyan L., Kurganova L., Ge T., Guillaume T.* New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2020. Vol. 7(3). P. 282–288. DOI: [10.15302/J-FASE-2020338](https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338).
25. *Lal R.* Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security // *Science*. 2004. Vol. 304. P. 1623–7. DOI: [10.1126/science.1097396](https://doi.org/10.1126/science.1097396).
26. *Weil R., Kandikar R., Melissa A., Gruver J.B., Susan E.* Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use // *American Journal of Alternative Agriculture*. 2003. Vol. 18. P. 3–17. DOI: [10.1079/AJAA200228](https://doi.org/10.1079/AJAA200228).

REFERENCES

1. Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Zazovskaya E.P. et al., Izotopnyi sostav ugleroda i khimicheskaya struktura organicheskogo veshchestva tipichnogo chernozema v usloviyakh kontrastnogo zemlepol'zovaniya (Carbon isotope composition and chemical structure of organic matter of typical chernozem under contrasting land use), *Pochvovedenie*, 2021, No. 6, pp. 686–700, DOI: [10.31857/S0032180X21060034](https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034).
2. Borisov B.A., Efimov O.E., Naumov V.D., Prokhorov A.A., Organicheskoe veshchestvo i agregatnoe sostoyanie chernozema vyshchelochennogo i ego polugidromorfnoogo analoga [Elektron. resurs] (Organic matter and aggregate state of leached chernozem and its semihydromorphic analogue), *AgroEkoInfo: Elektronnyi nauchno-proizvodstvennyi zhurnal*, 2022, No. 2, DOI: [10.51419/202122236](https://doi.org/10.51419/202122236).

3. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artem'eva Z.S., Kogut B.M., Guminovye veshchestva – gipotezy i real'nost' (obzor) (Humic substances – hypotheses and reality (review)), *Pochvovedenie*, 2021, No. 12, pp. 1449–1480, DOI: [10.31857/S0032180X21120169](https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169).
4. Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR (Classification and diagnosis of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, pp. 86–98.
5. Kiryushin V.I., Ivanov A.L. et al., Agroekologicheskaya otsenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologii (Agroecological evaluation of land, design of adaptive landscape farming systems and agro-technologies), Metodicheskoe rukovodstvo MSKhRF, RASKhN, Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2005, 784 p.
6. Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udal'tsov S.N., Semenov V.M., Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 79–127, DOI: [10.19047/0136-1694-2024-118-79-127](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127).
7. Prokhorov A.A., Kharakteristika metodov vydeleniya fraktsii pochvennogo organicheskogo veshchestva i ikh ispol'zovanie dlya otsenki gumusovogo sostoyaniya pochv (Characteristics of methods of isolation of soil organic matter fractions and their use to assess the humus state of soils), *AgroEkoInfo: Elektronnyi nauchno-proizvodstvennyi zhurnal*, 2022, No. 6, DOI: [10.51419/202126604](https://doi.org/10.51419/202126604).
8. Prokhorov A.A., Borisov B.A., Efimov O.E., Indeksnyaya otsenki stepeni vypakhannosti chernozemov predkavkazskoi provintsii (Index estimation of the degree of ploughing of chernozems of the pre-Caucasian province), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2023, No. 5, pp. 50–55, DOI: [10.24412/1029-2551-2023-5-009](https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-5-009).
9. Smagin A.V., Strukturno-funktsional'naya organizatsiya pochv kak dinamicheskikh biokosnykh system: Diss. ... dokt. biol. nauk (Structural and functional organization of soils as dynamic biocosmic systems, Dr. Biol. Sci. theses), Moscow, 2004. 44 p.
10. Tulina A.S., Semenov V.M., Otsenka chuvstvitel'nosti mineralizuemogo pula pochvennogo organicheskogo veshchestva k izmeneniyu temperatury i vlazhnosti (Assessment of the sensitivity of the mineralizable pool of soil organic matter to changes in temperature and humidity), *Pochvovedenie*, 2015, No. 8, pp. 952–962, DOI: [10.7868/S0032180X15080109](https://doi.org/10.7868/S0032180X15080109).
11. Fominykh L.A., Zolotareva B.N., Kholodov A.L., Shirshova L.T., Fraktsionno-grupповoi sostav gumusa pochv tundrovoy zony Evrazii (Fractional and group composition of humus in soils of the Eurasian tundra zone), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 2, pp. 44–54.

12. Kholodov V.A., Konstantinov A.I., Kudryavtsev A.V., Perminova I.V., Stroenie guminovykh kislot pochv zonal'nogo ryada po dannym spektroskopii YaMR13 (Structure of humic acids of zonal soils by NMR13 spectroscopy), *Pochvovedenie*, 2011, No. 9, pp. 1064–1073.
13. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Danchenko N.N., Ilyin B.S., Lazarev V.I., Dissolved organic matter and microbial carbon of Protocalcic Chernozems of different land management, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 112, pp. 122–133, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-112-122-133](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133).
14. Shpedt A.A., Vergeichik P.V., Kartavykh V.V., Otsenka legkorazлагаемого органического вешchestva почв sel'skokhozyaistvennykh ugodii Krasnoyarskogo kraia (Assessment of easily degradable organic matter of soils of agricultural lands in Krasnoyarsk Krai), *Agrokhimiya*, 2015, No. 12, pp. 36–43.
15. Borisov B.A., Efimov O.E., Eliseeva O.V. et al., Organic matter of sod-podzolic soil after transition to a fallow state, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, DOI: [10.1088/1755-1315/1010/1/012108](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012108).
16. Culman S., Freeman M., Snapp S., *Procedure for determination of permanganate oxidizable carbon*, Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, MI 49060. URL: <http://lter.kbs.msu.edu/protocols/133>.
17. Culman S. et al., Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management, *Soil Science Society of America Journal*, 2012, Vol. 76, pp. 494–504, DOI: [10.2136/sssaj2011.0286](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286).
18. den Boef G., Polak H.L., Oxidimetric determination of organic compounds by means of strong oxidising agents, *Talanta*, 1962, Vol. 9, Iss. 3, pp. 271–284, DOI: [10.1016/0039-9140\(62\)80061-7](https://doi.org/10.1016/0039-9140(62)80061-7).
19. Fine A.K., van Es H., Schindelbeck R., Statistics Scoring Functions and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database, *Soil Science Society of America Journal*, 2017, Vol. 81, DOI: [10.2136/sssaj2016.09.0286](https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286).
20. Ghani A., Dexter M., Perrott K.W., Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, Vol. 35, pp. 1231–1243, DOI: [10.1016/S0038-0717\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00186-X).
21. Hartemink A.E., Gerzabek M.H., Lal R., Mc. Sweeney K., “*Soil Carbon Research Priorities*”, New York, Dordrecht London: Springer Cham Heidelberg, 2014, DOI: [10.1007/978-3-319-04084-4_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_48).
22. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, No. 106, FAO, Rome

23. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa, H., Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use, *Geoderma*, 2005, Vol. 128, pp. 63–79, DOI: [10.1016/j.geoderma.2004.12.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013).
24. Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K., Tian J., Luo Y., Xu X., Yudina A., Aponte H., Alharbi H., Ovsepyan L., Kurganova L., Ge T., Guillaume T., New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation, *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, Vol. 7(3), pp. 282–288, DOI: [10.15302/J-FASE-2020338](https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338).
25. Lal R., Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, *Science*, 2004, Vol. 304, pp. 1623–1627, DOI: [10.1126/science.1097396](https://doi.org/10.1126/science.1097396).
26. Weil R., Kandikar R., Melissa A., Gruver J.B., Susan E., Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use, *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, Vol. 18, pp. 3–17, DOI: [10.1079/AJAA200228](https://doi.org/10.1079/AJAA200228).

УДК 631.42

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-70-85



Ссылки для цитирования:

Хутуев А.М., Занилов А.Х., Тутукова Д.А., Савин И.Ю. NDVI посевов как дистанционный индикатор качества пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 70-85. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-70-85

Cite this article as:

Khutuev A.M., Zanirov A.Kh., Tutukova D.A., Savin I.Yu., NDVI of crops as a remote indicator of arable soils quality, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 70-85, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-70-85

NDVI посевов как дистанционный индикатор качества пахотных почв

© 2024 г. А. М. Хутуев^{1*}, А. Х. Занилов^{1**},
Д. А. Тутукова^{1***}, И. Ю. Савин^{2****}

¹Институт сельского хозяйства КБНЦ РАН, Россия, КБР,
360004, Нальчик, ул. Курава, 224,

* <https://orcid.org/0000-0002-1215-8230>, e-mail: khutuev.a.m@mail.ru,

** <https://orcid.org/0000-0003-1737-5303>, e-mail: amiran78@inbox.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0002-9682-9117>, e-mail: djudi_12@mail.ru.

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

**** <https://orcid.org/0009-0009-4906-0470>, e-mail: savigory@gmail.com.

Поступила в редакцию 17.05.2024, после доработки 28.05.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Качество пахотных почв во многом предопределяет урожайность сельскохозяйственных культур и экономическую эффективность их возделывания. Целью настоящей работы является анализ связи внутриполевых неоднородностей посевов с вертикальной неоднородностью скелетности почв на примере тестового поля с посевами кукурузы в Кабардино-Балкарии. В качестве индикатора состояния посевов использовался вегетационный индекс NDVI, рассчитанный по данным спутниковой съемки Sentinel-2. Скелетность почвы определялась методом сухого просеивания. Установлено, что значение индекса NDVI посевов на тестовом поле может служить основой для косвенного детектирования вертикальной неоднородности

агрономически важных свойств почв. Для получения надежной информации необходим точный выбор времени получения значений NDVI и культуры, возделываемой на поле. Индикационная способность разных культур предопределяется их фенологией и мощностью потенциального корнеобитаемого слоя. География агрономически важных свойств почв на тестовом поле не коррелирует с выделами традиционно составленной почвенной карты. Пространственное варьирование урожайности кукурузы на тестовом поле (размах 23%) коррелирует с варьированием по профилю скелетности почв. Для использования значений NDVI в качестве индикатора пространственного варьирования агрономически важных свойств почв необходим учет типа возделываемой культуры, тщательный выбор даты получения NDVI, а также наличие априорных экспертных знаний о лимитирующих почвенных факторах на поле, специфики фенологии и агротехнологии возделывания культуры.

Ключевые слова: косвенное дешифрирование почв; Sentinel-2; свойства почв; скелетность почв; пространственные неоднородности посевов.

NDVI of crops as a remote indicator of arable soils quality

© 2024 A. M. Khutuev^{1*}, A. Kh. Zanirov^{1**},
D. A. Tutukova^{1***}, I. Yu. Savin^{2****}

¹*Institute of Agriculture KBSC RAS,
224 Kirava Str., Nalchik 360004, Kabardino-Balkaria, Russian Federation,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-1215-8230>, e-mail: khutuev.a.m@mail.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-1737-5303>, e-mail: amiran78@inbox.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-9682-9117>, e-mail: djudi_12@mail.ru.

²*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",*

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

^{****}<https://orcid.org/0009-0009-4906-0470>, e-mail: savigory@gmail.com.

Received 17.05.2024, Revised 28.05.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The quality of arable soils largely determines the productivity of agricultural crops and the economic efficiency of their cultivation. The purpose of this work is to analyze the relationship between intra-field heterogeneity of crops and vertical heterogeneity of soil skeletalities based on a test corn field in Kabardino-Balkaria. The NDVI vegetation index, calculated from Sentinel-2 satellite imagery, was used as an indicator of crop condition. Soil skeletalities were determined by dry sieving. It has been established that the

value of the NDVI index of crops on a test field can serve as the basis for indirect detection of vertical heterogeneity of agronomically important soil properties. To obtain reliable information, accurate timing of obtaining NDVI values and the crop cultivated in the field is necessary. The indicator reliability of different crops is determined by their phenology and the thickness of the potential root layer. The geography of agronomically important soil properties on the test field does not correlate with the areas of the traditionally compiled soil map. Spatial variation in corn yield on the test field (range 23%) correlates with variation in the soil skeletal profile. To use NDVI values as an indicator of spatial variation in agronomically important soil properties, it is necessary to take into account the type of crop cultivated, careful selection of the date for obtaining NDVI, as well as the availability of a priori expert knowledge about the limiting soil factors in the field, the specific phenology and agrotechnology of crop cultivation.

Keywords: indirect soil interpretation; Sentinel-2; soil properties; soil skeletalality; spatial heterogeneity of crops.

ВВЕДЕНИЕ

Качество пахотных почв во многом предопределяет урожайность сельскохозяйственных культур и экономическую эффективность их возделывания. Количество затрат (трудовых, финансовых, времени) на производство одного и того же урожая на почвах хорошего и плохого качества в одних и тех же климатических условиях может различаться в разы. Именно поэтому основополагающими работами почвоведения как науки явились труды конца XIX в. по оценке качества почв Нижегородской губернии, проводимой под руководством основателя почвоведения В.В. Докучаева (Материалы..., 1886).

С тех пор методические подходы к оценке качества пахотных почв были существенно усовершенствованы, но традиционно в России в их основе лежат разнообразные вариации метода бонитировки почв (Востокова и др., 2010). Во многих западных странах в основе оценки качества почв лежат подходы, разработанные в конце 70-х годов прошлого века экспертами ФАО (A Framework..., 1976). Неоднократно делались попытки использования для оценки качества почв методов компьютерного моделирования (Brown et al., 2023). Все эти методы в конечном итоге опираются на информацию традиционно составленных почвенных и

агрохимических карт, создание которых очень трудоемко и затратно (Савин, 2020). В последние десятилетия с целью сокращения объема полевых работ и повышения точности карт разрабатываются методы картографирования почв на основе данных дистанционного зондирования. Наиболее обнадеживающие результаты удается получить на основе анализа изображения открытой поверхности почв на мультиспектральных или гиперспектральных спутниковых данных, или данных, получаемых с БПЛА (Прудникова и др., 2023). Но большая часть этих подходов позволяет получить информацию о свойствах лишь поверхностного горизонта почв, и только о некоторых свойствах (Савин и др., 2019).

Известно, что агрономически значимыми являются не только свойства пахотного горизонта почв, но также и свойства подпахотных горизонтов. Особенно важное значение свойства подпахотных горизонтов имеют для плодовых культур и для однолетних культур с глубоко проникающей корневой системой. Картографирование таких свойств дистанционными методами пока невозможно технически. В перспективе эти задачи могут быть решены с развитием и совершенствованием методов георадарного профилирования (Voronin, Savin, 2018; Zajícová, Chuman, 2019). В качестве альтернативного метода развиваются подходы, основанные на косвенной индикации агрономически важных подповерхностных свойств почв с использованием методов дистанционной оценки состояния посевов на основе вегетационных индексов. Но исследований в данном направлении до сих пор немного (Савин и др., 2022), несмотря на их большую практическую значимость.

Целью настоящей работы является анализ связи внутриполевых неоднородностей посевов с вертикальной неоднородностью щебнистости и каменистости почв на примете тестового поля с посевами кукурузы в Кабардино-Балкарии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования был выбран участок опытного поля института сельского хозяйства Кабардино-Балкарского научного центра РАН (Россия, Терский район Кабардино-Балкарской республики (КБР), с. Опытное) площадью 8 га (рис. 1).

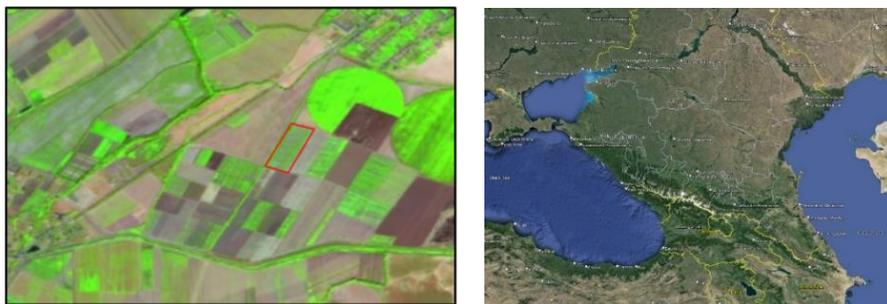


Рис. 1. Расположение тестового поля (отмечено на рисунке красным контуром).

Fig. 1. The location of the text field (marked with a red outline in the figure).

Рельеф поля однородный и ровный, оно расположено на вершине плоского водораздела. В полевой сезон 2023 г. на поле возделывалась кукуруза на зерно (гибрид Кабардинская 3812). Посев культуры проводился 5 мая, уборка урожая – 10 сентября. В предыдущий год на поле выращивалась озимая пшеница. В течение вегетации растения на поле не были поражены болезнями и вредителями.

Анализ внутриполевых неоднородностей посевов проводился на основе вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по спутниковым данным Sentinel-2. Использовались все доступные безоблачные сцены за 2022 и 2023 гг.

Расчет индекса проводился стандартным методом по формуле (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1)$$

где ρ_{RED} и ρ_{NIR} – коэффициенты спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной областях спектра соответственно.

Для анализа спутниковых данных использовался пакет прикладных программ ГИС ILWIS v.3.3, а также цифровая платформа OneSoil (<https://onesoil.ai/ru/>).

В 2023 г. был проведен учет урожая кукурузы прямым комбинированием с площади двух участков поля, выделенных по состоянию посевов (с хорошим и плохим состоянием) (рис. 2).

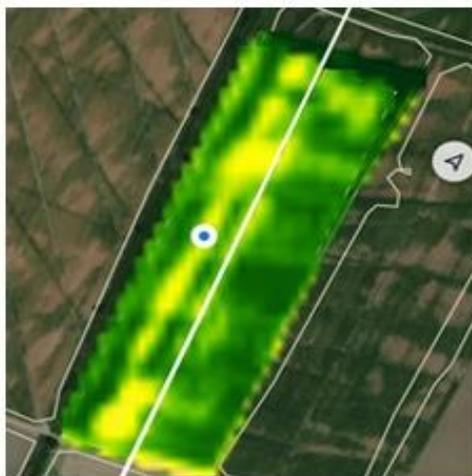


Рис. 2. Разбиение тестового поля на два участка для учета урожайности (белая линия).

Fig. 2. The test field division into two plots for yield records (white line).

В этом же году были отобраны образцы из разных слоев почв (0–20 см, 20–40 см, 40–60 см) для анализа вертикальной неоднородности щебнистости и каменистости. Было проанализировано два представительных разреза, места заложения которых были определены с учетом наблюдаемой пространственной неоднородности посевов кукурузы. Методом сухого просеивания были выделены фракции гравия (1–3 мм) и камней (крупнее 3 мм) с разбиением на несколько классов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлены карты NDVI, построенные для разных дат в 2023 г. Из рисунка следует, что степень пространственной неоднородности состояния посевов на поле значительно менялась во времени. На дату 8 июня посевы в начальной стадии развития были достаточно однородны. Однородность сохранялась и 13 июля уже при хорошо сомкнутом покрове посевов. На поле четко выделяются лишь технологические колеи с низкими значениями NDVI.

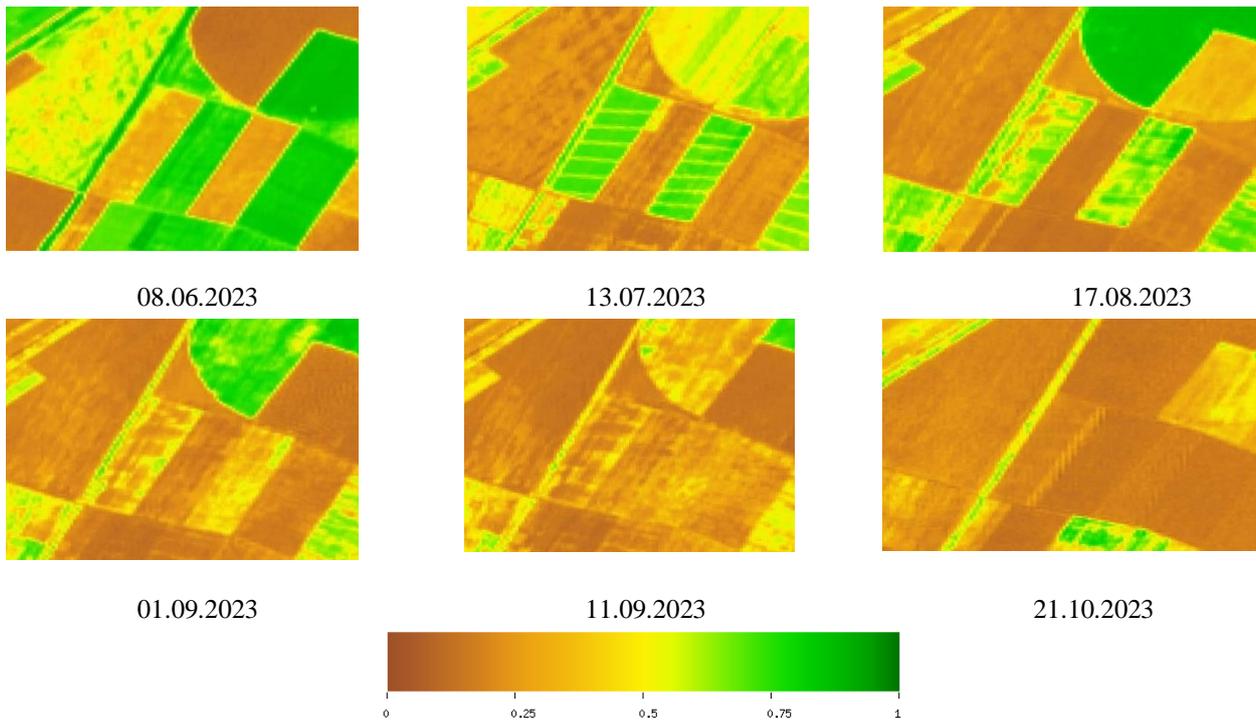


Рис. 3. Значения NDVI за указанные даты (тестовое поле отмечено красным контуром).
Fig. 3. NDVI values for the specified dates (the text field is marked with a red outline).

В день 17 августа степень неоднородности посевов достигает максимума. На части поля растения уже пожелтели, что хорошо читается по более низким значениям NDVI. Далее по ходу сезона вегетации пожелтение растений продолжается, и неоднородности посевов становятся менее выраженными.

К 17 августа при среднем значении NDVI на поле 0.57 отдельные его участки (на западной половине поля) демонстрировали уменьшение значения вегетационного индекса на 15.3% по сравнению с его восточной половиной (0.60).

На рисунке 4 представлен временной ход значений NDVI, осредненных для западной и восточной частей поля.

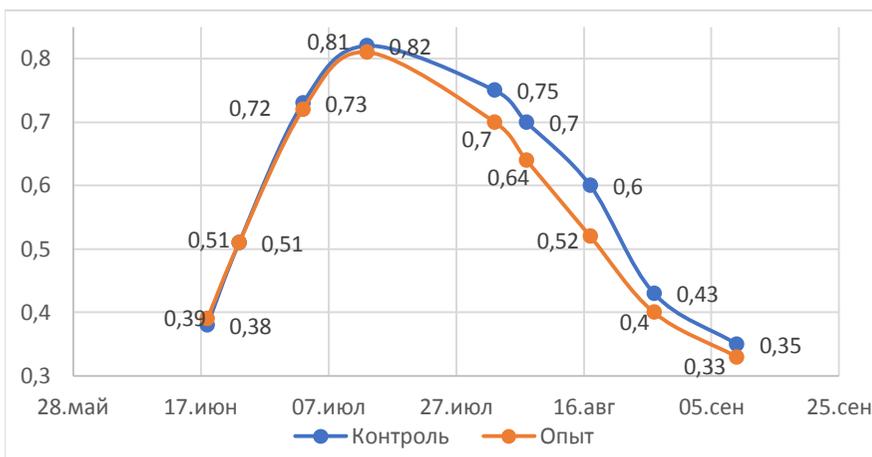


Рис. 4. Временной ход NDVI, осредненного для западной (опыт) и восточной (контроль) частей поля.

Fig. 4. The time course of the NDVI averaged for the western (experimental) and eastern (control) parts of the field.

Из рисунка 4 следует, что заметное падение NDVI на западной части поля началось 2 августа 2023 г. Разрыв в индексе вегетации возрастает во временных отрезках 02.08.23; 07.08.23 и 17.08.23 на 7.1%; 9.4; 15.4%, соответственно. К началу фазы со-

зревания разница сокращается, что связано с естественным процессом завершения вегетации растений. Данная разница в состоянии посевов отразилась и на урожайности культуры (табл. 1).

Таблица 1. Урожайность кукурузы, ц/га
Table 1. Corn yield, kg/ha

Вариант	Площадь, га	Урожайность, ц/га	Отклонение в урожайности, %
Контроль (восточная часть поля)	4.0	56.5	
Опыт (западная часть поля)	4.0	45.9	-23.1

Из таблицы видно, что урожайность кукурузы на западной части поля оказалась на 23.1% ниже, чем на восточной половине с повышенным значением NDVI.

Согласно почвенной карте поля, на нем преобладают черноземы обыкновенные в различной степени щебнистые и каменистые. Изображение открытой поверхности почв поля на спутниковых данных (рис. 3) свидетельствует о значительной однородности их пахотного горизонта по цвету, который в основном определяется на уровне поля варьированием содержания и типа гумуса. Удобрения на все поле также вносятся однородно. Это позволяет предположить, что по уровню плодородия пахотный горизонт почв поля достаточно хорошо выровнен. Однако корневая система кукурузы проникает глубже пахотного горизонта, следовательно, можно предположить, что влияние на развитие растений оказывают свойства подпахотных слоев почвы.

В таблице 2 приведены результаты определения скелетности потенциально корнеобитаемого слоя почв поля.

Из данных таблицы 2 следует, что до глубины 40 см почвы достаточно однородны по уровню скелетности. А в слое 40–60 см проявляется значительная разница. Доля мелкозема в образце поч-

вы с низким значением NDVI составляет 56.4%, а с высоким значением – 37.7%. Относительная разница составляет 49.6%.

Таблица 2. Скелетность корнеобитаемого слоя почв
Table 2. Skeletality of the root layer of soils

Фракции, мм	Контроль (высокое значение NDVI)	Опыт (низкое значение NDVI)
Слой 0–20 см		
<1.0	24.0	21.6
1.0–2.0	9.1	6.8
2.0–3.0	7.2	6.0
3.0–5.0	9.0	9.3
5.0–7.0	5.8	6.6
7.0–10.0	4.7	7.4
>10.0	40.2	42.3
сумма	100.0	100.0
Слой 20–40 см		
<1.0	22.9	22.9
1.0–2.0	12.0	9.2
2.0–3.0	13.4	11.0
3.0–5.0	14.3	11.0
5.0–7.0	9.5	6.7
7.0–10.0	9.6	7.2
>10.0	18.3	32.0
сумма	100.0	100.0
Слой 40–60 см		
<1.0	37.7	56.4
1.0–2.0	20.4	14.2
2.0–3.0	11.7	8.5
3.0–5.0	10.3	8.0
5.0–7.0	5.9	4.2
7.0–10.0	5.8	3.8
>10.0	8.2	5.1
сумма	100.0	100.0

Скорее всего, подобная разница связана с пространственной неоднородностью почвообразующих пород. Но также можно предположить и возможность вертикального перераспределения фракций скелета в результате специфики агротехники возделывания культур.

Существенная разница в скелетности слоя почвы 40–60 см могла отразиться как на влажности почв, так и на общем развитии корневой системы растений в данном слое почв, что и привело к разному состоянию посевов в разных частях поля. Об этом свидетельствует также и то, что пространственные неоднородности посевов не проявлялись на ранних фенофазах развития растений, когда их корневая система еще не достигает глубины 40–60 см, а проявились на пике их вегетационного развития при максимальном проникновении корней в более глубокие слои почвы.

Дополнительным аргументом служит и анализ неоднородностей посевов пшеницы на данном поле в предыдущий вегетационный сезон (рис. 3). Неоднородности, которые детектируются для посевов кукурузы, для пшеницы не выявляются в течение всего сезона вегетации. Это связано с тем, что корневая система пшеницы преимущественно расположена в слое почвы 0–40 см и состояние нижележащих горизонтов на нее не оказывает столь значительного воздействия, как на кукурузу.

Как показано ранее многочисленными исследованиями, вегетационный индекс NDVI является достаточно надежным показателем состояния растительности, в том числе и сельскохозяйственной (Omiya et al., 2023). Попытки использования этого индекса для прямого детектирования свойств открытой поверхности почв практически отсутствуют. Обычно для прямого детектирования свойств почв используют специализированные спектральные индексы (Bhatt, 2020; Montero et al., 2023). Ряд работ демонстрирует возможность детектирования свойств почв косвенно, по характеру изображения растительности, который оценивается через NDVI (Кирьянова, Савин, 2013; Савин и др., 2022), но до сих пор таких работ мало. Это связано со слабой изученностью индикационной роли сельскохозяйственной растительности для детектирования свойств почв.

Результаты наших исследований показали, что значения NDVI могут быть использованы для детектирования отдельных агрономически значимых свойств почв, но при определенных условиях. Должны быть учтены такие факторы, как специфика развития сельскохозяйственных культур, особенности агротехнологии их возделывания. На основе экспертных знаний и знаний почвенных факторов, потенциально лимитирующих рост растений на конкретном поле, должно быть выбрано оптимальное время съемки, когда NDVI максимально информативен для решения задачи детектирования свойств и качества пахотных почв.

Простое сравнение друг с другом временных профилей NDVI, или анализ отдельных значений индекса без учета этих факторов, как это делается, например, в некоторых работах (Boogi et al., 2020; Singh et al., 2021), может привести к большим ошибкам и неверным выводам.

Состояние посевов может быть никак не связано с положением почв в классификации и с почвенной картой. Так, в нашем случае все тестовое поле попадает в один выдел почвенной карты, но пространственное варьирование агрономически значимых свойств почв (которые никак не связаны с классификационным положением почв) предопределяет пространственные неоднородности урожайности культуры. Это подтверждают полученные нами ранее результаты для других регионов и культур (Савин и др., 2022). Состояние посевов, а не классификационное положение почв, как это делается традиционно (Востокова и др., 2010), должно являться основным индикатором качества пахотных почв.

ВЫВОДЫ

Значение индекса NDVI посевов на тестовом поле в КБР может служить основой для косвенного детектирования вертикальной неоднородности агрономически важных свойств почв. Для получения надежной информации необходим точный выбор времени получения значений NDVI и культуры, возделываемой на поле.

Индикационная способность разных культур предопределяется их фенологией и мощностью потенциального корнеобитаемого слоя.

География агрономически важных свойств почв на тестовом поле не коррелирует с выделами традиционно составленной почвенной карты.

Пространственное варьирование урожайности кукурузы на тестовом поле (размах 23%) коррелирует с варьированием по профилю скелетности почв.

Для использования значений NDVI в качестве индикатора пространственного варьирования агрономически важных свойств почв необходим учет типа возделываемой культуры, тщательный выбор даты получения NDVI, а также наличие априорных экспертных знаний о лимитирующих почвенных факторах на поле, специфики фенологии и агротехнологии возделывания культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Востокова Л.Б., Булгаков Д.С., Орешикова Н.В., Яковлев А.С.* Бонитировка почв в системе земельного кадастра. М.: МАКС Пресс, 2010. 300 с.
2. *Кирьянова Е.Ю., Савин И.Ю.* Неоднородность посевов, определяемая по спутниковым данным MODIS, как индикатор контрастности почвенного покрова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 3. С. 36–39.
3. Материалы к оценке земель Нижегородской губернии: естественно-историческая часть. Отчет Нижегородскому губернскому земству. Вып. 14. Почвы, растительность и климат Нижегородской губернии с почвенной картой. Санкт-Петербург: Нижегородское губернское земство, 1886. 525 с.
4. *Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г.* Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. № 115. С. 129–159. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-115-129-159](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-129-159).
5. *Савин И.Ю.* Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. № 101. С. 5–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
6. *Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А.* Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. № 113. С. 31–57. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-113-31-57](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-31-57).
7. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–

528. DOI: [10.1134/S0032180X19050101](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050101).

8. A framework for land evaluation. FAO Soils bulletin 32. Rome: FAO, 1976. 78 p.

9. *Rajan Bhatt*. Application of Geospatial Technology in Assessment of Spatial Variability in Soil Properties: A Review // Current Journal of Applied Science and Technology. 2020. No. 3. P. 57–71. DOI: [10.9734/CJAST/2020/v39i3931104](https://doi.org/10.9734/CJAST/2020/v39i3931104).

10. *Boori M.S., Choudhary K., Kupriyanov A.V.* Crop growth monitoring through Sentinel-1 Landsat data based NDVI time-series // Computer Optics. 2020. No. 44(3). P. 409–419. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-635](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-635).

11. *Brown C., Millington J., Rounsevell M.* Assessing the quality of land system models: moving from validation to evaluation // Socio-Environmental Systems Modelling. 2023. No. 5. 18434. DOI: [10.18174/sesmo.18434](https://doi.org/10.18174/sesmo.18434).

12. *Montero D., Aybar C., Mahecha M.D.* et al. A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research // Scientific Data. 2023. No. 10(1). DOI: [10.1038/s41597-023-02096-0](https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0).

13. *Omia E., Bae H., Park E., Kim M.S., Baek I., Kabenge I., Cho B-K.* Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances // Remote Sensing. 2023. No. 15(2). P. 354. DOI: [10.3390/rs15020354](https://doi.org/10.3390/rs15020354).

14. *Rouse J.W., Haas R.Y., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // 3rd ERTS Symp. NASA. Goddard Space Flight Center. 1973. Vol. 1. Sect. A. Paper-A20. P. 309–317.

15. *Singh R.K., Rizvi J., Behera M.D., Biradar C.* Automated crop type mapping using time-weighted dynamic time warping-A basis to derive inputs for enhanced food and Nutritional Security // Current Research in Environmental Sustainability. 2021. Vol. 3. No. 100032. DOI: [10.1016/j.crsust.2021.100032](https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100032).

16. *Voronin A.Ya., Savin I.Yu.* GPR diagnostics of chernozem humus horizon thickness // Russian Agricultural Sciences. 2018. Vol. 44. No. 3. P. 250–255. DOI: [10.3103/S1068367418030199](https://doi.org/10.3103/S1068367418030199).

17. *Zajícová K., Chuman T.* Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review // Geoderma. 2019. Vol. 343. P. 116–129. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).

REFERENCES

1. Vostokova L.B., Bulgakov D.S., Oreshnikova N.V., Yakovlev A.S., *Bonitirovka pochv v sisteme zemel'nogo kadastra* (Soil bonification in the land cadastre system), Moscow: MAKS Press, 2010, 300 p.

2. Kiryanova E.Yu., Savin I.Yu., *Neodnorodnost' posevov, opredelyaemaya po sputnikovy'm dannym MODIS, kak indikator kontrastnosti pochvennogo pokrova* (The heterogeneity of crops, determined by MODIS satellite data, as an indicator of the contrast of the soil cover), *Doklady Rossijskoj akademii sel'skoxozyajstvennykh nauk*, 2013, No. 3, pp. 36–39.
3. *Materialy k ocenke zemel Nizhegorodskoj gubernii: estestvenno-istoricheskaya chast; Otchet Nizhegorod-skomu gubernskomu zemstvo* (Materials for the assessment of the lands of the Nizhny Novgorod province: the natural and historical part. The report below is to the city provincial zemstvo), Iss. 14, Soils, vegetation and climate of Nizhny Novgorod province with a soil map, St. Petersburg: Nizhny Novgorod Provincial Zemstvo, 1886, 525 p.
4. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Grubina P.G., Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 129–159, DOI: [10.19047/0136-1694-2023-115-129-159](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-129-159).
5. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
6. Savin I.Yu., Berbekov S.A., Tutukova D.A., Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 113, pp. 31–57, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-113-31-57](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-31-57).
7. Savin I.Y., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Y., Modern trends and problems of soil mapping, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 5, pp. 471–480, DOI: [10.1134/S0032180X19050101](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050101).
8. Fundamentals of land valuation, *FAO Soil Bulletin*, 32. Rome: FAO, 1976, 78 p.
9. Rajan Bhatt, Application of Geospatial Technology in Assessment of Spatial Variability in Soil Properties: A Review, *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2020, No. 3, pp. 57–71. DOI: [10.9734/CJAST/2020/v39i3931104](https://doi.org/10.9734/CJAST/2020/v39i3931104).
10. Boori M.S., Choudhary K., Kupriyanov A.V., Crop growth monitoring through Sentineland Landsat data based NDVI time-series, *Computer Optics*, 2020, No. 44(3), pp. 409–419, DOI: [10.18287/2412-6179-CO-635](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-635).
11. Brown C., Millingto, J., Rounsevell M., Assessing the quality of land system models: moving from validation to evaluation, *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2023, No. 5, 18434, DOI: [10.18174/sesmo.18434](https://doi.org/10.18174/sesmo.18434).
12. Montero D., Aybar C., Mahecha M.D. et al., A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research, *Scientific Data*, 2023, No. 10(1), DOI: [10.1038/s41597-023-02096-0](https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0).
13. Omia E., Bae H., Park E., Kim M.S., Baek I., Kabenge I., Cho B-K., Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of

Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances, *Remote Sensing*, 2023, No. 15(2), pp. 354, DOI: [10.3390/rs15020354](https://doi.org/10.3390/rs15020354).

14. Rouse J.W., Haas R.Y., Schell J.A., Deering D.W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *3rd ERTS Symp. NASA. Goddard Space Flight Center*, 1973, Vol. 1, Sect. A, Paper-A20, pp. 309–317.

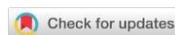
15. Singh R.K., Rizvi J., Behera M.D., Biradar C., Automated crop type mapping using time-weighted dynamic time warping-A basis to derive inputs for enhanced food and Nutritional Security, *Current Research in Environmental Sustainability*, 2021, Vol. 3, No. 100032, DOI: [10.1016/j.crsust.2021.100032](https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100032).

16. Voronin A.Ya., Savin I.Yu., GPR diagnostics of chernozem humus horizon thickness, *Russian Agricultural Sciences*, 2018, Vol. 44, No. 3, pp. 250–255, DOI: [10.3103/S1068367418030199](https://doi.org/10.3103/S1068367418030199).

17. Zajíčová K., Chuman T., Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review, *Geoderma*, 2019, Vol. 343, pp. 116–129, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-86-110



Ссылки для цитирования:

Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджиумаров Р.Г., Ярославцева Н.В., Надуткин И.А. Восстановление структуры и почвозащитная роль прямого посева в черноземах и каштановых почвах Ставропольского края // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 86-110. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-86-110

Cite this article as:

Yudin S.A., Ermolaev N.R., Belobrov V.P., Dridiger V.K., Gadzhiumarov R.G., Yaroslavtseva N.V., Nadutkin I.A., Restoration of the structure and soil protection role of no-till in chernozems and chestnuts soils of the Stavropol Territory, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 86-110, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-86-110

Восстановление структуры и почвозащитная роль прямого посева в черноземах и каштановых почвах Ставропольского края

© 2024 г. С. А. Юдин^{1*}, Н. Р. Ермолаев¹, В. П. Белобров¹,
В. К. Дридигер^{2**}, Р. Г. Гаджиумаров², Н. В. Ярославцева¹,
И. А. Надуткин¹¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0003-2199-8474>, e-mail: yudin_sa@esoil.ru.

²Северо-Кавказский Федеральный научный аграрный центр, Россия,
356241, г. Михайловск, Шпаковский район Ставропольского края,
ул. Никонова, 49,

** e-mail: dridiger.victor@gmail.com.

Поступила в редакцию 15.04.2024, принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Представлены результаты исследований на примере чернозема южного и каштановой почвы. Многолетнее использование вспашки с оборотом пласта и применение чистых паров приводит к критическому состоянию почвы по содержанию агрегатов размером >10 мм и >1мм. Внедрение прямого посева (ПП) на старопашотных почвах приводит к общему увеличению средневзвешенного диаметра агрегатов (СВД).

Интенсивность восстановления структурного состояния почвы при ПП в черноземе южном протекает более интенсивно, чем в каштановой почве, причем основные изменения происходят во фракциях агрономических ценных агрегатов. В черноземе южном происходит увеличение диаметра с 6.0 мм до 9.5 мм, тогда как в каштановой почве СВД увеличивается только до 7 мм. Содержание эрозионноопасных агрегатов <1 мм и их изменение в зависимости от интенсивности сельскохозяйственной обработки в черноземе южном и каштановой почве указывают на тенденцию восстановления структуры в варианте ПП. В черноземе южном содержание частиц 1–0.5 мм снизилось на 1.2%, а в каштановой почве – на 6.2%. Отказ от механической обработки почвы показал, что, в отличие от сухих агрегатов, влияние прямого посева на водоустойчивость структуры пахотного горизонта более значимо и представлено в виде перегруппировки фракций. Применение технологии ПП приводит к снижению содержания эрозионноопасных агрегатов и увеличивает водоустойчивость структуры пахотного горизонта, что в совокупности с влиянием растительных остатков на поверхности почвы обеспечивает противозэрозионный эффект. Восстановление структурного состояния почвы при ПП в черноземе южном протекает более интенсивно, чем в каштановой почве, основные изменения в виде перегруппировки происходят во фракциях агрономически ценных агрегатов.

Ключевые слова: прямой посев; no-till; средневзвешенный диаметр агрегатов; агрегатный состав почвы; водоустойчивость структуры.

Restoration of the structure and soil protection role of no-till in chernozems and chestnuts soils of the Stavropol Territory

© 2024 S. A. Yudin^{1*}, N. R. Ermolaev¹, V. P. Belobrov¹,
V. K. Dridiger^{2**}, R. G. Gadzhumarov²,
N. V. Yaroslavtseva¹, I. A. Nadutkin¹

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
* <https://orcid.org/0000-0003-2199-8474>, e-mail: yudin_sa@esoil.ru.*

²*North Caucasian Federal Agrarian Centre,
49 Nikonova Str., Mikhaylovsk 356241, Shpakovsk, Russian Federation,
** e-mail: dridiger.victor@gmail.com.*

Received 15.04.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The results of research on the example of southern chernozem and chestnut soil are presented. Long-term use of plowing with rotation of the soil layer and the use of fallows leads to a critical state of the soil in terms of the content of aggregates measuring >10 mm and >1 mm. The introduction of no-till on old arable soils leads to a general increase in the mean weighted diameter of aggregates (MWD). The intensity of restoration of the structural state of the soil during no-till in southern chernozem occurs more intensively than in chestnut soil, and the main changes are recorded in the fractions of agronomically valuable aggregates. In southern chernozem there is an increase in diameter from 6.0 mm to 9.5 mm, while in chestnut soil the MWD increases only to 7 mm. The content of erosion-susceptible aggregates <1 mm and their change depending on the intensity of agricultural cultivation in southern chernozem and chestnut soil indicates a tendency to restore the structure in the no-till variant. In southern chernozem, the content of particles of 1–0.5 mm size decreased by 1.2%, and in chestnut soil – by 6.2%. Refusal of mechanical tillage showed that, in contrast to dry aggregates, the influence of no-till on the water stability of the structure of the arable horizon is more significant and is presented in the form of fractions rearrangement. The use of no-till technology results in a reduction in the content of erosion-susceptible aggregates and increases the water stability of the structure of the arable horizon, which, together with the influence of crop residues on the soil surface, provides an anti-erosion effect. The restoration of the structural state of the soil during no-till in southern chernozem proceeds more intensively than in chestnut soil. The main changes in the form of rearrangement occur in fractions of agronomically valuable aggregates.

Keywords: no-till; mean weight diameter; aggregate composition of soil; water retention of the soil structure.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное плодородие неразрывно связано со структурой почвы, которая оказывает воздействие на газообмен, удержание и инфильтрацию воды, проникновение корней и круговорот питательных элементов. Состояние агрегатов напрямую связано с устойчивостью почвы к водной и ветровой эрозии (Lal et al., 2007; Белобров и др., 2021a; Белобров и др., 2021b; Дридигер и др., 2020; Извеков, 2012), а также биологической активностью, которая в свою очередь оказывает влияние на разложение органических остатков, круговорот углерода и азота (Garcia-Oliva, Oliva,

2004; Pires et al., 2017; Rabot et al., 2018; Кёршенс, 1992; Шеин, 2005). Интенсивная механическая обработка почвы и использование черных паров приводит к ухудшению структуры почвы, особенно в районах недостаточного увлажнения, снижая стабильность агрегатов, что приводит к распылению верхнего горизонта и увеличивает эрозионную опасность. Это характерно для Ставропольского края, где в 2020 г. наблюдалась пыльная буря, в результате которой около 5.9 тыс. га озимых культур погибло, а 21.9 тыс. га было засыпано мелкоземом.

Применение прямого посева (ПП) на разных почвах мира показало, что снижение интенсивности механической обработки существенно влияет на водную эрозию и дефляцию почвы. Растительные остатки на поверхности почв при ПП выполняют противозерозионную защиту, улучшая ее физическое и биологическое состояние (Nunes et al., 2018; Белобров и др., 2021a; Белобров и др., 2022; Дридигер, 2018; Ермолаев и др., 2021; Ермолаев и др., 2022). В этой связи освоение технологии прямого посева (no till) в условиях недостаточного увлажнения на большей части территории Ставропольского края приобретает особое значение. Растительные остатки после очередной уборки урожая сохраняются на поверхности почв до нового урожая, накапливая растительную подушку, которая по мере разложения культур способствует сохранению влаги, защите от физического испарения и эрозии. Длительность периода до полного разложения растительных остатков зависит от культур, применяемых в севообороте, что дает возможность контролировать постоянство присутствия на поверхности почв защитного растительного слоя разной степени разложения. В этом заключается одно из основных преимуществ прямого посева – более эффективное использование влаги, защита почв от водной и ветровой эрозии, улучшение баланса органического вещества, большая устойчивость к изменениям климатических параметров в течение года и вегетационного периода и, как следствие, получение стабильных урожаев сельскохозяйственной продукции (Nunes et al., 2018; Дубовик и др., 2019; Иванов и др., 2021; Холодов, Ярославцева, 2021).

Влияние растительных остатков на структурное состояние почв Ставрополья исследовано недостаточно. Вместе с тем полу-

ченные при прямом посеве данные об агрегатном состоянии почв (Дридигер, 2021; Холодов и др., 2019а) указывают на необходимость оценки влияния растительных остатков во времени и пространстве как фактора защиты почв от эрозии в целом. Дефляция при этом в силу специфического ветрового режима Ставрополья особенно опасна, так как определяет характер деградации структуры и разрушение агрегатов, что представляет наиболее ранимое для гумусового горизонта свойство почв, его физическую компоненту (Дридигер и др., 2021; Кулинцев, 2013). Наиболее информативным на наш взгляд является анализ трансформации отдельных фракций агрегатов при прямом посеве, в сравнении с традиционной технологией, а также роль технологии, не использующей обработки при возделывании сельскохозяйственных культур, в структуре и водоустойчивости почв к эрозионным процессам.

В этой связи основная цель работы заключается в оценке особенностей восстановления агрегатного состояния черноземов и каштановых почв при использовании прямого посева (no-till) в фермерских и коллективных хозяйствах засушливой зоны Ставропольского края.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории двух районов Ставропольского края: Ипатовского с доминированием черноземов южных и обыкновенных (45°49' с. ш.; 42°03.5' в. д., Naplic Chernozem) (Белобров и др., 2021а; IUSS Working Group WRB, 2022), и Буденновского – каштановых почв (44°32' с. ш.; и 44°10' в. д., Naplic Kastanozems) (Ермолаев и др., 2021; IUSS Working Group WRB, 2022). Климатические условия по средним многолетним показателям характеризуют выбранные районы северо-западной и юго-восточной периферии Ставропольской возвышенности в основном как засушливые регионы (Дридигер и др., 2021; Кулинцев, 2013; Куприченков, 2005). В особенности это относится к Буденновскому району, где в почвенном покрове доминируют каштановые почвы.

В качестве объектов исследования в каждом районе были выбраны по два смежных хозяйства со сходными севооборотами, но использующих разные технологии обработки почвы. Фермер-

ские индивидуальные хозяйства постоянно используют традиционную технологию (ТТ), в которой преобладает вспашка с оборотом пласта с последующими культивациями, а в коллективных хозяйствах (ООО СХП “Урожайное” Ипатовского района и СПК “Архангельский” Буденновского района) применяют прямой посев последние 15 и 12 лет соответственно.

Смежные поля фермеров и коллективных хозяйств расположены через разделяющую их лесополосу на расстоянии около 200 м друг от друга в однородных условиях водораздельной части рельефа с уклоном $<1^\circ$. На каждом из четырех полей выбиралась площадка размером 100 м². Почвенные образцы ненарушенного состава массой 4–5 кг каждый отбирались на структурный анализ с глубины 0–20 см из пяти точек методом конверта. Одна из них располагалась в центре площадки, остальные – в 5 м от центра, ориентированы по сторонам света.

При использовании данного метода отбора проб, апробированного на черноземах типичных, обыкновенных и южных (Белобров и др., 2020; Фрид и др., 2016; Холодов и др., 2019b; Холодов, Ярославцева, 2021), не возникает потерь и искусственного перераспределения размерных фракций агрегатов. Образцы высушивали на воздухе. Каждый из пяти сухих индивидуальных образцов анализировали отдельно на просеивании по методу Саввинова через сита размером 0.25; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 7.0 и 10.0 мм. Таким образом, достигалась пятикратная повторность полученных результатов. Для оценки водостойчивости использовали подход Хана (Хан, 1969), согласно которому в воде просеивают не весь образец почвы, а агрегаты отдельных фракций сухого просеивания. Водостойчивость агрегатов определяли в трехкратной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Объекты исследования характеризуют разные типы почв, наиболее представительные, находящиеся в близких климатических условиях. Различия в этих почвах обусловлены характером рельефа, формированием воздушных масс, антропогенным воздействием на почвенный покров. Длительное использование почв в традиционном земледелии (вспашка с оборотом и без оборота

пласта) стирает многие исходные свойства целинных почв, в той или иной степени гомогенизирует и деградирует гумусовый горизонт, верхняя часть которого по мере развития эрозии обновляется за счет нижележащих слоев, приводит к уменьшению его мощности, изменению карбонатного профиля, температурного и водного режима.

Морфологические свойства чернозема южного при использовании в разных технологиях значительно различаются по мощности гумусового горизонта (табл. 1). Мы это связываем с проявлениями дефляции в регионе, в результате которой на пахотных почвах снижается его мощность, а на почвах, защищенных с поверхности слоем растительных остатков, сохраняется, обуславливая полученную за 15 лет применения прямого посева разницу в 20 см (Белобров и др., 2021а). Накопление влаги в зимний период, снижение испарения с поверхности почв, находящихся под подушкой растительных остатков, приводит к изменению карбонатного профиля. Почвы выщелачиваются почти до нижней границы гумусового горизонта (в среднем на 42 см), что более характерно для профиля черноземов обыкновенных, также формирующихся в Ипатовском районе, но в регионах с неустойчивым увлажнением (Дридигер, 2021).

Каштановые почвы объектов в Буденновском районе более близкие по свойствам. Отличия между применяемыми технологиями выявлены по мощности гумусированного профиля, поверхностному увлажнению и видимыми выделениям кристаллов гипса в горизонте *V_{ca}* в каштановой почве скважины 528 (табл. 1).

Сухое просеивание образцов почв показало, что агрегатный состав естественного сложения в применяемых технологиях земледелия представлен в основном глыбистыми агрегатами >10 мм, что характерно для старопахотных почв засушливой зоны и зоны неустойчивого увлажнения Ставропольского края (Дорожка и др., 2011; Дорожка и др., 2017; Кулинцев, 2013). Содержание глыбистых агрегатов во всех почвах и технологиях превышает 50%, что относится к критическому показателю для данных почв (Фрид и др., 2010).

Таблица 1. Морфологические свойства черноземов южных и каштановых почв в разных технологиях земледелия
Table. 1. Morphological properties of southern chernozems and chestnut soils in different farming technologies

Чернозем южный				Каштановая почва			
Традиционная технология		Прямой посев		Традиционная технология		Прямой посев	
Скважина XVII		Скважина XX		Скважина 529		Скважина 528	
Индекс горизонта	Мощность горизонта, см	Индекс горизонта	Мощность горизонта, см	Индекс горизонта	Мощность горизонта, см	Индекс горизонта	Мощность горизонта, см
A1ca	0–32	A1	0–52	Aca	0–25	Aca	0–24
ABca	32–62	ABca	52–92	ABca	25–37	ABca	24–50
B1ca	62–135	B1ca	92–140	B1ca	37–80	B1ca	50–60
B2ca	135–176	B2ca	140–181	Cca	80–200+	B2cas	60–80
Cca	176+	Cca	181+			Cca	80–200+

Содержание глыбистых агрегатов >10 мм в черноземе южном при прямом посеве на 5.1% ниже, чем в тех же почвах при традиционной технологии обработки, а содержание остальных крупных агрегатов размером 10–2 мм, напротив, в среднем выше на 6.9 % (рис. 1). При таком характере распределения сухих агрегатов это указывает на тенденцию к восстановлению структуры в южных черноземах (Холодов, Ярославцева, 2021).

Для мелких агрегатов и микроагрегатов (1–0.25 мм) характерно их очень низкое суммарное содержание при использовании обеих технологий, причем при ПП оно всего на 1.8% ниже, чем при ТТ (рис. 1). С одной стороны, это также отражает высокую распаханность почв, с другой – тенденцию к восстановлению агрегатного состояния в структуре почвы.

В целом можно отметить, что восстановление структуры черноземов южных имеет лишь начальную фазу. Перегруппировка содержания всех фракций при сухом просеивании в прямом посеве указывает на тенденцию к восстановлению структурного состояния агрегатов и не фиксирует значимых различий между технологиями. Высокое содержание глыбистой фракции как в почвах при традиционной технологии, так и при прямом посеве, диагностирует общую деградацию и разрушение агрегатов вследствие длительного антропогенного воздействия на почвы. Изменения в агроэкологическом состоянии почв при прямом посеве приводят к такому же медленному формированию, но уже устойчивого к эрозии агрегатного состава почвы.

Агрегатный состав в каштановых почвах имеет отличия от черноземов южных (рис. 2). Глыбистых агрегатов больше в варианте с прямым посевом на 5.9%, при этом крупные агрегаты во фракциях 10–3 мм в этой технологии так же преобладают, как и в черноземах южных. Их суммарное содержание выше на 5.8%, по сравнению с каштановыми почвами при традиционной технологии. В то же время во фракциях 2–0.25 мм агрегатов в почвах традиционной технологии больше на 11.7% по сравнению с почвами прямого посева (рис. 2).

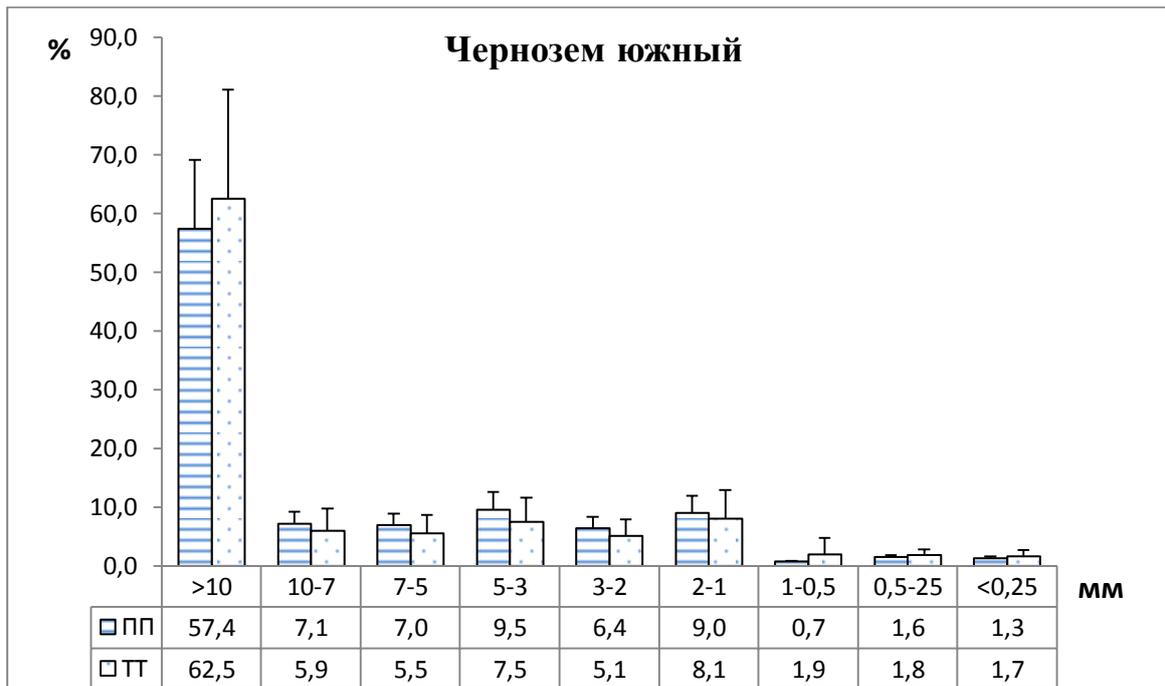


Рис. 1. Влияние технологий на агрегатный состав чернозема южного при сухом просеивании.

Fig. 1. The influence of technology on the aggregate composition of southern chernozem during dry sieving.



Рис. 2. Влияние технологий на агрегатный состав каштановой почвы при сухом просеивании.
Fig. 2. The influence of technology on the aggregate composition of chestnut soil during dry sieving.

Данные агрегатного состава каштановых почв при сухом просеивании показывают, что восстановление структуры отмечается только в крупных агрегатах во фракциях 10–3 мм. В то же время глыбистые и мелкие агрегаты, вместе с микроагрегатами, в отличие от южных черноземов, слабо реагируют на смену технологии возделывания на прямой посев. Это отражается на общем более медленном восстановлении структуры каштановых почв.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод об имеющихся различиях в структуре агрегатов исследованных почв, используемых в разных технологиях. Содержание глыбистых агрегатов и фракций 1–0.25 мм характеризуют разную степень распаханности и восстановления агрегатного состояния почв, а также противоэрозионную роль прямого посева в черноземах южных.

Выявленные при сухом просеивании различия в микроструктуре черноземов южных и каштановых почв отражают, по нашему мнению, регионально-локальные условия их формирования на фоне общей высокой деградации структуры. Наличие глыб >10 мм в традиционной технологии является недостатком, хорошо диагностируемым визуально. Это вынуждает фермеров производить дополнительные культивации с целью довести агрегатный состав до рекомендуемых размеров для проведения качественного посева.

Напротив, при прямом посеве высокое содержание глыбистых агрегатов не сказывается на качестве сева, которое ведется специальными сеялками, а поверхность почв защищена от эрозии растительными остатками.

В черноземах южных СПХ “Урожайное” в результате относительно длительного, в течение 15 лет, применения ПП, можно отметить тенденцию к восстановлению структуры в виде снижения содержания глыбистых агрегатов (рис. 1) и увеличения агрономически ценных, размером 10–0.25 мм (табл. 2). Иная направленность процессов проявляется в каштановой почве. При использовании ПП за более короткий срок (12 лет) отмечается остаточное от традиционной технологии преобладание глыбистых агрегатов (рис. 2) и снижение агрономически ценных, по сравнению с ТТ (табл. 2). Снижение содержания агрономически ценных агрегатов в каштановых почвах характеризует и большую подвержен-

ность этих почв эрозийным процессам, в особенности при ливневых осадках в вегетационный период при выращивании озимой пшеницы (Дридигер, 2021).

Внедрение прямого посева на старопахотных почвах приводит к общему увеличению средневзвешенного диаметра агрегатов (СВД). В черноземе южном и каштановой почве диаметр увеличился до ~ 9 мм, т. е. в среднем на 2 и 1 мм соответственно. Иная закономерность наблюдается при анализе СВД для агрономически ценных агрегатов. В черноземе южном происходит увеличение диаметра с 6.0 мм до 9.5 мм, тогда как в каштановой почве СВД увеличивается только до 7 мм, т. е. интенсивность восстановления структурного состояния почвы при ПП в черноземе южном протекает более интенсивно, чем в каштановой почве, причем основные изменения происходят во фракциях агрономически ценных агрегатов.

Исследуемые объекты расположены в зоне Ставрополя, где часто наблюдаются пыльные бури. В связи с этим особый интерес представляет содержание эрозийноопасных агрегатов (<1 мм) и их изменение в зависимости от интенсивности сельскохозяйственной обработки. В черноземе южном и особенно в каштановой почве распределение этих агрегатов указывает на тенденцию восстановления структуры в варианте ПП. В черноземе южном содержание частиц 1–0.5 мм снизилось на 1.2%, а в каштановой почве – на 6.2% (табл. 2).

Таким образом, можно сделать заключение, что технология ПП приводит к формированию более стабильной и безопасной в дефляционном плане структуры пахотного горизонта почвы. Подобная направленность процессов наблюдалась и при использовании ПП в черноземах типичных (Фрид и др., 2016) и обыкновенных (Волошенкова и др., 2022).

Сухое структурное состояние почвы достаточно динамично и может изменяться в зависимости от срока отбора образцов, содержания влаги почвы, выращиваемой культуры и т. п. (Волошенкова и др., 2022; Дубовик и др., 2021). Основная часть распределения фракций сухого просеивания представлена в основном крупными агрегатами: >10 мм, 10–7 мм, 7–5 мм, – которые играют

важную роль в формировании структуры почвенного горизонта (Холодов, Ярославцева, 2021).

Таблица 2. Влияние технологий на показатели структурного состояния чернозема южного и каштановой почвы

Table 2. The influence of technology on the indicators of the structural state of southern chernozem and chestnut soil

Объект	Тип обработки	СВД почвы, мм	Агрономически ценные агрегаты 10–0.25 мм	СВД агрономически ценных агрегатов, мм	Эрозионно опасные агрегаты (<1 мм)
Чернозем южный (СПХ “Урожайное”)	ПП	9.2	41.3	9.5	3.6
	ТТ	7.2	35.9	6.0	5.4
Каштановая почва (СХП “Архангельское”)	ПП	9.1	39.3	7.0	7.1
	ТТ	8.1	43.9	6.0	15.8

Для более значимой информативности и почвозащитной роли прямого посева проведена оценка водостойчивости крупных сухих агрегатов во фракциях >10 мм, 10–7 мм и 7–5 мм (рис. 3–5). Отказ от механической обработки почвы показал, что в отличие от сухих агрегатов, влияние прямого посева на водопрочность структуры пахотного горизонта более выражено и проявляется в виде перегруппировки фракций. Восстановление водопрочной структуры при технологии прямого посева происходит в этом случае и основным образом за счет слипания пылеватых фракций в более

крупные агрегаты, что было подтверждено исследованиями на черноземах типичных (Холодов, Ярославцева, 2021).

В черноземе южном и каштановой почве водоустойчивые агрегаты формировались из сухих мелкогазмерных агрегатов и микрогазтиаи размером 1–2, 1–0.25 и <0.25 мм, слипаясь в глыбистые агрегаты размером >10 мм и крупные агрегаты размером 10–2 мм (рис. 3). При этом содержание водоустойчивых агрегатов в прямом посеве выше, чем в ТТ. Исключение составляет только фракция 5–3 мм в южных черноземах, содержание которой на 3% выше в традиционной технологии, а ее участие в формировании водопрочных глыбистых агрегатов минимально и составляет 5% (рис.3).

Перегазруппировка сухих и формирование водоустойчивых агрегатов во фракции 10–7 мм происходит в основном по той же схеме, что и во фракции глыбистых агрегатов (рис. 4). В черноземах южных различия между технологиями не наблюдаются, тогда как в каштановых почвах в прямом посеве содержание водопрочных агрегатов на 15% выше, чем в ТТ.

Водоустойчивость агрегатов во фракции 7–5 мм обусловлена тем же процессом слипания мелких агрегатов и микроагазгатов, но без образования хорошо выраженного максимума в содержании данной фракции (рис. 5). Формирование крупных и глыбистых водоустойчивых агрегатов характерно для более размерных фракций >10 и 10–7 мм как в черноземах южных, так и каштановых почвах.

Следует заметить, что водоустойчивые агрегаты обеих почв размером 3–2 мм оказались наиболее стабильными, их содержание как в южном черноземе, так и в каштановой почве не меняется в зависимости от технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Эти данные подтверждают сделанный ранее вывод (Холодов, Ярославцева, 2021) о существовании стабильной фракции размером 2–1 мм. В данном случае эта фракция более крупная и водоустойчивая, что для изучаемых почв является более значимым фактором в противоэрозийном плане.

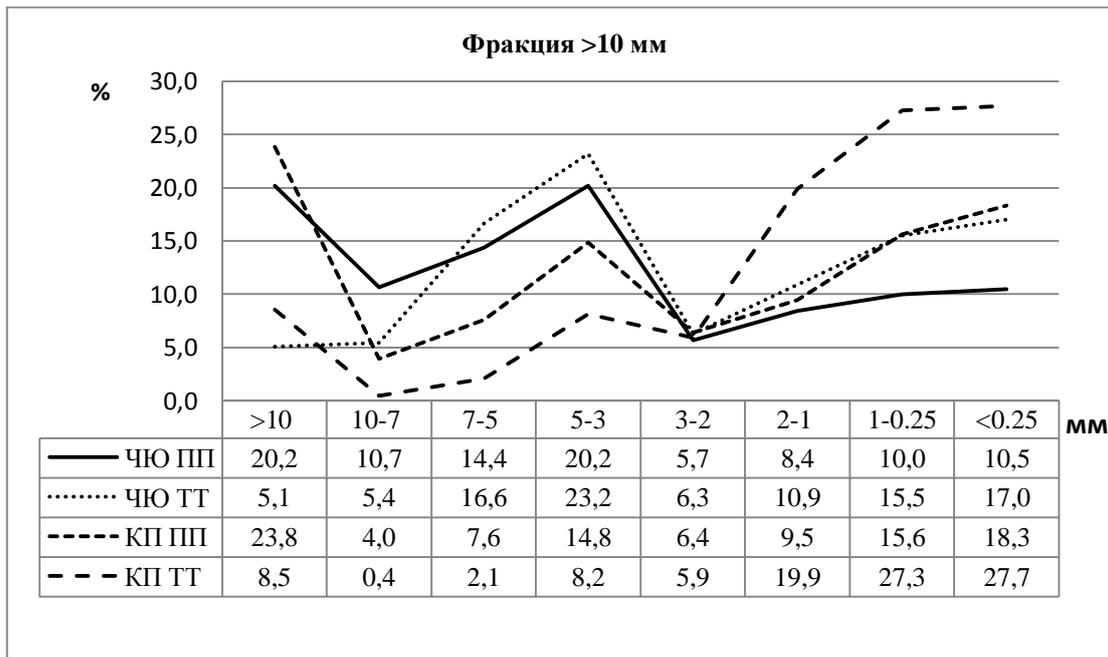


Рис. 3. Влияние технологий на содержание водопрочных агрегатов во фракции >10 мм в зависимости от размера сухих агрегатов.

Fig. 3. The influence of technologies on the content of water-resistant aggregates in the fraction of >10 mm size depending on the size of dry aggregates.

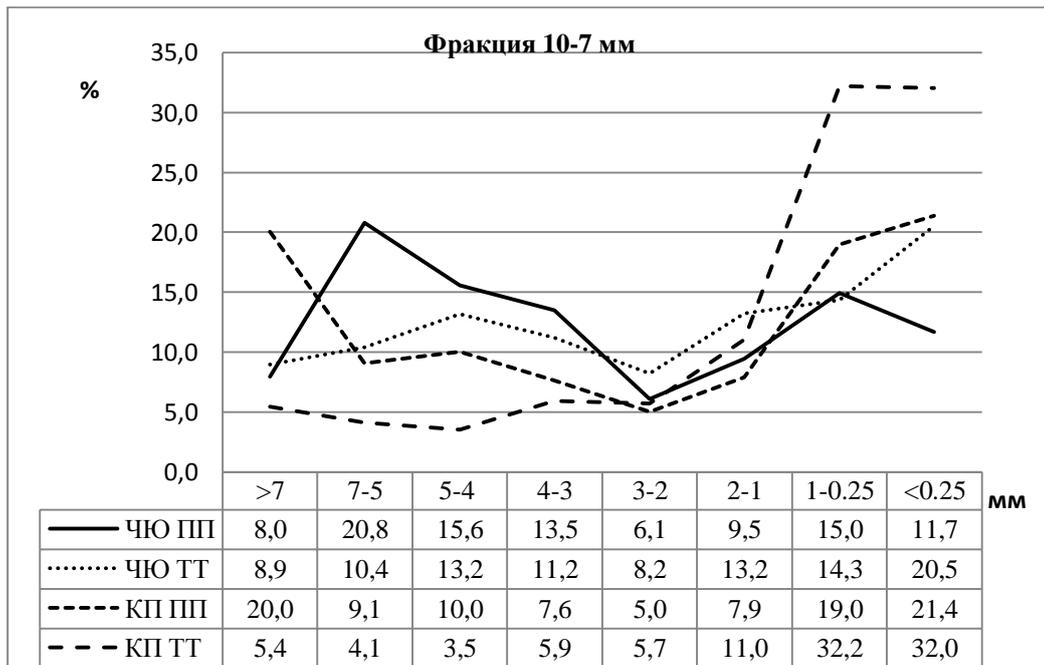


Рис. 4. Влияние технологий на содержание водопрочных агрегатов во фракции 10–7 мм в зависимости от размера сухих агрегатов.

Fig. 4. The influence of technologies on the content of water-resistant aggregates in the 10–7 mm fraction depending on the size of dry aggregates.

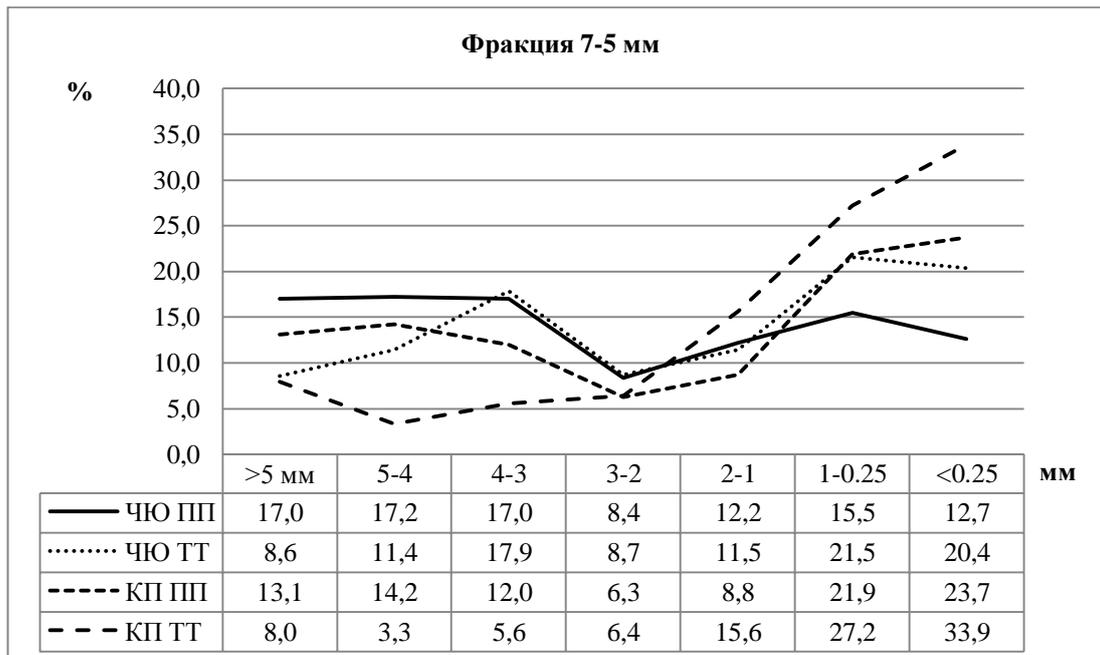


Рис. 5. Влияние технологий на содержание водопрочных агрегатов во фракции 7–5 мм в зависимости от размера сухих агрегатов.

Fig. 5. The influence of technologies on the content of water-resistant aggregates in the 7–5 mm fraction depending on the size of dry aggregates.

Основные изменения, связанные с восстановлением водопропрочной структуры, происходят среди размерных фракций, находящихся на периферии от наиболее стабильной, т. е. среди фракций >10 и 10–7 мм с одной стороны и фракций размером 1–0.25 мм – с другой.

Наиболее стабильной фракцией, своеобразным центром формирования агрегатов, устойчивых во времени и под воздействием обработок, является среди изученных почв фракция 3–2 мм, в основе которой, вероятно, и лежит термин “комковатость” почвы, ее гранулометрический состав и физический смысл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере исследования структуры черноземов южных и каштановых почв при применении в земледелии Ставропольского края традиционной технологии обработки почвы и прямого посева были выявлены определенные регионально-локальные различия, в целом не оказавшие значимого влияния на агрегатный состав при сухом просеивании по методу Саввинова. Это может служить критерием устойчивости гумусового горизонта рассматриваемых почв, сформированного в близких по климатическим параметрам условиях.

Водная эрозия и дефляция губят урожай, трансформируют структуру, которая, несмотря на деградиационные процессы, восстанавливается (интенсивнее в прямом посеве), имея в составе агрегатов наиболее стабильную фракцию размером 3–2 мм. Применение технологии ПП приводит к снижению содержания эрозионноопасных агрегатов и увеличивает СВД почвы пахотного горизонта, что в совокупности с влиянием растительных остатков на поверхности почвы обеспечивает противозерозионный эффект. Восстановление структурного состояния почвы при ПП в черноземе южном протекает более интенсивно, чем в каштановой почве, причем основные изменения в виде перегруппировки происходят во фракциях агрономически ценных агрегатов за счет изменений в составе мелких агрегатов и микроагрегатов почв. В целом процессы восстановления водопропрочной структуры при ПП в черноземе южном протекают более интенсивно, чем в каштановой почве.

Важную роль в восстановлении водопрочной структуры южных черноземов и каштановых почв играют растительные остатки на их поверхности. Формирование глыбистых агрегатов и их упаковка в технологиях ПП и ТТ разнонаправленная. В традиционной технологии она приводит к разрушению агрегатов при обработках почв, в прямом посеве, напротив, – к их консолидации в крупные агрегаты субгоризонтального простирания, которые не разрушаются обработками и устойчивы во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобров В.П., Дридигер В.К., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р. К вопросу о диагностике и защите почв от дефляции в Ставропольском крае // Аграрный вестник Урала. 2021b. Т. 02. № 205. С. 12–25.
2. Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев С.А., Ермолаев Н.Р., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Борисочкина Т.И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный. прямой посев, Курская область. опыт, ротация 1.1 / под ред. А.Л. Иванова, В.П. Белоброва. М.: ГЕОС, 2021a. 123 с.
3. Белобров В.П., Дридигер В.К., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р. Влияние прямого посева и структуры почвенного покрова на изменчивость равновесной плотности типичного чернозема // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. Т. 62. С. 188–193.
4. Волошенкова Т.В., Дридигер В.К., Епифанова Р.Ф., Калашиникова А.А., Тимохина О.В. Влияние технологии No-till на структуру и противодефляционные свойства чернозема обыкновенного в Центральном Предкавказье // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 9. С. 20–25.
5. Дорошко Г.Р., Власова О.И., Шабалдас О.Г., Зеленская Т.Г. Прямой посев полевых культур – одно из направлений биологизированного земледелия // Вестник АПК Ставрополя. 2011. Т. 2(2). С. 7–11.
6. Дорошко Г.Р. Влияние длительного применения прямого сева на основные агрофизические факторы плодородия почвы и урожайность озимой пшеницы в условиях засушливой зоны // Земледелие. 2017. Т. 7. С. 7–10.
7. Дридигер В.К. Технология no-till и допускаемые при ее освоении ошибки // Сельскохозяйственный журнал. 2018. Т. 1. № 11. С. 14–23.
8. Дридигер В.К., Белобров В.П., Антонов С.А., Юдин С.А., Гаджумаров Р.Г., Лиходиевская С.А., Ермолаев Н.Р. Эффективность технологии прямого посева в борьбе с дефляцией и водной эрозией //

Сельскохозяйственный журнал. 2020. № 3(13). С. 18–28.

9. *Дридигер В.К.* Возделывание озимой пшеницы в системе прямого посева в Ставропольском Крае. Ставрополь: Вып. АРГУС Став., 2021. 192 с.

10. *Дридигер В.К., Кулинцев В.В., Измалков С.А., Дридигер В.В.* Эффективность технологии no-till в засушливой зоне Ставропольского края // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 1. С. 34–39.

11. *Дубовик Д.В. и др.* Эффективность различных способов основной обработки почвы и прямого посева при возделывании озимой пшеницы на черноземных почвах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 12. С. 26–29.

12. *Дубовик Е.В., Дубовик Д.В., Шумаков А.В.* Влияние приемов основной обработки почвы на макроструктуру чернозема типичного // Почвоведение. 2021. Т. 10. С. 1195–1206.

13. *Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджумаров Р.Г.* No-till identification by crop residues on the soil surface using the multi-temporal integral index minNDTI // АгроЭкоИнфо. 2021. Т. 4. № 46. С. 1–14.

14. *Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджумаров Р.Г.* Количественная оценка растительных остатков в прямом посеве по данным дистанционного зондирования и полевого обследования почвенного покрова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 134–159. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-112-134-159](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-134-159).

15. *Иванов А.Л., Кулинцев В.В., Дридигер В.К., Белобров В.П.* О целесообразности освоения системы прямого посева на черноземах России // Достижения науки и техники АПК. 2021. № 4. С. 8–16.

16. *Извеков А.С.* Защита почв от эрозии и воспроизводство их плодородия в южных степных и лесостепных районах России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012. Вып. 70. С. 79–95. DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-79-952012](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-79-952012).

17. *Кёршенс М.* Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // Почвоведение. 1992. Т. 10. С. 122–131.

18. *Кулинцев В.В.* Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2013. 520 с.

19. *Куприченко М.Т.* Почвы Ставрополя. Ставрополь, 2005. 424 с.

20. *Фрид А.С., Холодов В.А.* Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. Т. 9. С. 1093–1100.

21. *Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е., Бондарев А.Г., Козут Б.М.,*

Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.

22. Хан Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 142 с.

23. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019b. № 2. С. 184–193.

24. Холодов В.А. Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархической организации. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 2020. 45 с.

25. Холодов В.А., Ярославцева Н.В. Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС. 2021. 119 с.

26. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2005. 432 с.

27. Garcia-Oliva F., Oliva M.S.B. Effect of soil macroaggregates crushing on C mineralization in a tropical deciduous forest ecosystem // Plant Soil. 2004. Vol. 259. P. 297–305.

28. IUSS Working Group WRB. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 2022. 236 p.

29. Lal R., Reicosky D.C., Hanson J.D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming // Soil Tillage Res. 2007. Vol. 93. No. 1. P. 1–12.

30. Nunes M.R. et al. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield // Geoderma. 2018. Vol. 328. P. 30–43.

31. Pires L.F. et al. Soil structure changes induced by tillage systems // Soil Tillage Res. 2017. Vol. 165. P. 66–79.

32. Rabot E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137.

REFERENCES

1. Belobrov V.P., Driediger V.K., Yudin S.A., Ermolaev N.R., To the question of diagnostics and protection of soils from deflation in Stavropol Territory, *Agrarian bulletin of the Urals*, 2021, Vol. 2, No. 205, pp. 12–25.
2. Belobrov V.P., Yudin S.A., Aydiev A.Ya., Ermolaev N.R., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Borisochkina T.I., Voronin A.Ya., Plotnikova O.O., *Chernozem tipichnyy. pryamoy posev, Kurskaya oblast'. opyt, rotatsiya 1.1* (Typical chernozem. no-till, Kursk region. experience,

- rotation 1.1) / A.L. Ivanov, V.P. Belobrov (Eds), Moscow: GEOS, 2021, 123 p.
3. Belobrov V.P., Driediger V.K., Yudin S.A., Ermolaev N.R., Vliyaniye pryamogo poseva i struktury pochvennogo pokrova na izmenchivost' ravnovesnoy plotnosti tipichnogo chernozema (The influence of no-till and soil cover structure on the variability of the equilibrium density of typical chernozem), *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*, 2022, Vol. 62, pp. 188–193.
4. Dorozhko G.R. Vlasova O.I., Shabalda O.G., Zelenskaya T.G., Pryamoy posev polevykh kul'tur – odno iz napravleniy biologizirovannogo zemledeliya (No-till of field crops – one of the areas of biologized agriculture), *Vestnik APK Stavropol'ya*, 2011, Vol 2(2), pp. 7–11.
5. Voloshenkova T.V. Dridiger V.K. Epifanova R.F., Kalashnikova A.A., Timokhina O.V., Vliyaniye tekhnologii No-till na strukturu i protivodeflyatsionnyye svoystva chernozema obyknovennogo v Tsentral'nom Predkavkaz'ye (The influence of no-till technology on the structure and anti-deflation properties of ordinary chernozem in the Central Ciscaucasia), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2022, Vol. 9, pp. 20–25.
6. Dorozhko G.R., Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya pryamogo seva na osnovnyye agrofizicheskiye faktory plodorodiya pochvy i urozhaynost' ozimoy pshenitsy v usloviyakh zasushlivoy zony (The influence of long-term use of no-till on the main agrophysical factors of soil fertility and the yield of winter wheat in the arid zone), *Zemledeliye*, 2017, Vol. 7, pp. 7–10.
7. Dridiger V.K., Tekhnologiya no-till i dopuskayemye pri yeyo osvoyenii oshibki (No-till technology and mistakes made when mastering it), *Sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*, 2018, Vol. 1, No. 11, pp. 14–23.
8. Dridiger V.K., Effektivnost' tekhnologii pryamogo poseva v bor'be s deflyatsiyey i vodnoy eroziyey (Efficiency of no-till technology in the fight against deflation and water erosion), *Sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*, 2020, pp. 18–28.
9. Dridiger V.K., *Vozdelyvaniye ozimoy pshenitsyv sisteme pryamogo poseva v stavropol'skom kraye* (Cultivation of winter wheat in the direct sowing system in the Stavropol region), Stavropol: ARGUS Stav publ., 2021, 192 p.
10. Dridiger V.K., Kulintsev V.V., Izmalkov S.A., Dridiger V.V., Effektivnost' tekhnologii no-till v zasushlivoy zone Stavropol'skogo Kraya (Efficiency of no-till technology in the arid zone of the Stavropol Territory), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2021, Vol. 1, pp. 34–39.
11. Dubovik D.V. et al., Effektivnost' razlichnykh sposobov osnovnoy obrabotki pochvy i pryamogo poseva pri vzdelyvanii ozimoy pshenitsy na chernozemnykh pochvakh (The effectiveness of various methods of basic tillage and no-till when cultivating winter wheat on chernozem soils),

Dostizheniya nauki i tekhniki APK, 2019, Vol. 33, No. 12, pp. 26–29.

12. Dubovik E.V., Dubovik D.V., Shumakov A.V., Vliyaniye priyemov osnovnoy obrabotki pochvy na makrostrukturu chernozema tipichnogo (Influence of basic tillage techniques on the macrostructure of typical chernozem), *Pochvovedeniye*, 2021, Vol. 10, pp. 1195–1206.

13. Ermolaev N.R., Yudin S.A., Belobrov V.P., Dridiger V.K., Gadzhiumarov R.G., No-till identification by crop residues on the soil surface using the multi-temporal integral index minNDTI, *AgroEcolInfo*, 2021, Vol. 4, No. 46, pp. 1–14.

14. Ermolaev N.R., Yudin S.A., Belobrov V.P., Drediger V.K., Gadzhiumarov R.G., Quantitative assessment of crop residues in no-till technology according to remote sensing data and field soil cover survey, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 112, pp. 134–159, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-112-134-159](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-134-159).

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

16. Izvekov A.S., Protection of eroded soils and the fertility recovery within the dry-steppe and forest-steppe zones of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2012, Vol. 70, pp. 79–95, DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-79-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-79-95).

17. Kershens M., Znachenkiye sodержaniya gumusa dlya plodorodiya pochv i krugovorota azota (The importance of humus content for soil fertility and nitrogen cycle), *Pochvovedeniye*, 1992, Vol. 10, pp. 122–131.

18. Kulintsev V.V., *Sistema zemledeliya novogo pokoleniya Stavropol'skogo kraya* (New generation farming system of the Stavropol Territory), Stavropol: AGRUS Stavropol State. Agrarian University, 2013, 520 p.

19. Kuprichenkov M.T., *Pochvy Stavropol'ya* (Soils of Stavropol), Stavropol: 2005, 424 p.

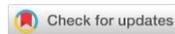
20. Frid A.S., Kholodov V.A., Interpretatsiya dannykh agregatnogo sostava tipichnykh chernozemov raznogo vida ispol'zovaniya metodami klasternogo analiza i glavnykh komponent (Interpretation of data on the aggregate composition of typical chernozems of different types of use using the methods of cluster analysis and principal components), *Pochvovedeniye*, 2016, Vol. 9, pp. 1093–1100.

21. Frid A.S., Kuznetsova I.V., Koroleva I.E., Bondarev A.G., Kogut B.M., Utkaeva V.F., Azovtseva N.A., Azovtseva N.A., *Zonal'no-provintsial'nyye normativy izmeneniy agrokhimicheskikh, fiziko-khimicheskikh i fizicheskikh pokazateley osnovnykh pakhotnykh pochv yevropeyskoy territorii Rossii pri antropogennykh vozdeystviyakh* (Zonal-provincial standards for changes in agrochemical, physicochemical and physical indicators of the main arable

- soils of the European territory of Russia under anthropogenic influences), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2010, 176 p.
22. Khan D.V., *Organo-mineral'nyye soyedineniya i struktura pochvy* (Organo-mineral compounds and soil structure), Moscow: Nauka, 1969, 142 p.
23. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Yu.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aydiev A.Yu., Lazarev V.I., *Izmeneniye sootnosheniya fraktsiy agregatov v gumusovykh gorizontakh chernozemov v razlichnykh usloviyakh zemlepol'zovaniya* (Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems under different land use conditions), *Pochvovedeniye*, 2019, No. 2, pp. 184–193.
24. Kholodov V.A., *Mekhanizmy vosstanovleniya struktury i organicheskogo veshchestva gumusovykh gorizontov pochv na raznykh urovnyakh iyerarkhicheskoy organizatsii: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (Mechanisms for restoring the structure and organic matter of humus soil horizons at different levels of hierarchical organization, Extended abstract of Dr. Agri. Sci. thesis), Moscow, 2020, 45 p.
25. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., *Agregaty i organicheskoye veshchestvo pochv vostanavlivayushchikhsya tsenozov* (Aggregates and organic matter of soils of recovering cenoses), Moscow: GEOS, 2021, 120 p.
26. Shein E.V., *Kurs Fiziki Pochv* (Soil Physics Course: Textbook), 2005, 432 p.
27. Garcia-Oliva F., Oliva M.S.B., Effect of soil macroaggregates crushing on C mineralization in a tropical deciduous forest ecosystem, *Plant Soil*, 2004, Vol. 259, pp. 297–305.
28. *IUSS Working Group WRB*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 2022, 236 p.
29. Lal R., Reicosky D.C., Hanson J.D., Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming, *Soil Tillage Res.*, 2007, Vol. 93, No. 1., pp. 1–12.
30. Nunes M.R. et al., No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield, *Geoderma*, 2018, Vol. 328, No. 01, pp. 30–43.
31. Pires L.F. et al., Soil structure changes induced by tillage systems, *Soil Tillage Res.*, 2017, Vol. 165, pp. 66–79.
32. Rabot E. et al., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, No. 06, 2017, pp. 122–137.

УДК 579.26:631.46; 631.445.21:631.46(470.22)

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-111-151



Ссылки для цитирования:

Медведева М.В., Никитин Д.А., Семенов М.В., Ахметова Г.В. Углерод микробной биомассы альфегумусовых почв северо-запада России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 111-151. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-111-151

Cite this article as:

Medvedeva M.V., Nikitin D.A., Semenov M.V., Akhmetova G.V., Carbon of microbial biomass in Al-Fe-humus soils of the northwestern Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 111-151, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-111-151

Благодарность:

Лабораторные работы по изучению структуры микробной биомассы методом люминесцентной микроскопии проведен в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (Консорциум № 4 “Углерод в экосистемах: мониторинг”, Соглашение № ВИП ГЗ/24-4 от 11 марта 2024 г.). Лабораторные работы по оценке базального и субстрат-индуцированного дыхания почвы выполнены молодежной лабораторией Почвенного углерода и микробной экологии в рамках госзадания “Исследование микробных драйверов секвестрации и депонирования органического углерода в почвах агроэкосистем” (№ FGUR-2022-0018).

Acknowledgments:

Laboratory work on the study of the structure of microbial biomass by luminescent microscopy was carried out as part of the implementation of the most important innovative project of national importance “Unified National Monitoring System for climatically active Substances” (Consortium No. 4 “Carbon in Ecosystems: Monitoring”, Agreement No. VIP GZ/24-4 March 11, 2024). Laboratory work on the assessment of basal and substrate-induced soil respiration was performed by the Youth Laboratory of Soil Carbon and Microbial Ecology within the framework of the state task “Study of microbial drivers of sequestration and deposition of organic carbon in soils of agroecosystems” (No. FGUR-2022-0018).

Углерод микробной биомассы альфегумусовых почв северо-запада России

© 2024 г. М. В. Медведева^{1*}, Д. А. Никитин^{2**},
М. В. Семенов^{2***}, Г. В. Ахметова^{1****}

¹Институт леса КарНЦ РАН,
ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Россия,
Республика Карелия, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,
*<https://orcid.org/0000-0002-2543-3123>, e-mail: mariamed@mail.ru,
***<https://orcid.org/0000-0003-0708-369X>.

²ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
**<https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,
***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>.

Поступила в редакцию 23.04.2024, после доработки 06.06.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Исследование проведено в сосняках черничных среднетаежной подзоны Карелии. Представлены результаты комплексных исследований микробценоза подзолов иллювиально-железистых (Albic Podzols), сформировавшихся на флювиогляциальных отложениях. Для оценки углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) использовали методы люминесцентной микроскопии и субстрат-индуцированного дыхания. Для оценки микробиологической активности почв в отношении минерализации почвенного органического вещества определяли скорость базального дыхания, рассчитывали метаболический коэффициент. Показано, что изменение изучаемых показателей отражает природно-климатические условия и специфику почв альфегумусового генезиса. Наибольшие значения $C_{\text{мик}}$ и базального дыхания были отмечены в подгоризонтах лесной подстилки, а наименьшие – в элювиальном и иллювиальном горизонтах. Полученные результаты могут быть использованы в качестве микробиологических показателей при моделировании процессов круговорота углерода в альфегумусовых почвах лесных экосистем.

Ключевые слова: биомасса микроорганизмов; субстрат-индуцированное дыхание; люминесцентная микроскопия; биологическая активность почв; базальное дыхание.

Carbon of microbial biomass in Al-Fe-humus soils of the northwestern Russia

© 2024 M. V. Medvedeva^{1*}, D. A. Nikitin^{2**}, M. V. Semenov^{2***},
G. V. Akhmetova^{1****}

¹*Forest Research Institute
of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
11 Pushkinskaya Str., 185910 Petrozavodsk, Karelia., Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0002-2543-3123>, e-mail: mariamed@mail.ru,
***<https://orcid.org/0000-0003-0708-369X>.*

²*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,
***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>.*

Received 23.04.2024, Revised 06.06.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The study was carried out in blueberry pine forests of the middle taiga subzone of Karelia. The results of complex studies of the microbiocenosis of Al-Fe-humus soils (Albic Podzols) formed on fluvio-glacial deposits are presented. The methods of luminescent microscopy and substrate-induced respiration were used to assess the carbon of microbial biomass (C_{mic}). To study the microbiological activity of soils in relation to the mineralization of soil organic matter, the basal respiration method was used, and the metabolic coefficient was calculated. It is shown that the changes in the studied indicators reflect the natural and climatic conditions and the specifics of the soil of Al-Fe-humus genesis. The highest values of C_{mic} and basal respiration were observed in the subhorizons of the forest floor, and the lowest in the eluvial and illuvial horizons. The results obtained can be used as microbiological indicators in modeling carbon cycling processes in Al-Fe-humus soils of forest ecosystems.

Keywords: microbial biomass; substrate-induced respiration; luminescent microscopy; biological activity of soils; basal respiration.

ВВЕДЕНИЕ

Леса покрывают около трети всей суши и являются наиболее распространенными наземными экосистемами на Земле (Perry et al., 2008). Более половины площади Северного полушария занято лесами, что делает их одним из ключевых компонентов биосферы (Goodale et al., 2002). В связи с исследованием биосферной роли лесов, их продуктивности и устойчивости в условиях глобального изменения климата возрос интерес к изучению процессов образования и поглощения парниковых газов почвой (Иванов и др., 2021; Gupta, 2022; Baldrian et al., 2023). Леса способны накапливать значительные объемы углерода в древесине и секве-

стрировать его в стабильном почвенном органическом веществе (ПОВ), что становится особенно важным в эпоху усиления парникового эффекта (Perry et al., 2008; Иванов, Столбовой, 2019; Gupta, 2022). Запасы углерода во всех лесах планеты составляют около 861 Пг, из которых 44% находятся в почве, 42% – в над- и подземной биомассе, 8% – в валежной древесине и 5% – в подстилке (Lladó et al., 2017). Несмотря на то, что растения вносят основной вклад в поглощение углерода из атмосферы, микроорганизмы также влияют на углеродный баланс лесных экосистем (Lladó et al., 2017; Чернов и др., 2017; Иванов и др., 2021; Baldrian et al., 2023). Прокариоты и грибы играют важную роль в трансформации органического вещества (Кутовая и др., 2018), оказывая тем самым влияние на процессы секвестрации углерода наземными экосистемами (Baldrian et al., 2023). Кроме того, микробные сообщества почвы являются драйверами биогеохимических циклов (Чернов и др., 2017), поэтому понимание их роли в формировании углеродного баланса имеет важное значение для прогнозирования реакции лесов на изменения условий окружающей среды (Lladó et al., 2017).

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является крупнейшим резервуаром органического углерода ($C_{\text{орг}}$), основой стабильности климата и экосистем (Семенов, Когут, 2015; Joergensen, Wichern, 2018; Jansson, Hofmockel, 2020; Иванов и др., 2021). Почва содержит в 2 раза больше углерода, чем атмосфера (Liang et al., 2020; Wang et al., 2021), и в 4–5 раз больше, чем растительность (Anthony et al., 2020). В этой связи незначительные изменения в запасах ПОВ могут оказать существенное влияние на концентрацию CO_2 в атмосфере и, соответственно, на парниковый эффект (Liang et al., 2017; Иванов и др., 2021). Однако до сих пор имеется недостаточно информации для прогнозирования, контроля и управления запасами ПОВ ввиду ограниченного понимания механизмов генезиса, трансформации и секвестрации $C_{\text{орг}}$ (Семенов, Когут, 2015; Liang et al., 2017).

Самой динамичной функциональной составляющей ПОВ является углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$), который способен быстро реагировать на внешние воздействия (Семенов, Когут, 2015; Jansson, Hofmockel, 2020). Доля $C_{\text{мик}}$ в составе $C_{\text{орг}}$ обычно

составляет 1–5% (Семенов, Когут, 2015; Liang et al., 2019; Angst et al., 2021), однако именно активность микроорганизмов в почве является одним из важнейших факторов, определяющих темп и направленность трансформации ПОВ (Paul, 2016; Joergensen, Wichern, 2018; Никитин и др., 2022) и регулирующих потоки питательных веществ для роста и развития растений (Хитров и др., 2023; Никитин и др., 2023).

Одним из методов определения содержания $S_{\text{мик}}$ является люминесцентная микроскопия, основным достоинством которой является возможность прямого учета клеток прокариот и грибов в почве *in situ* (Звягинцев, 1991; Благодатская и др., 2016; Полянская и др., 2017, 2020). Этот метод позволяет определить не только значения $S_{\text{мик}}$, но и структуру микробной биомассы (численность, размер и форму клеток, длину мицелия, соотношение мицелий : споры и грибы : бактерии), которые влияют на интенсивность минерализации ПОВ (Звягинцев, 1991; Добровольская и др., 2015; Семенов и др., 2023). Другим распространенным подходом определения $S_{\text{мик}}$ является метод субстрат-индуцированного дыхания (СИД). Он менее трудоемок, отличается высокой производительностью, а также менее субъективен по сравнению с люминесцентной микроскопией (Звягинцев, 1991; Гавриленко и др., 2011). Преимуществом метода СИД является также его широкое использование международным сообществом, что позволяет верифицировать данные, делает его удобным инструментом в экологических исследованиях (Курганова и др., 2021). Скорость базального дыхания (БД) отражает биологическую активность почвы и скорость минерализации ПОВ (Гавриленко и др., 2011; Курганова и др., 2021).

В условиях глобального изменения климата происходит изменение структурно-функциональной организации микробного сообщества, а также нарушение природных ритмов синтеза-распада ПОВ (Jansson, Hofmockel, 2020). Это становится триггером перераспределения углерода по трофическим цепям с уменьшением его иммобилизации в микробной биомассе (Medhi et al., 2021). Несмотря на то, что в литературе много данных о структуре микробной биомассы в почвах в различных экосистемах (Никитин и др., 2022; Zhelezova et al., 2024), лесным ценозам уделяется не так

много внимания (Tajik et al., 2020; Евдокимов и др., 2023; Mundra et al., 2021). В частности, несмотря на имеющиеся данные (Загуральская, 1993; Федорец, 1993; Федорец, 1993, 1997; Федорец, Бахмет, 2003; Медведева, Мошкина, 2004; Дубровина и др., 2021), масштабы и интенсивность процессов микробной трансформации углерода в таежных почвах Карелии до настоящего времени изучены не в полной мере. Вместе с тем использование различных методов и приемов позволяет независимо подтвердить получаемые результаты и выводы (Joergensen, Emmerling, 2006; Благодарская и др., 2016; Полянская и др., 2016; Семегов и др., 2019; Polyanskaya et al., 2020), более детально изучить особенности микробиоты почв. Почвы ненарушенных лесных экосистем могут быть эталоном качества природной среды, проведение исследований на которых наиболее ценно с точки зрения установления их нарушений в условиях глобального изменения климата.

Основная цель работы – провести оценку экологического состояния микробиоты почв ненарушенных сосняков черничных заповедника “Кивач” республики Карелия. Данная цель предусматривала решение следующих задач: установить биометрическую структуру прокариот и микроскопических грибов в исследуемых почвах; определить физиологические показатели микробиоты; провести сравнительный анализ микробиологических показателей в вертикально-ярусном распределении в почве и у разного возраста древостоев. Полученные данные могут быть использованы при мониторинговых исследованиях, являются основой при моделировании процессов круговорота углерода в альфегумусовых почвах лесных экосистем Восточной Фенноскандии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Общая характеристика рельефа, климата, почв и растительности. Исследование проводили на территории заповедника “Кивач”, расположенного в среднетаежной подзоне, в 45 км к северо-западу от Онежского озера на юге Карелии. Заповедник находится на высоте около 50–150 м над уровнем моря (Атлас, 2023). Исследуемый район входит в южный, наиболее теплый район Карелии. Температура самого холодного месяца составляет $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, самого теплого – $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность периодов со

среднесуточной температурой воздуха выше +15 °С составляет до 40 дней. Количество осадков выпадает до 700 мм в год. Средние температуры почв в июле достигают +17.0 °С. Количество дней с температурой выше +10 °С доходит до 120. На климат большое смягчающее влияние оказывает Онежское озеро и река Суна.

В геологическом плане территория представлена нерасчлененными гранитоидными породами и магматитами, а также песчано-галечными флювиогляциальными отложениями, которые могут залегать на каменистых моренных суглинках. В отдельных локусах представлены ленточные глины, создающие контрастность эдафических условий, в которых формируются лесные биогеоценозы (Демидов и др., 2006). Рельеф заповедника неоднородный, отмечается сочетание водно-ледникового и денудационно-тектонического; последний представлен грядово-холмистыми и грядовыми формами. Территория образована озерно-ледниковыми и озерными равнинами, нормально и кратковременно избыточно увлажненными, холмистыми, грядово-холмистыми.

Растительность заповедника представлена сосняками и ельниками, а на вырубках и залежах формируются березняки, осинники и ольшаники. В связи с неоднородностью рельефа почвенный покров также неоднороден. В автоморфных условиях распространены подзолы иллювиально-железистые, при увеличении гидроморфизма встречаются подзолы иллювиально-гумусовые, в условиях повышенного увлажнения – почвы гидроморфного ряда. Текстурно-дифференцированные почвы формируются на глинах, также встречаются пелоземы. Последние имеют слабодифференцированный профиль, который состоит из подстильно-торфяного горизонта, залегающего непосредственно на рыхлых отложениях тяжелого гранулометрического состава.

В рамках работы научного консорциума “РИТМ углерода” для создания Российской системы климатического мониторинга на территории заповедника “Кивач” был организован тестовый полигон и заложено 30 постоянных пробных площадей в различных условиях фитоценотической среды. Была проведена детальная инвентаризация древостоев и почв: выделены наиболее представленные типы биогеоценозов (БГЦ), определены основные химические свойства почв. Результаты показали, что доминирую-

щими БГЦ на исследуемой территории являются сосняки черничные, сформировавшиеся на подзолах иллювиально-железистых. Высокая представленность сосняков черничных в общем лесном фонде заповедника определила выбор участков для исследования. Таксационная характеристика древостоя приводится в таблице 1.

На исследуемых участках под черничным древостоем сформировались подзолы иллювиально-железистые песчаные (Albic Podzols), которые также широко распространены на заповедной территории. На каждой пробной площади производили отбор почв по генетическим горизонтам. Основные характеристики почв изучаемых участков представлены в таблице 2.

Методы исследования. В отобранных образцах определяли следующие основные показатели.

Кислотность почвы ($pH_{\text{вод}}$) определяли потенциометрическим методом (Hanna, Vöhringen, Germany).

Содержание углерода и азота в почве определяли на элементном анализаторе (CHNS/O-анализатор 2400 Series II (PerkinElmer, США) с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” Института леса КарНЦ РАН.

Биомасса прокариот. Общая численность прокариот определена с помощью метода прямой микроскопии с использованием люминесцентного микроскопа Zeiss Axioskop 2 plus (Германия) (объектив $\times 100$, масляная иммерсия). Пробу почвы массой 1 г помещали в колбу со 100 мл стерильной воды, которую обрабатывали ультразвуком, используя прибор “УДНЗ-1” (2 мин., 22 кГц, 0.44 А). Последующую окраску препаратов (акридин оранжевый) проводили по указанной методике (Звягинцев, 1991).

Расчет количества бактериальных клеток на 1 г субстрата производили по формуле (1):

$$N = S_1 \times a \times n / V \times S_2 \times C, \quad (1)$$

где N – число клеток на 1 г субстрата; S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – количество клеток в одном поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n – показатель разведения бактериальной смеси (мл); V – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); c – навеска субстрата (1 г).

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев изучаемых участков заповедника “Кивач”
Table 1. Physico-chemical properties of soils of pine stands of the Kivach Nature Reserve

Показатели	П1 (ПП38*)	П2 (ПП44*)	П3 (ПП154*)	П4 (ПП155*)	П5 (ПП260*)
Координаты участка	34.005173 E 62.296131 N	34.007860 E 62.295752 N	34.016199 E 62.288599 N	34.003476 E 62.288602 N	34.018098 E 62.281753 N
Тип леса	Сосняк черничный	Сосняк черничный	Сосняк черничный	Сосняк черничный	Сосняк брусничный
Возраст древостоя	190	190	190–240	180–280	180
Состав древостоя	9.3 С 0.4Е	10 С	9.2 С	9.6 С	10 С
Класс бонитета	II	III	IV	I	III

Примечание. * – в скобках приводится номер постоянной пробной площади (ППП) на территории тестового полигона, заложенного в рамках Важнейшего Инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (Консорциум № 4 “Углерод в экосистемах: мониторинг”, Соглашение № ВИП ГЗ/24-4 от 11 марта 2024 г.).

Note. * – the number in brackets is the number of the permanent sample area (PSA) on the territory of the test site established within the framework of the Most Important Innovative Project of State Importance “Unified National System for Monitoring of Climate Active Substances” (Consortium No. 4 “Carbon in Ecosystems: Monitoring”, Agreement No. VIP GZ/24-4, 11 March, 2024).).

Таблица 2. Физико-химические свойства почв сосновых древостоев заповедника “Кивач”

Table 2. The structure of microbial biomass of soils of the studied pine stands of the Kivach Nature Reserve

Гори- зонт почв	Мощность горизонтов почв, см	pH _{H2O}	C, %	N, %	C/N
Π1					
OL	0–1	4.56	51.4	2.3	22.3
OFH	1–6	3.85	40.0	1.7	23.5
Ehi	3–5(8)	3.95	2.9	0.4	7.3
BF	5(8)–27(30)	5.39	0.5	0.1	5.0
B2	27(30)–46	5.38	0.2	0.1	2.0
BC1	46–64(68)	5.07	0.1	0.0	–
Π2					
OL	0–1	4.18	55.5	2.5	22.2
OFH	1–5	4.12	41.0	1.8	22.7
E	5–8	4.20	0.7	0.1	7.0
BF	8–13(23)	4.60	0.8	0.0	–
B2	13(23)–40	5.25	0.2	0.1	2.0
B2	40–60	–	0.1	0.1	1.0
BC	60–75	5.57	0.2	0.1	2.0
Π3					
OL	0–1	4.33	53.8	1.5	35.9
OF	1–5	3.97	50.1	1.2	41.8
OH	5–7	3.7	39.2	1.0	39.2
Ehi	7–12	4.21	1.1	0.3	3.7
BF1	12–14(16)	4.84	0.8	0.2	4.0
BF2	14(16)–22(24)	5.30	0.4	0.1	4.0
Π4					
OL	0–1	4.48	51.0	0.9	57.7
OF	1–7	3.80	45.0	1.0	45.0
E	7–12(14)	4.54	0.4	0.0	–
BF1	12(14)–23	5.27	0.4	0.1	4.0
BF2	23–37	5.98	0.2	0.0	–
Π5					
OL	0–3	4.23	51.4	1.1	46.7
OF	3–10	3.75	36.9	1.4	26,4
E	10–13	4.36	2.3	0.0	–
B2	30–60	5.50	0.2	–	–

Длину актиномицетного мицелия в 1 г образца (NMA) определяли по формуле (2):

$$NMA=S_1 \times a \times n / v \times S_2 \times c \times 10^6, \quad (2)$$

где: S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – средняя длина фрагментов актиномицетного мицелия в поле зрения (мкм); n – показатель разведения суспензии (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); c – навеска образца (г).

Биомасса грибов. Численность грибных пропагул и длину грибного мицелия определяли методом люминесцентной микроскопии на микроскопе Zeiss Axioskop 2 plus (Германия) при увеличении 400. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи вортекса “MSV-3500” (Латвия) при скорости 3 500 об./мин. в течение 10 мин. Препараты почвенной суспензии (разведение 1 : 100) окрашивали флуоресцентным красителем (калькофлуором белым), согласно методике (Звягинцев, 1991). Расчет количества грибных клеток на 1 г субстрата производили по формуле (3):

$$M=((4 \times a \times n) / p) \times 10^{10}, \quad (3)$$

где M – количество клеток в 1 г почвы; a – среднее число клеток в поле зрения; p – площадь поля зрения (мкм^2); n – показатель разведения.

Длину грибного мицелия в 1 г образца (NMA) определяли по формуле (4):

$$NMA=S_1 \times a \times n / v \times S_2 \times c \times 10^6, \quad (4)$$

где: S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – средняя длина фрагментов мицелия в поле зрения (мкм); n – показатель разведения суспензии (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); c – навеска образца (г).

Расчет грибной биомассы (мг/г почвы) проводили, учитывая плотность спор равной 0.837 г/см^3 , плотность мицелия – 0.628 г/см^3 (Полянская, Звягинцев, 2005).

Субстрат-индуцированное (СИД) и базальное (БД) дыхание. Перед проведением определений СИД и БД образцы почвы

увлажняли до 50–55% полной влагоемкости и инкубировали в течение 7 суток при +20–22 °С. СИД почв оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения образца глюкозой (Гавриленко и др., 2011; Семенов и др., 2013). Навеску почв (1 г) помещали в пенициллиновый флакон (объем 10 мл), добавляли раствор глюкозы (по 10 мг сахара на каждый грамм почвы), герметично закрывали и фиксировали время. По окончании инкубации (4 ч, t +22 °С) исследовали газовую фазу (фиксируя время отбора) флакона с помощью газоанализатора LI-COR “LI-850” для определения концентрации CO₂. Скорость БД соответствовала средней скорости выделения CO₂ почвой за 24 ч. инкубации при температуре 22 °С и 60% полной влагоемкости (Гавриленко и др., 2011). Измерения скорости БД проводили аналогично тому, как определяли СИД, только вместо раствора глюкозы в почву вносили воду (0.2 мл/г почвы).

Скорость базального дыхания рассчитывается по формуле (5):

$$\text{БД} = \frac{(\text{CO}_2\text{почва} - \text{CO}_2\text{воздух}) \times V_{\text{фл}} \times 60 \times 10}{\Delta t \times m_{\text{асп}}} \times 0.272 \times 1.8177, \quad (5)$$

где БД – скорость базального дыхания почвы (мкг С г⁻¹ ч⁻¹), CO₂ почва – концентрация CO₂ в газовой фазе флакона с почвой (% объемный); CO₂воздух – концентрация CO₂ в газовой фазе пустого флакона (% объемный); V_{фл} – объем воздушного пространства во флаконе с навеской почвы (мл); 60 – пересчет мин. в час; 10 – остаточное значение после сокращения при вычислении: 1000 (пересчет мл в мкл) / 100 (переход из об. % в единицы); Δt – время от закрывания флакона до отбора газовой пробы, мин.; m_{асп} – масса абсолютно сухой навески почвы (г); 0.273 – содержание углерода в углекислом газе (соотношение массы С/CO₂ – 12/44); 1.8177 – удельный вес CO₂ при 22 °С (г л⁻¹).

На основании результатов определения скоростей БД и СИД рассчитывали “метаболический” или “дыхательный” коэффициент согласно формуле (6):

$$q\text{CO}_2 = \text{БД} / \text{СИД} \quad (6).$$

Статистическую обработку результатов исследований про-

водили с использованием общепринятых программ. Для упорядочивания объектов (ПП) в сравнительно однородные группы использовали кластерный анализ. Для установления статистических различий между данными о микробоценозе почв, полученными на исследуемых участках, был применен анализ основных компонент (РСА), который позволил выявить тенденции изменения в основных характеристиках почвы, которые могут быть представлены широким спектром переменных. Статистический анализ полученных данных проводили с использованием статистического программного обеспечения Statistical 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарная биомасса микроорганизмов (грибов и бактерий) варьировала от 0.021 до 2.225 мг/г почвы (рис. 1). Минимальные значения были выявлены в минеральных горизонтах почв всех пробных площадей, а максимальные – в подстилке. При этом выявлено экспоненциальное снижение биомассы микроорганизмов вниз по профилю. В отдельных профилях почв (П2, П4, П5) более высокие показатели микробной биомассы отмечены в ферментативно-гумусовом подгоризонте (OFH) подстилки по сравнению с листовым (OL). В целом микробная биомасса почвы снижалась в следующем ряду пробных площадей: П4 > П5 > П3 > П1 > П2.

Основную часть (от 95.4 до 99.6%) биомассы микроорганизмов в изученных почвах составляли грибы (рис. 2). Минимальная доля грибов (95–97%) выявлена в элювиальных горизонтах, максимальная (98–100%) – в лесной подстилке. В целом доля микобиоты для большинства исследованных профилей почв снижалась от верхних к нижним горизонтам почв.

Биомасса грибов варьировала от 0.014 до 1.528 мг/г почвы (табл. 2). Максимум биомассы грибов типичен для поверхностных органогенных горизонтов (лесных подстилок). Наименьшие значения данного показателя характерны для минеральных горизонтов почв, где содержание органического углерода ($C_{орг}$) низкое. В общем биомасса микобиоты снижалась в ряду пробных площадей: П5 > П3 > П4 > П1 > П2.

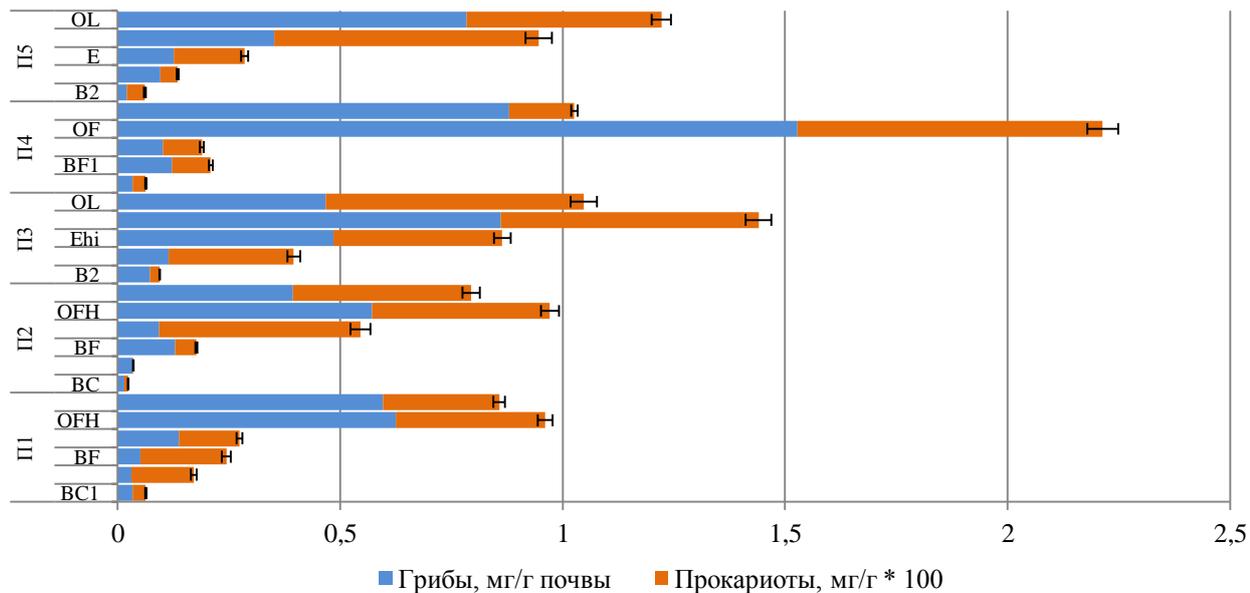


Рис. 1. Распределение биомассы микроорганизмов по профилю подзолов иллювиально-железистых заповедника “Кивач” в сосновых древостоях различного бонитета.

Fig. 1. Biomass of microorganisms in the illuvial-ferruginous podzols of the Kivach Nature Reserve in the studied pine stands of various quality classes.

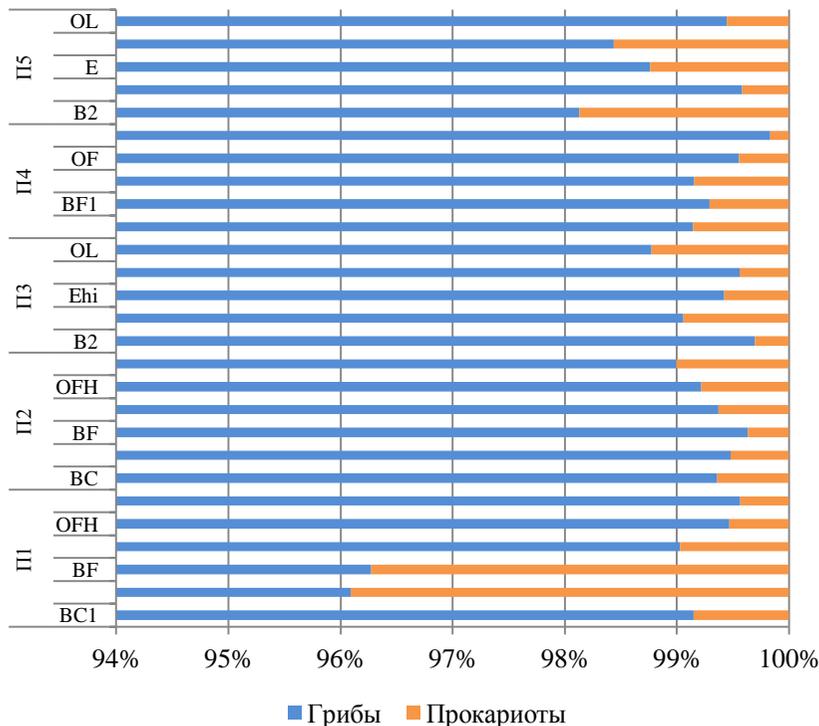


Рис. 2. Доля прокариот и грибов в микробной биомассе подзолов иллювиально-железистых заповедника “Кивач” в сосновых древостоях различного бонитета.

Fig. 2. The proportion of prokaryotes and fungi in the microbial biomass in the illuvial-ferruginous podzols of the Kivach Nature Reserve in the studied pine stands of various quality classes.

Биомасса микобиоты состояла из мицелия (активного компонента грибной биомассы) и спор (покоящиеся клетки) (табл. 2). Доля мицелия в грибной биомассе варьировала в широком диапазоне от 12.1 до 78.2%. Максимальные значения характерны для большинства образцов подстилки и элювиальных горизонтов. Для основной части образцов доля мицелия грибов составляла от 30 до 60%.

Таблица 2. Структура микробной биомассы почв заповедника “Кивач” в сосновых древостоях различного бонитета

Table 2. The structure of microbial biomass of soils in the Kivach Nature Reserve in the studied pine stands of various quality classes

№III горизонт почв		Биометрические параметры грибов							
		длина мице- лия	биомас- са мице- лия	биомасса спор				доля мицелия грибов	доля спор грибов
				2 мкм	3 мкм	5 мкм	7мкм		
		мкм	мг/г почвы						%
П1	OL	194.47	0.26	0.03	0.08	0.06	0.17	44.4	55.6
	OFH	196.31	0.26	0.05	0.09	0.02	0.19	42.8	57.1
	Ehi	79.04	0.11	0.02	0.02	0	0	78.3	21.7
	BF	16.54	0.03	0.02	0.03	0	0	46.0	54.0
	BF2	10.26	0.013	0.01	0.01	0	0	42.3	57.6
	BC1	8.09	0.01	0.005	0.005	0.01	0	32.6	67.3
П2	OL	175.77	0.24	0.04	0.05	0.07	0.19	60.7	39.3
	OFH	330.02	0.42	0.05	0.09	0.001	0	73.2	26.8
	E	26.07	0.03	0.03	0.03	0	0	35.6	64.4
	BF	63.48	0.08	0.02	0.03	0	0	62.2	37.8
	B2	3.17	0.004	0.01	0.02	0	0	12.1	87.8
	BC	0	0	0.003	0.01	0	0	0	100

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№ПП горизонт почв		Биометрические параметры грибов							
		длина мице- лия	биомас- са мице- лия	биомасса спор				доля мицелия грибов	доля спор грибов
				2 мкм	3 мкм	5 мкм	7 мкм		
		мкм	мг/г почвы						%
ПЗ	OL	130.4	0.18	0.03	0.08	0.06	0.12	39.1	60.8
	OFH	405.48	0.56	0.04	0.06	0.03	0.17	66.1	33.8
	Ehi	262.63	0.37	0.03	0.03	0.06	0	76.2	23.7
	BF	37	0.05	0.02	0.04	0	0	45.8	54.2
	B2	30.04	0.04	0.02	0.02	0	0	58.3	41.6
П4	OL	374.77	0.52	0.04	0.06	0.07	0.19	59.6	40.3
	OF	678.29	0.95	0.05	0.10	0.12	0.31	62.0	37.9
	E	35.72	0.06	0.01	0.03	0	0	59.8	40.1
	BF1	40.56	0.069	0.02	0.04	0	0	56.6	43.4
	BF2	9.68	0.016	0.01	0.01	0	0	47.6	52.4
П5	OL	317.58	0.525	0.05	0.11	0.04	0.07	66.7	33.0
	OFH	139.24	0.23	0.04	0.08	0	0	65.4	34.5
	E	39.09	0.065	0.02	0.04	0	0	51.3	48.6
	BF	16.24	0.027	0.02	0.05	0.01	0	28.4	71.5
	B2	5.67	0.009	0.01	0.004	0	0	42.9	57.1

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№ПП. горизонт почв		Биометрические параметры прокариот				
		Актиномицеты			Одноклеточные прокариоты	
		длина мицелия	масса мицелия	доля мицелия	масса	доля
		мкм	мг/г почвы	%	мг/г почвы	%
П1	OL	12.37	0.18	6.7	2.43	93.2
	OFH	28.18	0.94	27.9	2.42	72.1
	Ehi	8.12	0.27	20.0	1.08	80.0
	BF	12.37	0.18	9.0	1.76	90.9
	BF2	1.69	0.02	1.9	1.22	98.1
	BC1	0	0	0	0.29	100
П2	OL	103.66	1.46	36.5	2.54	63.5
	OFH	148.91	2.11	46.5	2.42	53.5
	E	11.84	0.17	28.4	0.42	71.6
	BF	15.24	0.22	45.3	0.26	54.7
	B2	2.32	0.03	19.1	0.14	80.9
	BC	0	0	0	0.09	100
П3	OL	81.19	1.14	19.7	4.66	80.3
	OFH	41.94	0.09	2.3	3.71	97.7

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№ПП. горизонт почв		Биометрические параметры прокариот				
		Актиномицеты			Одноклеточные прокариоты	
		длина мицелия	масса мицелия	доля мицелия	масса	доля
		мкм	мг/г почвы	%	мг/г почвы	%
	Eh1	16.64	0.55	19.5	2.27	80.5
	BF	0	0	0	1.08	100
	B2	4.94	0.16	72.7	0.06	27.3
П4	OL	78.52	1.11	75.5	0.36	24.5
	OF	448.3	6.31	92.0	0.55	8.1
	E	16.92	0.24	27.6	0.63	72.4
	BF1	1.69	0.02	2.8	0.85	97.3
	BF2	0	0	0	0.29	100
П5	OL	119.98	1.69	38.7	2.68	61.3
	OFH	167.86	2.36	42.2	3.23	57.8
	E	32.69	0.46	28.9	1.13	71.1
	BF	17.41	0.25	46.7	1.31	53.3
	B2	0	0	0	0.4	100

Длина грибных гиф изменялась в очень широком диапазоне от 3.17 до 678 м/г почвы. Минимальные значения длины мицелия микобиоты отмечены для более глубоких почвенных горизонтов, максимальные – для лесных подстилок. В целом длина гиф грибов снижалась в следующем ряду пробных площадей: П5 > П3 > П4 > П1 > П2. Интересно отметить, что в минеральном горизонте (BC) почв, сформировавшихся на П2, мицелий грибов не выявлен. Их распределение в различных горизонтах отличалось. В лесных подстилках (OL подгоризонт) выявлено превалирование спор, размер которых достигал 7 мкм. В остальных горизонтах до 59% всех обнаруженных гиф грибов были представлены тонкими (2–3 мкм в диаметре) формами. Численность одноклеточных грибных спор (спор и дрожжей) составляла 10^4 – 10^5 клеток/г субстрата. Споры были представлены тремя размерными группами – 2, 3 и 5 мкм. Среди них преобладали (67–81%) мелкие формы (размер 2 и 3 мкм); 71% всех спор были округлой формы с гладкой поверхностью, 14% – округлые и шероховатые; 6% – овальные с гладкой поверхностью, 9% имели овальную форму с неровностями. Количество крупных спор (диаметр 5 мкм) не превышало 10^2 – 10^3 клеток/г субстрата даже в лесных подстилках.

Численность клеток прокариот варьировала от 6.0×10^7 клеток/г почвы в минеральных горизонтах до 2.58×10^9 клеток/г почвы в лесных подстилках. В большинстве органогенных горизонтов почв (П2, П3 и П5) численность прокариот была максимальна в верхнем подгоризонте подстилки (OFH). Преобладающая часть исследуемых образцов (более 57% от всех) характеризовалась численностью прокариот порядка 10^7 клеток/г почвы. В целом численность клеток прокариот снижалась в следующем ряду пробных площадей: П4 > П2 > П1 > П5 > П3.

Биомасса прокариот составляла соответственно от 0.09 до 9.04 мкг/г почвы. Более глубокие минеральные горизонты содержали десятые доли мкг/г почвы прокариот, а поверхностные органогенные слои – единицы мкг/г почвы. Наибольшие показатели отмечены для подстилок, наименьшие показатели – для элювиальных горизонтов. Биомасса прокариот была представлена одноклеточными формами и мицелием актиномицетов. Их доля варьировала от 8.0 до 98.1% и от 1.9 до 92% соответственно. Для боль-

шинства почв доля мицелия актиномицетов не превышала 20–50%. Основная часть мицелия актиномицетов сосредоточена в подстилках, где она составляла 70–98%. В наиболее глубоких минеральных горизонтах биомасса прокариот была представлена одноклеточными формами, составляющими 90–100%.

Длина мицелия актиномицетов составляла от 1.69 м/г почвы в элювиальных и иллювиальных горизонтах до 448 м/г почвы в подстилках. Для большинства исследуемых образцов длина гиф актиномицетов составляла не более 10–80 м/г почвы. В целом их длина снижалась в следующем ряду пробных площадей: П5 > П3 = П2 > П4 > П1. Необходимо подчеркнуть, что мицелий актиномицетов не выявлен в наиболее глубоких минеральных горизонтах почв всех пробных площадей.

Базальное дыхание (БД) почв изменялось от 0.1 до 39.6 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г/час}$ (рис. 3). Минимальные значения (десятые доли мкг $\text{CO}_2\text{-C/г/час}$) выявлены в минеральных горизонтах почв всех исследуемых пробных площадей, а максимальные (единицы и десятки мкг $\text{CO}_2\text{-C/г/час}$) – в подстилке. Таким образом, установлено экспоненциальное снижение значений скорости БД от поверхностных горизонтов к глубинным. В целом скорость БД снижалась в следующем ряду пробных площадей: П4 > П2 > П1 > П5 > П3.

Микробная биомасса, определенная методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), изменялась от 138 до 11 342 мкг С/г почвы (рис. 3). Наименьшая биомасса (сотни мкг С/г почвы) обнаружена в минеральных горизонтах почв всех пробных площадей, а наибольшая – в подстилке. Таким образом выявлено экспоненциальное снижение углерода микробной биомассы от поверхностных горизонтов почв к глубинным. В общем значения СИД снижались в ряду пробных площадей: П4 > П1 > П2 > П3 > П5.

Метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$). Значения метаболического коэффициента ($q\text{CO}_2$) изменялись от 0.62 до 4.41 (рис. 3). Минимальные значения (десятые доли) выявлены в элювиальных и иллювиальных горизонтах, а максимальные – в подстилке.

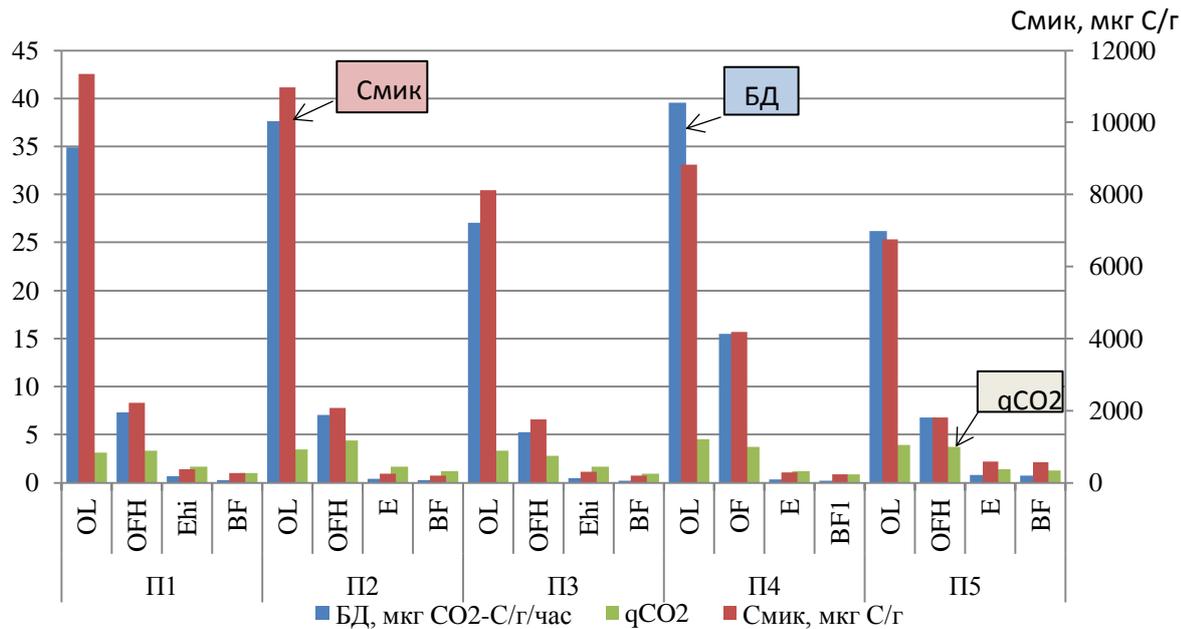


Рис. 3. Экофизиологические параметры состояния микробного сообщества подзолов иллювиально-железистых заповедника “Кивач” в сосновых древостоях различного бонитета.

Fig. 3. Ecophysiological parameters of the state of the microbial community in the illuvial-ferruginous podzols of the Kivach Nature Reserve in the studied pine stands of various quality classes.

Полученные значения содержания *микробной биомассы по методу люминесцентной микроскопии* сопоставимы с результатами для дерново-подзолистых почв, сформировавшихся под лесной растительностью Подмоскovie (Ананьева и др., 2010; Семенов и др., 2010). Однако полученные данные в 2 раза выше по сравнению с таковыми для почв полуострова Рыбачий, расположенного в Мурманской области (Korneykova et al., 2023). Основная часть микробной биомассы (от 95.4 до 99.6%) всех исследованных объектов заповедника “Кивач” представлена грибами. Это характерно для большинства зональных почв (Li, Dick, 2004; Никитин и др., 2023), которые характеризуются низкими значениями рН, невысокой емкостью катионного обмена и низким содержанием элементов питания. Процессы почвообразования происходят под влиянием опада растений, кислотообразуемые продукты минерализации которого оказывают разрушающее действие на минеральную толщу почв, определяя направленность подзолообразования. При этом биопленки, которые формируются на поверхности почвенных частиц, являются средой обитания микроорганизмов. Микробная биомасса, определяемая по методу люминесцентной микроскопии, позволила установить количественные показатели биологического матрикса, адсорбцию клеток на поверхности почвенных частиц. Было установлено, что биомасса в пересчете на органический углерод составляла от 11 до 750 мкгС/г почвы.

Ввиду того, что большая часть микробной биомассы в исследуемых объектах представлена грибами, основные закономерности ее вертикального и горизонтального распределения справедливы для биомассы микобиоты. В исследованных объектах заповедника “Кивач” биомасса грибов была в 1.5–2 раза больше, по сравнению с почвами полуострова Рыбачий (Korneykova et al., 2023), и в 3 раза выше, чем в зоне воздействия выбросов горно-металлургического комбината Печенганикель (Корнейкова, Никитин, 2023), а также почв города Апатиты Мурманской области (Korneykova et al., 2022). Преобладание в микробной биомассе грибов и высокие значения отношения грибы : прокариоты характерны для почв с большим секвестрирующим потенциалом и низким отношением C:N, а уменьшение этого отношения свидетельствует о малой секвестрации углерода (Семенов и др., 2023; Ники-

тин и др., 2023).

Обычно микобиота в почве преимущественно состоит из мицелия (Polyanskaya et al., 2020). Однако образцы минеральных горизонтов исследуемых почв не содержали гиф, что может указывать на стрессовые условия в данных локусах (Wang et al., 2017; Joshi et al., 2021). Основная часть (до 72%) грибного мицелия была представлена тонкими формами до 3 мкм в диаметре, что характерно для субарктических регионов и, вероятно, является адаптацией к экстремальным условиям. В ходе исследования было выявлено мало гиф с базидиомицетными пряжками, что косвенно свидетельствует о низкой доле микоризных симбиозов и представителей отдела Basidiomycota (Wang et al., 2017) в почвах данного генезиса.

Эколого-эдафические условия, которые формируются в различных горизонтах почв, оказывают разное влияние на активность микроорганизмов. В минеральных горизонтах BF2 (П1) и BC (П2) среди одноклеточных пропагул были обнаружены округлые и продолговатые клетки. Судя по их специфической морфологии и почкованию, клетки являются дрожжами – одной из типичных жизненных форм грибов в полярных регионах (Buzzini et al., 2018). Как известно, неспецифичная морфология часто не позволяет достоверно отличить клетки дрожжей от покоящихся пропагул (спор, конидий и др.) (Никитин и др., 2017), однако методом посева было установлено присутствие дрожжей в микоценозе альфе-гумусовых почв.

Численность одноклеточных прокариот в проанализированных почвах заповедника “Кивач” на порядок была выше, по сравнению со значениями для почв полуострова Рыбачий (Korneukova et al., 2023), почв зоны воздействия выбросов горно-металлургического комбината Печенганикель (Корнейкова, Никитин, 2023) и почв города Апатиты Мурманской области (Korneukova et al., 2022). Этого следовало ожидать, так как в данных биогеоценозах процессы трансформации органического вещества идут более глубоко, роль прокариотического звена трофической цепи возрастает.

В исследованных почвах выявили присутствие актиномицетов, которые редко обнаруживаются при посеве на элективные

питательные среды. Как известно, мицелиальные прокариоты способны утилизировать трудногидролизуемые соединения. В этой связи их выявление в составе микробиоценоза дает ценную информацию о важнейших этапах преобразования вещества, например, дублированности процессов, происходящих в почве.

Базальное дыхание (БД) в проанализированных образцах почв по порядку значений было сходным с таковым для аналогичных почв заповедника “Кивач” (Мамай, Мошкина, 2016), однако в 10 раз меньше для подстилично-торфяных горизонтов почв Центральной Сибири (Grodnitskaya et al., 2013). Биомасса микроорганизмов, определенная методом СИД, для исследованных объектов соответствует по порядку значений таковой для аналогичных почв заповедника “Кивач” (Мамай, Мошкина, 2016), однако в 5 раз больше, по сравнению со значениями для почв лесных экосистем заповедника “Пасвик” в Кольской субарктике (Кадулин и др., 2017). Это еще раз подтверждает, с одной стороны, общий план строения микробиоценоза почв, а с другой, указывает на специфику микробного сообщества различных генетических горизонтов почв, сформировавшихся в условиях бореального пояса.

Влияние экологических условий на микробиоценоз можно проследить на основе анализа активности почвенной микробной биомассы. В изучаемых почвах значения БД и СИД микробиоты почв резко уменьшаются с увеличением глубины по почвенному профилю. Как известно, лимитирующим фактором развития микроорганизмов в почве является содержание элементов питания, температура, влажность и кислород. Возможно, что влияние на данные показатели оказывают снижение концентрации кислорода (Rusakov et al., 2019) и $C_{орг}$ (Santruckova et al., 2018). Максимальные значения БД и СИД выявлены в верхнем органогенном горизонте почв, что может быть обусловлено высоким содержанием в них $C_{орг}$ и повышенной температурой поверхностных горизонтов. Данные факторы могут существенно увеличивать микробиологическую активность и микробную биомассу в холодных субарктических экосистемах (Кадулин и др., 2017). Ввиду того, что распределение биомассы грибов по методу люминесцентной микроскопии хорошо коррелирует с пиками эмиссии CO_2 , предполагаем, что основной вклад в БД и СИД вносят именно грибы (Ananyeva et

al., 2018).

Важное значение для установления вклада гетеротрофов в круговорот углерода в почве имеет “метаболический” коэффициент (qCO_2). Он хорошо отражает эффективность преобразования гетеротрофными микроорганизмами $C_{орг}$ в микробную биомассу (Ананьева и др., 2010), поэтому может быть использован в качестве индикатора изменений качества почвы (Никитин и др., 2022). Результаты еще раз подтвердили, что в лесных почвах имеет место выраженное гетеротрофное преобразование растительных субстратов, поступающих на почву. Величина qCO_2 и скорость минерализации $C_{орг}$ в почве имеют решающее значение для характеристики углеродного цикла в наземных экосистемах (Гавриленко и др., 2011; Ананьева и др., 2010).

Для выделения в многомерном пространстве изучаемых признаков в отдельные группы использовали кластерный анализ, на основании которого построена дендрограмма взаимодействия признаков (рис. 4). Полученные данные показали, что пробные площади можно условно разделить на два основных кластера. В первый кластер выделена площадка П4 – высокобонитетный сосняк черничный. Во второй кластер определены площадки П1, П2, П3, П5, бонитет которых ниже. При этом второй кластер разделяется на два подкластера с группами П3 и П5, а также П1 и П2. Следует отметить, что эдафические условия и микробиологические показатели исследуемых участков практически не реагировали на продуктивность древостоя, изменение возрастной структуры, а также переход в климаксную фазу развития. Изменения были отмечены только при сравнении микробиологических характеристик почв в вертикально-ярусном континууме и различных горизонтов почв сосновых древостоев различной продуктивности.

Для комплексного и системного изучения и измерения воздействия факторов на величину результативного показателя, получения количественной и качественной оценки взаимодействия эдафо-фитоценологических показателей использовали метод многомерной статистики (рис. 5).

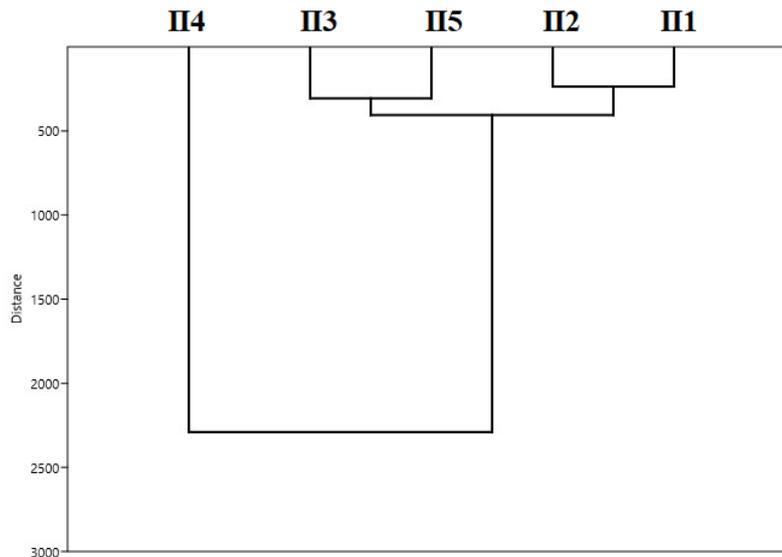


Рис. 4. Дендрограмма взаимодействий физико-химических и микробиологических свойств почв, сформировавшихся в различных условиях фитоценотической среды.

Fig. 4. A dendrogram of interactions of physico-chemical and microbiological properties of soils formed under various conditions of the phytocenotic environment.

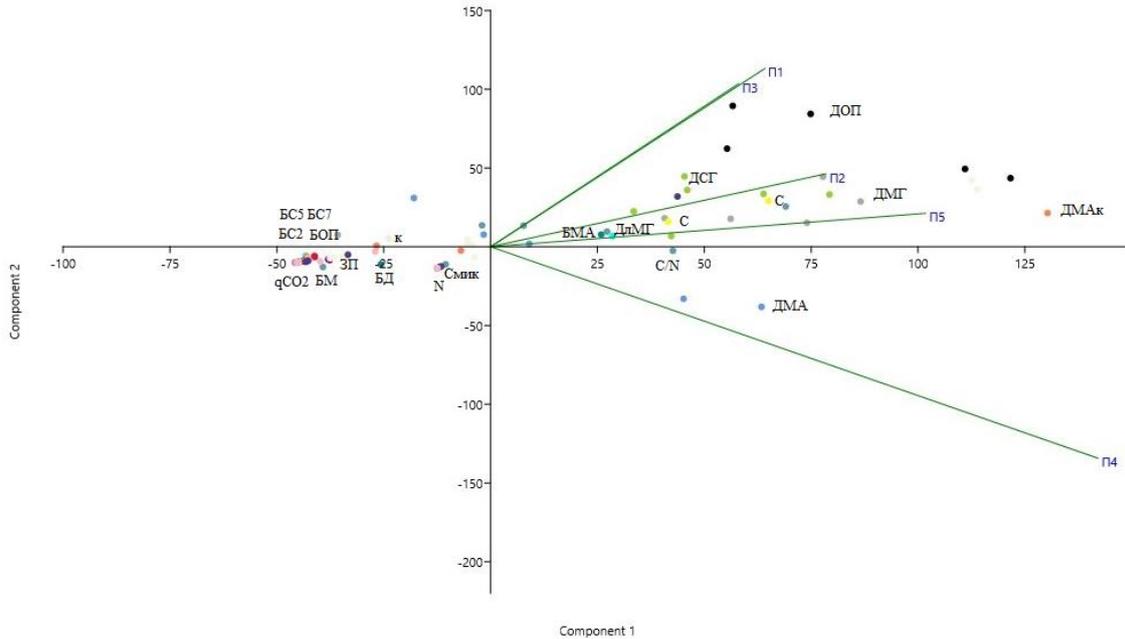


Рис. 5. Результаты многомерного анализа данных (РСА) исследуемых показателей почв сосняков черничных.
Fig. 5. Results of multivariate data analysis of the investigated soil indicators of blueberry pine forests.

На рисунке 5: ДлМГ – длина мицелия грибов, БМ – биомасса грибов, БС2 – биомасса спор грибов <2 мкм, БС3 – биомасса спор грибов <3 мкм, БС5 – биомасса спор грибов <5 мкм, БС7 – биомасса спор грибов <7 мкм, ДМГ – длина мицелия грибов, ДСГ – доля спор грибов, ДМА – длина мицелия актиномицетов, БМА – биомасса мицелия актиномицетов, БОП – биомасса одноклеточных прокариот, ДОП – доля одноклеточных прокариот, ДМА – доля мицелия актиномицетов, БД – базальное дыхание.

Используемые в работе химические и микробиологические показатели позволили воссоздать в факторном координатном пространстве облик изучаемого объекта и указать его характерные признаки и отличительные особенности. Выделены биометрические показатели (длина мицелия грибов и актиномицетов, доля грибов и актиномицетов, доля спор грибов, биомасса актиномицетов), расположенные справа от оси ОУ. Остальные характеристики, которые позволяют более “глубоко” проанализировать микробценоз, расположены слева от оси ОУ. Именно их можно рекомендовать использовать при оценке микробного сообщества почв ненарушенных лесных экосистем. Также анализ основных компонентов о данных свойствах почв позволил идентифицировать благодаря близости точек в проекции РСА две области, которые имеют разные таксационные характеристики древостоя. На основании кластерного анализа это, как отмечено выше, ПП4 и ПП1, 2, 3, 5.

Таким образом, полученные данные еще раз продемонстрировали, с одной стороны, важность различных компонентов микробиоты в подзолообразовательном процессе, а, с другой, ее роль в установлении направленности трансформации органического вещества, элементом трофической цепи которой она является.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подзолы иллювиально-железистые, сформировавшиеся под сосняками черничными и имеющие альфегумусовый генезис, характеризуются высокой дифференциацией микробиологического профиля почв, в котором горизонты имеют отличающиеся биометрические и экофизиологические показатели микробного углерода и базального дыхания. В результате недостаточного поступ-

ления солнечной энергии в экосистему почвообразованием охвачена небольшая мощность почвенной толщи, а численность и активность микроорганизмов оказывается невысокой. В почвах лесных экосистем преобладают грибы, которые в агрессивных (кислых) эдафических для прокариот условиях являются главными эдификаторами микробиоценоза. Для исследованных объектов выявлено активное развитие мицелия актиномицетов, которые осуществляют глубокую трансформацию почвенного органического вещества. Высокие экофизиологические показатели микробиоты в подстилке обусловлены обильным и постоянным поступлением свежего опада. Полученные данные об углероде микробной биомассы и базальном дыхании могут быть использованы в качестве микробиологических показателей при моделировании процессов круговорота углерода в альфегумусовых почвах лесных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атлас Республики*. Петрозаводск: Версо, 2023. 48 с.
2. *Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В.* Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 243 с.
3. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 271 с.
4. *Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.
5. *Демидов И.Н., Лукашов А.Д., Ильин В.А.* Рельеф заповедника “Кивач” и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Тр. КарНЦ РАН. 2006. № 10. С. 22–23.
6. *Евдокимов И.В., Семенов М.В., Быховец С.С.* Ризосферный эффект и структура бактериального сообщества в горизонтах подзолистой почвы под растениями ели обыкновенной (*Picea abies* L.) // Почвоведение. 2023. № 1. С. 35–45. DOI: [10.31857/S0032180X22700010](https://doi.org/10.31857/S0032180X22700010).
7. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 60 с.
8. *Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института

имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).

9. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. № 108. С. 175–218. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-108-175-218](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218).

10. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М.* Глобальный климат и почвенный покров-последствия для землепользования России. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. № 107. 5–32. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32).

11. *Кадулин М.С., Смирнова И.Е., Копцик Г.Н.* Эмиссия диоксида углерода почвами лесных экосистем заповедника “Пасвик” в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1098–1112.

12. *Корнейкова М.В.* Почвенный микробиом в зоне воздействия выбросов горно-металлургического комбината Печенганикель (Мурманская область) // Почвоведение. 2023. № 5. С. 676–688. DOI: [10.31857/S0032180X22600883](https://doi.org/10.31857/S0032180X22600883).

13. *Курганова И.Н., Телеснина В.М., Личко В.И., Караванова Е.И.* Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303.

14. *Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Белобров В.П.* Изменение почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при разных способах обработки почвы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 35–61. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).

15. *Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М.* Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования. Бюллетень Почвенного института имени ВВ Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 79–127. DOI: [10.19047/0136-1694-2024-118-79-127](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127).

16. *Мамай А.В., Мошкина Е.В.* Влияние урбанизации на показатели биологической активности микробного сообщества автоморфных лесных почв Карелии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. №. 11–6. С. 1094–1099.

17. *Медведева М.В., Бахмет, О.Н., Ананьев В.А., Мошников С.А., Мамай*

- А.В., Мошкина Е.В., Тимофеева В.В.* Изменение биологической активности почв в хвойных насаждениях после пожара в средней тайге Карелии // Лесоведение. 2020. № 6. С. 560–574.
18. *Медведева М.В., Мошкина Е.В., Геникова Н.В., Карпечко А.Ю., Туюнен А.В., Мамай А.В., Кулакова Л.М.* Биологическая активность почвы в условиях изменения режима землепользования в нечерноземной зоне России // Плодородие. 2022. № 3(126). С. 71–76.
19. *Никитин Д.А., Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К., Никитина С.А., Семенов М.В., Кутковая О.В.* Сезонная динамика биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1356–1364.
20. *Никитин Д.А., Садыкова В.С., Куварина А.Е., Дах А.Г., Бирюков М.В.* Ферментативная и антимикробная активность полярных штаммов почвенных микроскопических грибов // Микология и фитопатология. 2021. С. 16.
21. *Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И.* Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. DOI: [10.31857/S0032180X22020095](https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095).
22. *Никитин Д.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Тхакахова А.К., Русакова И.В., Лукин С.М.* Влияние внесения соломы на состояние микробиома дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2023. № 5. С. 640–653. DOI: [10.31857/S0032180X22601189](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601189).
23. *Полянская Л.М., Приходько В.Е., Ломакин Д.Г., Чернов И.Ю.* Численность и биомасса микроорганизмов в древних погребенных и современных черноземах разного землепользования // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1191–1204.
24. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: Геос, 2015. 233 с.
25. *Семенов М.В., Стольникова Е.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В.* Структура микробного сообщества почвы катены правобережья р. Оки // Известия РАН. Серия биологическая. 2013. №3. С. 299–308. DOI: [10.7868/S0002332913030089](https://doi.org/10.7868/S0002332913030089).
26. *Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л.* Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах правобережья р. Оки // Почвоведение. 2019. № 8. С. 974–985.
27. *Семенов М.В., Никитин Д.А., Степанов А.Л., Семенов В.М.* Структура бактериальных и грибных сообществ ризосферного и внекорневого локусов серой лесной почвы // Почвоведение. 2019. № 3. С. 355–369. DOI: [10.1134/S0032180X19010131](https://doi.org/10.1134/S0032180X19010131).
28. *Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Никитин Д.А., Степанов А.Л.,*

- Семенов В.М. Микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы и ее ризосферы в полувековом полевом опыте с применением разных систем удобрения // Почвоведение. 2023. № 6. С. 715–729. DOI: [10.31857/S0032180X22601220](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601220).
29. Семенов М.В., Кравченко И.К., Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Дулов Л.Е., Удальцов С.Н., Степанов А.Л. Потоки диоксида углерода, метана и закиси азота в почвах катены правобережья р. Ока (Московская область) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 582–590.
30. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Зинякова Н.Б., Лопес де Гереню В.О., Семенов М.В. Измерение почвенных пулов органического углерода, выделенных био-физико-химическими способами фракционирования // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1155–1172. DOI: [10.31857/S0032180X23600427](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427).
31. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521. DOI: [10.31857/S0032180X23600841](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841).
32. Чернов Т.И., Холодов В.А., Козут Б.М., Иванов А.Л. Методология микробиологических исследований почвы в рамках проекта “Микробиом России” // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 87. С. 100–113. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-100-113](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-100-113).
33. Чернов Т.И., Тхакахова А.К., Лебедева М.П., Железова А.Д., Бгажба Н.А., Кутовая О.В. Микробиомы контрастных по засолению почв солонцового комплекса волго-уральского междуречья // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1115–1124.
34. Ananyeva N.D., Castaldi S., Stolnikova E.V., Kudayarov V.N., Valentini R. Fungi-to-bacteria ratio in soils of European Russia // Arch. Agronomy Soil Sci. 2015. Vol. 61(4). P. 427–446. DOI: [10.1080/03650340.2014.940916](https://doi.org/10.1080/03650340.2014.940916).
35. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G., Simpson M.J. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter // Soil Biology and Biochemistry. 2021. Vol. 156. 108189.
36. Anthony M.A., Crowthe T.W., Maynard D.S., van den Hoogen J., Averill C. Distinct assembly processes and microbial communities constrain soil organic carbon formation // One Earth. 2020. Vol. 2. P. 349–360.
37. Buzzini P., Turchetti B., Yurkov A. Extremophilic yeasts: the toughest yeasts around? // Yeast. 2018. Vol. 35(8). P. 487–497. DOI: [10.1002/yea.3314](https://doi.org/10.1002/yea.3314).
38. Čapek P., Diáková K., Dickopp J. E., Bárta J., Wild B., Schneckner J., Šantrůčková H. The effect of warming on the vulnerability of sub ducted organic carbon in arctic soils // Soil Biology and Biochemistry. 2015. Vol. 90. P. 19–29.

39. Cui J., Zhu Z., Xu X., Liu S., Jones D.L., Kuzyakov Y., Shibistova O., Wu J., Ge T. Carbon and nitrogen recycling from microbial necromass to cope with C: N stoichiometric imbalance by priming // *Soil Biol. Biochem.* 2020. Vol. 142. P. 107–320. DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.107720](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107720).
40. Grodnitskaya I.D., Karpenko L.V., Knorre A.A., Syrsov S.N. Microbial activity of peat soils of boggy larch forests and bogs in the permafrost zone of central Evenkia // *Eurasian Soil Sci.* 2013. Vol. 46(1). P. 61–73. DOI: [10.1134/S1064229313010043](https://doi.org/10.1134/S1064229313010043).
41. Guo Z., Wang Y., Wan Z., Zuo Y., He L., Li D., Xu X. Soil dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Global budget, spatial distribution and controls // *Global ecology and biogeography.* 2020. Vol. 29(12). P. 2159–2175.
42. Jansso J.K., Hofmocke K.S. Soil microbiomes and climate change // *Nature Reviews Microbiology.* 2020. Vol. 18(1). P. 35–46.
43. Joergensen R.G., Emmerling C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils // *Journal of plant nutrition and soil science.* 2006. Vol. 169. No. 3. P. 295–309.
44. Joergensen R.G., Wichern F. Alive and kicking: why dormant soil microorganisms matter // *Soil Biology and Biochemistry.* 2018. Vol. 116. P. 419–430.
45. Joshi S., Bajpai A., Johri B.N. Extremophilic fungi at the interface of climate change // *Fungi Bio-Prospect in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-technology.* London: Academic Press. 2020. P. 1–22. DOI: [10.1016/B978-0-12-821925-6.00001-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821925-6.00001-0).
46. Korneykova M.V., Vasenev V.I., Nikitin D.A., Dolgikh A.V., Soshina A.S., Myazin V.A., Nakhaev M.R. Soil microbial community of urban green infrastructures in a polar city // *Urban Ecosystems.* 2022. Vol. 25(5). P. 1399–1415.
47. Korneykova M.V., Myazin V.A., Fokina N.V., Chaporgina A.A., Nikitin D.A., Dolgikh A.V. Structure of microbial communities and biological activity in tundra soils of the Euro-Arctic region (Rybachy peninsula, Russia) // *Microorganism.* 2023. Vol. 11(5). P. 1352.
48. Li Y., Dick W.A., Tuovinen O.H. Fluorescence microscopy for visualization of soil microorganisms – a review // *Biology and fertility of soils.* 2004. Vol. 39(5). P. 301–311. DOI: [10.1007/s00374-004-0722-x](https://doi.org/10.1007/s00374-004-0722-x).
49. Liang C., Schimel J.D., Jastrow J.D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage // *Nature Microbiology.* 2017. Vol. 2. P. 17105.
50. Liang C. Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal // *Soil Ecology Letters.* 2020. Vol. 2. P. 241–254.

51. *Lundström U.S., van Breemen N., Bain D.* The podzolization process. A review // *Geoderma*. 2000. Vol. 94. P. 91–107.
52. *Mundra S., Kjønaas O.J., Morgado L.N., Krabberød A.K., Ransedokken Y., Kauserud H.* Soil depth matters: shift in composition and inter-kingdom co-occurrence patterns of microorganisms in forest soils // *FEMS Microbiology Ecology*. 2021. Vol. 6. P. 97.
53. *Paul E.A.* The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization // *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 98. P. 109–126.
54. *Polyanskaya L.M., Yumakov D.D., Tyugay Z.N., Stepanov A.L.* Fungi and Bacteria in the Dark-Humus Forest Soil // *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53(9). P. 1255–1259. DOI: [10.1134/S1064229320090124](https://doi.org/10.1134/S1064229320090124).
55. *Santruckova H., Kotas P., Barta J., Urich T., Capek P., Palmtag J.* Significance of dark CO₂ fixation in arctic soils // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 119. P. 11–21.
56. *Semenov M.V., Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V.* Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century // *Applied soil ecology*. 2018. Vol. 127. P. 8–18.
57. *Tajik S., Ayoub, S., Lorenz N.* Soil microbial communities affected by vegetation, topography and soil properties in a forest ecosystem // *Applied Soil Ecology*. 2020. Vol. 149. P. 306.
58. *Wang M., Tian J., Xiang M., Liu X.* Living strategy of cold-adapted fungi with the reference to several representative species // *Mycology*. 2017. Vol. 8(3). P. 178–188. DOI: [10.1080/21501203.2017.1370429](https://doi.org/10.1080/21501203.2017.1370429).
59. *Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y.* Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 162. 108422.
60. *Zhelezova A.D., Semenov V.M., Ksenofontova N.A., Krasnov G.S., Tkhakakhova A.K., Nikitin D.A., Semenov M.V.* Effects of distinct manure amendments on microbial diversity and activity in Chernozem and Retisol // *Applied Soil Ecology*. 2024. Vol. 193. P. 105152.

REFERENCES

1. *Atlas Respubliki* (Atlas of the Republic), Petrozavodsk: Verso, 2023, 48 p.
2. *Blagodatskaya E.V., Semenov M.V., YAKushev A.V., Aktivnost' i biomassa pochvennyh mikroorganizmov v izmenyayushchihsya usloviyah okruzhayushchej sredy* (Activity and biomass of soil microorganisms in changing environmental conditions), Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2016, 243 p.

3. Vorob'eva L.A., Himicheskij analiz pochv (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998, 271 p.
4. Gavrilenko E.G., Sus'yan E.A., Anan'eva N.D., Makarov O.A., Prostranstvennoe var'irovanie soderzhaniya ugleroda mikrobnj biomassy i mikrobnj dyhaniya pochv yuzhnogo Podmoskov'ya (Spatial variation of carbon content of microbial biomass and microbial respiration of soils of the southern Moscow region), *Pochvovedenie*, 2011, No. 10, pp. 1231–1245.
5. Demidov I.N., Lukashov A.D., Il'in V.A., Rel'ef zapovednika “Kivach” i istoriya geologicheskogo razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v chetvertichnom periode (Relief of the Kivach reserve and the history of geological development of the Northwestern Prionezhye in the Quaternary period), *Tr. KarNC RAN*, 2006, No. 10, pp. 22–23.
6. Evdokimov I.V., Semenov M.V., Byhovec S.S., Rizosfernyj effekt i struktura bakterial'nogo soobshchestva v gorizontah podzolistoj pochvy pod rasteniyami eli obyknovennoj (*Picea abies* L.) (The rhizosphere effect and the structure of the bacterial community in the horizons of podzolic soil under plants of spruce (*Picea abies* L.), *Pochvovedenie*, 2023, No. 1, pp. 35–45, DOI: [10.31857/S0032180X22700010](https://doi.org/10.31857/S0032180X22700010).
7. Zvyagin'cev D.G., *Metody pochvennoj mikrobiologii i biohimii* (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1991, 360 p.
8. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., The Initiative “4 per mille” – a new global challenge for the soils of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 98, pp. 185–202, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).
9. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, No. 108, pp. 175–218, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-108-175-218](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218).
10. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M., Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, No. 107, pp. 5–32, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32).
11. Kadulin M.S., Smirnova I.E., Kopcik G.N., Emissiya dioksida ugleroda pochvami lesnyh ekosistem zapovednika “Pasvik” v Kol'skoj Subarktike (Carbon dioxide emission by soils of forest ecosystems of the Pasvik Nature Reserve in the Kola Subarctic), *Pochvovedenie*, 2017, No. 9, pp. 1098–1112.
12. Kornejkova M.V., Pochvennyj mikrobiom v zone vozdejstviya vybrosov gorno-metallurgicheskogo kombinata Pechenganikel' (Murmanskaya oblast') (Soil microbiome in the emission zone of the Pechenganikel Mining and

Metallurgical Combine (Murmansk region), *Pochvovedenie*, 2023, No. 5, pp. 676–688, DOI: [10.31857/S0032180X22600883](https://doi.org/10.31857/S0032180X22600883).

13. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lichko V.I., Karavanova E.I., Dinamika pulov ugleroda i biologicheskoy aktivnosti agrodernovo-podzolov yuzhnoj tajgi v hode postagrogennoj evolyucii (Dynamics of carbon pools and biological activity of agrodernovo-podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution), *Pochvovedenie*, 2021, No. 3, pp. 287–303.

14. Kutovaya O.V., Grebennikov A.M., Tkhakakhova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bespalov V.A., Cheverdin Yu.I., Belobrov V.P., The changes in soil-biological processes and structure of microbial community of agrochernozems in conditions of different ways of soil cultivation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 35–61, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).

15. Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udal'tsov S.N., Semenov V.M., Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 79–127, DOI: [10.19047/0136-1694-2024-118-79-127](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-79-127).

16. Mamaj A.V., Moshkina E.V., Vliyanie urbanizacii na pokazateli biologicheskoy aktivnosti mikrobnogo soobshchestva avtomorfnyh lesnyh pochv Karelii (The influence of urbanization on the indicators of biological activity of the microbial community of automorphic forest soils of Karelia), *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy*, 2016, No. 11, pp. 1094–1099.

17. Medvedeva M.V., Bahmet O.N., Anan'ev V.A., Moshnikov S.A., Mamaj A.V., Moshkina E.V., Timofeeva V.V., Izmenenie biologicheskoy aktivnosti pochv v hvoynyh nasazhdeniyah posle pozhara v srednej tajge Karelii (Change in biological activity of soils in coniferous plantations after a fire in the middle taiga Karelia), *Lesovedenie*, 2020, No. 6, pp. 560–574.

18. Medvedeva M.V., Moshkina E.V., Genikova N.V., Karpechko A.Yu., Tuyunen A.V., Mamaj A.V., Kulakova L.M., Biologicheskaya aktivnost' pochvy v usloviyah izmeneniya rezhima zemlepol'zovaniya v nechernozemnoj zone Rossii (Biological activity of soil in conditions of changing the land use regime in the non-chernozem zone of Russia), *Plodorodie*, 2022, No. 3(126), pp. 71–76.

19. Nikitin D.A., Chernov T.I., ZHelezova A.D., Thakahova A.K., Nikitina S.A., Semenov M.V., Kutovaya O.V., Sezonnaya dinamika biomassy mikroorganizmov v dernovo-podzolistoj pochve (Seasonal dynamics of microbial biomass in sod-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 2019, No. 11, pp. 1356–1364.

20. Nikitin D.A., Sadykova V.S., Kuvarina A.E., Dah A.G., Biryukov M.V., Fermentativnaya i antimikrobnaya aktivnost' polyarnyh shtammov pochvennyh mikroskopicheskikh gribov (Enzymatic and antimicrobial activity of polar strains of soil microscopic fungi), *Mikologiya i fitopatologiya*, 2021, p. 16.
21. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I. et al., Mikrobiologicheskie indikatory ekologicheskikh funkcij pochv (obzor) (Microbiological indicators of ecological functions of soils (review)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 228–243, DOI: [10.31857/S0032180X22020095](https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095).
22. Nikitin D. A., Semenov M. V., Ksenofontova N. A., Thakahova A.K., Rusakova I.V., Lukin S.M., Vliyanie vneseniya solomy na sostoyanie mikrobioma dernovo-podzolistoj pochvy (The effect of straw application on the state of the microbiome of sod-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 2023, No. 5, pp. 640–653, DOI: [10.31857/S0032180X22601189](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601189).
23. Polyanskaya L.M., Prihod'ko V.E., Lomakin D.G., Chernov I.Yu., Chislennost' i biomassa mikroorganizmov v drevnih pogrebennyh i sovremennyh chernozemah raznogo zemlepol'zovaniya (The number and biomass of microorganisms in ancient buried and modern chernozems of different land use), *Pochvovedenie*, 2016, No. 10, pp. 1191–1204.
24. Semenov V.M., Kogut B.M., Pochvennoe organicheskoe veshchestvo (Soil organic matter), *Agronom.*, 2015, pp. 233.
25. Semenov M.V., Stol'nikova E.V., Anan'eva N.D., Ivashchenko K.V., Struktura mikrobnogo soobshchestva pochvy kateny pravoberezh'ya r. Oki (The structure of the microbial community of the soil of the catena of the right bank of the Oka River), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2013, No. 3, pp. 299–308, DOI: [10.7868/S0002332913030089](https://doi.org/10.7868/S0002332913030089).
26. Semenov M.V., Manucharova N.A., Krasnov G.S., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Biomassa i taksonomicheskaya struktura mikrobnih soobshchestv v pochvah pravoberezh'ya r. Oki (Biomass and taxonomic structure of microbial communities in soils of the right bank of the Oka River), *Pochvovedenie*, 2019, No. 8, pp. 974–985.
27. Semenov M.V., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Semenov V.M., Struktura bakterial'nyh i gribnyh soobshchestv rizosfernogo i vnekornevnogo lokusov seroj lesnoj pochvy (Structure of bacterial and fungal communities of rhizospheric and foliar loci of gray forest soil), *Pochvovedenie*, 2019, No. 3, pp. 355–369, DOI: [10.1134/S0032180X19010131](https://doi.org/10.1134/S0032180X19010131).
28. Semenov M.V., Ksenofontova N.A., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Semenov V.M., Mikrobiologicheskie pokazateli dernovo-podzolistoj pochvy i ee rizosfery v poluvekovom polevom opyte s primeneniem raznyh sistem udobreniya (Microbiological indicators of sod-podzolic soil and its rhizosphere in a half-century field experience using different fertilizer

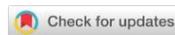
- systems), *Pochvovedenie*, 2023, No. 6, pp. 715–729, DOI: [10.31857/S0032180X22601220](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601220).
29. Semenov M.V., Kravchenko I.K., Semenov V.M., Kuznetsova T.V., Dulov L.E., Udal'tsov S.N., Stepanov A.L., Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes in soil catena across the right bank of the Oka River (Moscow oblast), *Eurasian Soil Science*, 2010, No. 43, pp. 541–549, DOI: [10.1134/S1064229310050078](https://doi.org/10.1134/S1064229310050078).
30. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Zinyakova N.B., Lopes de Gerenyu V.O., Semenov M.V., Izmerenie pochvennykh pulov organicheskogo ugleroda, vydelennykh bio-fiziko-himicheskimi sposobami frakcionirovaniya (Measurement of soil pools of organic carbon isolated by bio-physico-chemical fractionation methods), *Pochvovedenie*, 2023, No. 9, pp. 1155–1172, DOI: [10.31857/S0032180X23600427](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427).
31. Khitrov N.B., Nikitin D.A., Ivanova E.A., Semenov M.V., Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' soderzhaniya i zapasov organicheskogo veshchestva pochvy: analiticheskij obzor (Spatial and temporal variability of the content and reserves of soil organic matter: an analytical review), *Pochvovedenie*, 2023, No. 12, pp. 1493–1521, DOI [10.31857/S0032180X23600841](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841).
32. Chernov T.I., Kholodov V.A., Kogut B.M., Ivanov A.L., The Method of Microbiological Soil Investigations within the Framework of the Project “Micro-biome of Russia”, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 87, pp. 100–113, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-100-113](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-100-113).
33. Chernov T.I., Thakahova A.K., Lebedeva M.P., Zhelezova A.D., Bgazhba N.A., Kutovaya O.V., Mikrobiomy kontrastnykh po zasoleniyu pochv soloncovogo kompleksa volgo-ural'skogo mezhdurech'ya (Microbiomes of contrasting salinity soils of the saline complex of the Volga-Ural interfluve, Soil science), *Pochvovedenie*, 2018, No. 9, pp. 1115–1124.
34. Ananyeva N.D., Castaldi S., Stolnikova E.V., Kuderyarov V.N., Valentini R., Fungi-to-bacteria ratio in soils of European Russia, *Arch. Agronomy Soil Sci*, 2015, Vol. 61(4), pp. 427–446, DOI: [10.1080/03650340.2014.940916](https://doi.org/10.1080/03650340.2014.940916).
35. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G., Simpson M.J., Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 156, 108189.
36. Anthony M.A., Crowthe T.W., Maynard D.S., van den Hoogen J., Averill C., Distinct assembly processes and microbial communities constrain soil organic carbon formation, *One Earth*, 2020, Vol. 2, pp. 349–360.
37. Buzzini P., Turchetti B., Yurkov A., Extremophilic yeasts: the toughest yeasts around? *Yeast*, 2018, Vol. 35(8), pp. 487–497, DOI: [10.1002/yea.3314](https://doi.org/10.1002/yea.3314).
38. Čapek P., Diáková K., Dickopp J. E., Bárta J., Wild B., Schneckner J., Šantrůčková H., The effect of warming on the vulnerability of sub ducted

- organic carbon in arctic soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, Vol. 90, pp. 19–29.
39. Cui J., Zhu Z., Xu X., Liu S., Jones D.L., Kuzyakov Y., Shibistova O., Wu J., Ge T., Carbon and nitrogen recycling from microbial necromass to cope with C:N stoichiometric imbalance by priming, *Soil Biol. Biochem*, 2020, Vol. 142, pp. 107–220, DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.107720](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107720).
40. Grodnitskaya I.D., Karpenko L.V., Knorre A.A., Syrtsov S.N., Microbial activity of peat soils of boggy larch forests and bogs in the permafrost zone of central Evenkia, *Eurasian Soil Sci*, 2013, Vol. 46(1), pp. 61–73, DOI: [10.1134/S1064229313010043](https://doi.org/10.1134/S1064229313010043).
41. Guo Z., Wang Y., Wan Z., Zuo Y., He L., Li D., Xu X., Soil dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Global budget, spatial distribution and controls, *Global ecology and biogeography*, 2020, Vol. 29, pp. 2159–2175.
42. Jansson J.K., Hofmockel K.S., Soil microbiomes and climate change, *Nature Reviews Microbiology*, 2020, Vol. 18(1), pp. 35–46.
43. Joergensen R.G., Emmerling C., Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils, *Journal of plant nutrition and soil science*, 2006, Vol. 169, No. 3, pp. 295–309.
44. Joergensen R.G., Wichern F., Alive and kicking: why dormant soil microorganisms matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 116, pp. 419–430.
45. Joshi S., Bajpai A., Johri B.N., Extremophilic fungi at the interface of climate change, *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-technology*, London: Academic Press, 2020, pp. 1–22, DOI: [10.1016/B978-0-12-821925-6.00001-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821925-6.00001-0).
46. Korneykova M.V., Vasenev V.I., Nikitin D.A., Dolgikh A.V., Soshina A.S., Myazin V.A., Nakhaev M.R., Soil microbial community of urban green infrastructures in a polar city, *Urban Ecosystems*. 2022, Vol. 25(5), pp. 1399–1415.
47. Korneykova M.V., Myazin V.A., Fokina N.V., Chaporgina A.A., Nikitin D.A., Dolgikh A.V., Structure of microbial communities and biological activity in tundra soils of the Euro-Arctic region (Rybachy peninsula, Russia), *Microorganism*, 2023, Vol. 11(5), pp. 1352.
48. Li Y., Dick W.A., Tuovinen O.H., Fluorescence microscopy for visualization of soil microorganisms – a review, *Biology and fertility of soils*, 2004, Vol. 39(5), pp. 301–311, DOI: [10.1007/s00374-004-0722-x](https://doi.org/10.1007/s00374-004-0722-x).
49. Liang C., Schimel J.D., Jastrow J.D., The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage, *Nature Microbiology*, 2017, Vol. 2, pp. 17105.

50. Liang C., Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal, *Soil Ecology Letters*, 2020, Vol. 2, pp. 241–254.
51. Lundström U.S., van Breemen N., Bain D., The podzolization process. A review, *Geoderma*, 2000, Vol. 94, pp. 91–107.
52. Mundra S., Kjønaas O.J., Morgado L.N., Krabberød A.K., Ransedokken Y., Kauserud H., Soil depth matters: shift in composition and inter-kingdom co-occurrence patterns of microorganisms in forest soils, *FEMS Microbiology Ecology*, 2021, Vol. 6, pp. 97.
53. Paul E.A., The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization, *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, Vol. 98, pp. 109–126.
54. Polyanskaya L.M., Yumakov D.D., Tyugay Z.N., Stepanov A.L., Fungi and Bacteria in the Dark-Humus Forest Soil, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53(9), pp. 1255–1259, DOI: [10.1134/S1064229320090124](https://doi.org/10.1134/S1064229320090124).
55. Santruckova H., Kotas P., Barta J., Urich T., Capek P., Palmtag J., Significance of dark CO₂ fixation in arctic soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 119, pp. 11–21.
56. Semenov M.V., Chernov T.I., Tkhakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V., Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century, *Applied soil ecology*, 2018, Vol. 127, pp.8–18.
57. Tajik S., Ayoubi S., Lorenz N., Soil microbial communities affected by vegetation, topography and soil properties in a forest ecosystem, *Applied Soil Ecology*, 2020, Vol. 149, pp. 306.
58. Wang M., Tian J., Xiang M., Liu X., Living strategy of cold-adapted fungi with the reference to several representative species, *Mycology*, 2017, Vol. 8(3), pp.178–188, DOI: [10.1080/21501203.2017.1370429](https://doi.org/10.1080/21501203.2017.1370429).
59. Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y., Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 162, pp. 108422.
60. Zhelezova A.D., Semenov V.M., Ksenofontova N.A., Krasnov G.S., Tkhakhova A.K., Nikitin D.A., Semenov M.V., Effects of distinct manure amendments on microbial diversity and activity in Chernozem and Retisol, *Applied Soil Ecology*, 2024, Vol. 193, pp. 105152.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-152-199



Ссылки для цитирования:

Рахлеева А.А., Михеев П.В., Замотаев И.В., Грачева Р.Г., Конопляникова Ю.В., Белоновская Е.А., Карелин Д.В. Сообщества беспозвоночных и микроорганизмов в почвах полей фильтрации Льговского сахарного завода (Курская область) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 152-199. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-152-199

Cite this article as:

Rakhleeva A.A., Mikheev P.V., Zamotaev I.V., Gracheva R.G., Konoplyanikova J.V., Belonovskaya E.A., Karelin D.V., Communities of invertebrates and microorganisms in the soils of filtration fields of the Lgov sugar factory (Kursk region), Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 152-199, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-152-199

Благодарность:

Полевые работы выполнены при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-29-0502 5мк. Морфологические и аналитические исследования почв полей фильтрации сахарной промышленности проводились в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0010 “Почвы и углеродный цикл природных и антропогенных экосистем в экстремальных и оптимальных условиях прошлого и настоящего, изучаемые с использованием передовых технологий”.

Acknowledgments:

The field work was carried out with financial support of the RFBR project No. 19-29-0502 5mk. Morphological and analytical studies of soils of sugar industry filtration fields were carried out within the framework of the theme of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0010 “Soils and carbon cycle of natural and anthropogenic ecosystems under extreme and optimal conditions of the past and present, studied using advanced technologies”.

Сообщества беспозвоночных и микроорганизмов в почвах полей фильтрации Льговского сахарного завода (Курская область)

© 2024 г. А. А. Рахлеева^{1*}, П. В. Михеев^{2**},
И. В. Замотаев^{3***}, Р. Г. Грачева^{3****},
Ю. В. Конопляникова^{3*****}, Е. А. Белоновская^{3*****},
Д. В. Карелин^{3*****}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,
*<https://orcid.org/0000-0002-2200-493X>, e-mail: a.rakhleeva@gmail.com.

²ФБУН “ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана” Роспотребнадзора, Россия,
141014, г. Мытищи, ул. Семашко, д. 2,
**<https://orcid.org/0000-0002-3376-0677>, e-mail: pvm-fscg@yandex.ru.

³Институт географии РАН, Россия,
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29,
***<https://orcid.org/0000-0003-4587-4070>, e-mail: zivigran@rambler.ru,
****<https://orcid.org/0000-0001-9042-5632>, e-mail: gracheva@igras.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0002-0062-9154>,
e-mail: konopliyanikova@igras.ru,

*****<https://orcid.org/0000-0002-8354-4606>, e-mail: belena@igras.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0001-5778-3163>, e-mail: karelin@igras.ru.

Поступила в редакцию 24.04.2024, после доработки 07.05.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Изучены особенности состава макро- и микробиоты в почвах, сформированных в условиях очистных сооружений (полей фильтрации) сахарной промышленности в черноземной зоне России. Значительное влияние на сообщества микроорганизмов и беспозвоночных оказывают влажность почв, обилие и разнообразие органических и минеральных веществ, поступающих на очистные сооружения со сточными водами. Макрофауна почв периодически действующих прудов-отстойников (карт) представлена преимущественно хищниками и фитофагами; в карте, выведенной из эксплуатации 45 лет назад, преобладают сапрофаги, в составе которых доминируют дождевые черви. Все группы макрофауны в почвах полей фильтрации характерны для почв лесостепных регионов, при этом их численность существенно ниже, по сравнению с черноземами под дубравами Центрально-Черноземного заповедника, но заметно выше, чем в окружающих пахотных черноземах. Микрофлора в почвах полей фильтрации и естественном черноземе Курской биосферной станции идентична по составу физиологических групп, но различается по их количеству и распределению по профилю, что связано с разным водным режимом, определяемым частотой и длительностью воздействия сточных вод, и поступлением отходов

сахарного производства, обогащенных карбонатом кальция, органическим веществом и биофильными элементами.

Ключевые слова: отходы свеклосахарного производства; карты полей фильтрации; макрофауна; микрофлора; Technosols; Cambisols; Chernozems.

Communities of invertebrates and microorganisms in the soils of filtration fields of the Lgov sugar factory (Kursk region)

© 2024 A. A. Rakhleeva^{1*}, P. V. Mikheev^{2**}, I. V. Zamotaev^{3***},
R. G. Gracheva^{3****}, J. V. Konoplyanikova^{3*****},
E. A. Belonovskaya^{3*****}, D. V. Karelin^{3*****}

¹Lomonosov Moscow State University,
12, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, e-mail: a_bcdefg@mail.ru.

²Federal State Budgetary Institution "F.F. Erisman FNTSG" of
Rospotrebnadzor,
2 Semashko Str., Mytishchi 141014, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0002-3376-0677>, e-mail: pvm-fscg@yandex.ru.

³Institute of Geography Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russian Federation,
***<https://orcid.org/0000-0003-4587-4070>, e-mail: zivi gran@rambler.ru,
****<https://orcid.org/0000-0001-9042-5632>, e-mail: gracheva@igras.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0002-0062-9154>,
e-mail: konopliyanikova@igras.ru.

*****<https://orcid.org/0000-0002-8354-4606>, e-mail: belena@igras.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0001-5778-3163>, e-mail: karelin@igras.ru.

Received 24.04.2024, Revised 07.05.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The composition of macro- and microbiota in soils formed in treatment facilities (filtration fields) of the sugar industry in the Chernozem zone of Russia was studied. Soil moisture and the abundance and diversity of organic and mineral substances entering treated plants with wastewater have a significant impact on communities of microorganisms and invertebrates. The macrofauna of the soils of periodically operating settling ponds (called checks, or carts) consists mainly of predators and phytophages; the soil of the checks that was decommissioned 45 years ago consists of saprophages, which were dominated by earthworms. All groups of macrofauna in the soils of filtration

fields are characteristic of the soils of forest-steppe regions, while their numbers are significantly lower compared to the Chernozems under the oak groves of the Central Chernozem Reserve, but noticeably higher than in the surrounding arable Chernozems. The microflora in the soils of the filtration fields and the background Haplic Chernozem (Pachic) is identical in the composition of physiological groups, but differs in their number and distribution along the soil profile. Differences in the diversity and distribution of microorganisms in the studied soils depend on different water regimes, determined by the frequency and duration of exposure to wastewater and the input of sugar production waste enriched with calcium carbonate, organic matter and biophilic elements.

Keywords: beet sugar production waste; checks of filtration fields; macrofauna; microflora; Technosols; Cambisols; Chernozems.

ВВЕДЕНИЕ

Поля фильтрации (в дальнейшем ПФ), используемые для естественной биологической очистки сточных вод сахарных заводов, состоят из карт (выемок) с межсекционными насыпными валами, включающими различные технические элементы. ПФ действующего Львовского сахарного завода (площадь 175 га) расположены на водораздельной поверхности рек Бык и Опока, сложенной четвертичными отложениями. Карты действуют в режиме периодического заполнения сточными водами и осушения. Отдельные карты могут забрасываться, когда объем производства недостаточен для заполнения всей площади ПФ.

Ранее проведенные исследования (Замотаев и др., 2022, 2023; Карелин и др., 2023) показали, что в искусственно созданных картах, окруженных насыпными валами (их высота 1.5–4 м, ширина до 3 м), создается особый комплекс условий, отличный от окружающего фона (Мониторинг..., 2021). К таким особым условиям карт относятся: а) более мощный и продолжительный снежный покров, что обуславливает более высокую температуру почвы в зимний период; б) пониженная температура (на 1.7 °С, в среднем) и повышенная влажность (27.8 > 18.8% (фон) в слое почвы 0–10 см, тест Манна–Уитни, $p < 0.05$) в вегетационный период, с апреля по август; в) более высокая температура воздуха и почвы в осенний период, с сентября по октябрь; г) периодическое обводнение используемых карт с дополнительным поступлением со

сточными водами в смеси с дефекатом и транспортерно-моечным осадком биогенных и других веществ, применяемых в свеклосахарном производстве (органические соединения, карбонаты, фосфаты, питательные элементы, технологические вспомогательные средства и др.); д) доминирование гидрофильных и гигрофильных растительных сообществ, не характерных для фоновых лесостепных ландшафтов; е) почвообразующими породами на ПФ являются высохшие осадки сточных вод многокомпонентного состава и карбонатные лессовидные суглинки и/или нижние горизонты черноземных почв, трансформированные техногенными стоками. Все это формирует в картах ПФ особые условия существования сообществ почвенных беспозвоночных и микроорганизмов, не характерные для региональных природных местообитаний.

Беспозвоночные и микроорганизмы, достигая в почвах высоких значений численности и биомассы, особенно в верхних горизонтах, существенно влияют на трансформацию органического вещества и минерального компонента, переорганизацию почвенной массы, а также регулируют циклы биогенных элементов (Гилляров, Криволицкий, 1985; Микроорганизмы..., 1989; Всеволодова-Перель, 1997; Мордкович, 1991, 2013; Андрусевич и др., 2014; Кутовая и др., 2016; Мордкович, Любечанский, 2020; Рахлеева, 2022; Lavelle et al., 2016; Bayon et al., 2017; Coggan et al., 2018). Для ряда групп почвообитающих животных Черноземья списки видов и сведения об их экологии требуют дальнейшего изучения (Щеглов и др., 2006; Снегин, Артемчук, 2018; Мордкович, Любечанский, 2020; Кутовая и др., 2021). Информация по микроорганизмам в черноземной зоне в основном относится к сравнению структуры и численности сообществ в почвах разных типов и подтипов, оценке влияния на них локального переувлажнения (Козеев и др., 2006), различных видов землепользования, севооборотов, приемов обработки и удобрений (залежь, пашня, многолетние полевые опыты, применение технологии no-till), изучению состояния микробиоты при загрязнении почв нефтью (Возняковская и др., 1996; Пухова и др., 2011; Железова и др., 2017; Кутовая и др., 2021; Никитин и др., 2020; Минникова и др., 2023). Известны некоторые биологические параметры субстратов ПФ и агропочв при внесении в них отходов свеклосахарного производства в чистом

виде или в сочетании с удобрениями (Иванов, 2004; Пузанова, 2009; Коноплина, 2011; Балабко и др., 2014; Гурин, Гнеушева, 2018). Вместе с тем практически отсутствуют исследования состояния комплексов микроорганизмов и беспозвоночных животных, населяющих почвы территорий, вовлеченных в свеклосахарное производство.

Цель исследования – изучение особенностей состава биоты в почвах на ПФ сахарной промышленности в черноземной зоне.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследований были выбраны почвы ПФ Льговского сахарного завода (Курская область) и, для сравнения, агропочва прилегающей территории. Морфологическое описание почвенных разрезов проведено с использованием цветowych таблиц Манселла. Твердость почв определяли с помощью пенетрометра, плотность – бура конструкции Качинского. В лабораторных условиях проводились мезоморфологические исследования с использованием оптического микроскопа Leica MZ6 (рабочие увеличения – $\times 6$ – $\times 80$).

Почвенные анализы выполнены в химической лаборатории Института географии РАН. Гранулометрический состав определяли пирофосфатным методом, $pH_{\text{водн}}$ – потенциометрическим, количество карбонатов – методом алкалиметрического титрования (Аринушкина, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1986; Воробьева, 1998).

Содержание углерода и азота измеряли методом сухого сжигания на анализаторе в Центре коллективного пользования (ЦКП) “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” ИГ РАН.

Количественный учет макрофауны (макрофауна – принятое размерное деление по международной классификации, мезофауна 2–30 мм – по отечественной размерной классификации, введенной М.С. Гиляровым) проводился на трех пробных участках в сентябре 2022 г.: в днищах действующей карты, освободившейся от воздействия сточных вод 2 года назад, и карты, заброшенной 45 лет назад (разрезы LG-01-22 и LG-05-20 соответственно), а также на пашне под озимой пшеницей, сопредельной с ПФ (разрез LG-04-22; условный агрофон).

Для количественных учетов макрофауны использовался метод ручной разборки проб по Гилярову (Методы почвенно-зоологических исследований, 1975). На каждом пробном участке в трехкратной повторности отбирались почвенные монолиты площадью 25 см², на глубину 0–10, 10–20, 20–30 см, а также подстилка при наличии. Были получены значения численности и биомассы макрофауны с пересчетом на 1 м². Определение состава почвенной макрофауны проводилось до уровня семейств для кольчатых червей и жесткокрылых. Для остальных представителей – до уровня классов и отрядов. Для большинства таксонов был определен их трофический статус: хищники, фитофаги, сапрофаги.

Муравьи в анализе не учитывались. Для этой социальной группы беспозвоночных существуют иные методы количественных учетов. Пустые раковинки гастропод в расчеты численности и биомассы не включались, однако их присутствие отмечалось в общей интерпретации результатов.

На каждом пробном участке был определен доминантный комплекс макрофауны (таксономические группы, чья численность составляла 5% и более от общей численности на участке).

Для сравнительного анализа состава комплексов макрофауны рассчитывался коэффициент Жаккара:

$$K_{ж} = C / (A + B - C) * 100\%,$$

где А – число таксонов на одном пробном участке, В – число таксонов на втором пробном участке, С – число общих для двух участков таксонов.

Необходимо учитывать, что пробы были отобраны во время периода сильного иссушения почв. Лето 2022 г. выдалось жаркое, особенно июль и август. Этот фактор мог повлиять на количественные показатели макрофауны, которая в такие периоды проявляет меньшую активность.

Общее сравнение полученных результатов проводилось с опубликованными для Центрально-Черноземного заповедника имени Алехина данными по комплексам макрофауны (Злотин, Ходашова, 1974: цит. по Мордкович, Любечанский, 2020), а также с данными, полученными для почв зонального ряда Русской рав-

нины (Гиляров, Чернов, 1975; Мордкович, Любечанский, 2020).

Отбор проб для микробиологических исследований проводился по генетическим горизонтам (р. LG-01-22 и LG-05-20). Биологическую активность образцов почв исследовали методами посева на селективные среды. Общее микробное число (ОМЧ) подсчитывали на чашках Петри при посеве разведений почвенной суспензии на ГРМ-агаре (ОМЧ1 – потенциально патогенные бактерии, обладающие высокой скоростью роста, выросшие за 24 часа в термостате при 37 °С), а также при инкубации в течение 3 суток при 22 °С на разбавленном в 10 раз ГРМ-агаре (ОМЧ2 – сапрофитные бактерии, т. е. господствующая группа, существующая в почве в отсутствие свежих питательных веществ). Актиномицеты выявляли на крахмало-аммиачном агаре, плесневые грибы – на среде Чапека, число спор аэробных бактерий – на ГРМ-агаре после прогрева почвенной суспензии на водяной бане в течение 15 минут при температуре 75 °С. Полученные результаты сравнивали с опубликованными ранее для ненарушенных черноземов Курской биосферной станции (Mikheev et al., 2021).

Видовой состав бактерий наиболее распространенных видов, растущих в виде колоний на поверхности агара с почвенной вытяжкой, определяли с использованием масс-спектрометрии (MALDI-TOF MS), являющейся одной из самых последних систем идентификации микроорганизмов, для получения “отпечатков пальцев интактных бактериальных клеток” (Баранцевич, Баранцевич, 2014; Holland et al., 1996; Giebel et al., 2010).

Классификационное положение почв определено в формате новой классификации и диагностики почв России (2004) и Полевого определителя почв России (2008), с дополнениями по классификационной разработке (Прокофьева и др., 2014), а также по международной классификации WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). Следует отметить, что при описании почв ПФ использован малый индекс “zoo”, не выделяемый в новой классификации почв России, для обозначения многочисленных и разнообразных признаков биогенной проработки материала в профиле.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические свойства почв. Ниже приведены основные морфологические особенности почв и их отличительные черты, связанные со свеклосахарным производством (рис. 1).

В днище карты, которая последний раз заливалась сточными водами в 2020 г., под эхиноцистисом дольчатым (*Echinocystis labata*) (“бешеный огурец”) описана темногумусовая техногенная арти-стратифицированная почва на абраземе аккумулятивно-карбонатном. Разрез LG-01-22 (51°36.827' N, 35°15.363' E), формула профиля: Oca-AUdc-AU-TCH1ca,rr-TCH2ca,rr-TCH3lc,rr-[BCAmc]-[BCmc]. Согласно WRB (2015), почву можно отнести к Technosol Alcalic Chernic Calcaric.

I O1ca – 2–0 см – сухие растительные остатки, преимущественно фрагменты тростника; примесь минерального известкового материала, бурно вскипающего от HCl.

I O2ca – 0–5 см – 10YR 2/2, сухая рыхлая рассыпающаяся механическая смесь растительных остатков, семян и мелкозернистого черного минерального материала. Бурно вскипает от HCl.

I AUdc,h – 5–10 см – 10YR 2/1, сухой рыхлый, черный, полностью оструктурен, мелко-среднезернистый, суглинистый, липкий. Обилие мелких корешков, частично мертвых. Переход резкий, граница ровная. Бурно вскипает от HCl.

II Стехн AU-TCH1ca,rr (дефекат) – 10(20)–30 см – 10YR 5/2 – 4/2, неоднородно окрашен: на буровато-сером фоне темно-серые гумусированные пятна, разводы; уплотнен, легкосуглинистый, четко ореховатый. Плотный, сильно пористый, в порах черное органическое вещество, часто копрогенное; обилие тонких корешков. Переход резкий, граница ровная. Бурно вскипает от HCl.

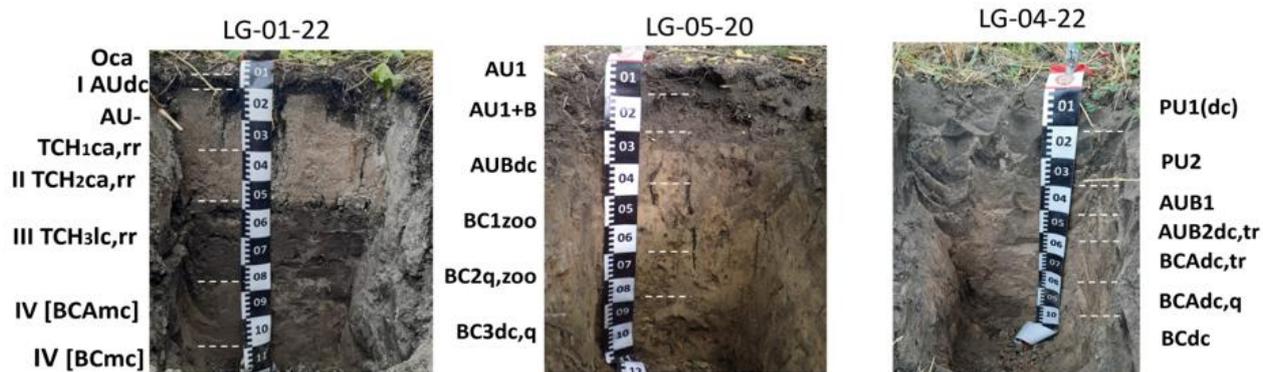


Рис. 1. Профили почв, сформированных в днищах карт полей фильтрации (LG-01-22, LG-05-20) и прилегающей пашни (LG-04-22).

Fig. 1. Profiles of soils formed at the bottoms of settling ponds (checks) of filtration fields (LG-01-22, LG-05-20) and adjacent arable land (LG-04-22).

II TCH2ca,rr (дефекат) – 30–50 см – 10 YR 5/2, сухой светло-серый однородный по составу и цвету, плотный, сильно пористый, поры крупные (1–3–5 мм), поры и трещины заполнены черным органическим веществом; единичные тонкие сухие корни. Распадается на четкие ореховатые отдельности. Бурно вскипает от HCl. Переход резкий по цвету, граница ровная.

III TCH3lc,rr (органический транспортерно-мочечный осадок) – 50–75 см – 7.5 YR 2.5/1, темно-серый с коричневатостью, однородный по цвету, уплотнен, вязкий, липкий, ореховатый, легкосуглинистый, единичные белые точечные карбонатные выцветы (~1 мм), желтоватые карбонатные стяжения (1–5 мм). Переход резкий, граница ровная. Локально слабо кипит от HCl.

IV [BCAmc] – 75(85)–100 см – 10 YR 4/2 + 10 YR 3/1, буровато-серый, участками прокрашен гумусом, плотный, хорошо оструктурен, ореховатый, легкосуглинистый, слегка опесчанен, белые карбонатные пятна, прожилки, трубочки (псевдомицелий). Переход постепенный. Бурно вскипает от HCl.

IV [BCmc] – 100–120 см – 10 YR 5/2, светлее предыдущего, серовато-бурый, очень плотный, ореховатый, легкосуглинистый; обилие псевдомицелия. Бурно вскипает от HCl.

В днище карты, заброшенной 45 лет назад, очищенной от осадков сточных вод, под разреженным покровом клена американского исследована темнугумусовая почва на абраземе аккумулятивно-карбонатном, разрез LG-05-20 (51°36.902' N, 35°14.913' E), формула профиля: AU1-AU1+B-AUBdc-BC1-BC2q-[BCA3dc,q](WRB: Histic Gleyic Eutric Cambisol (Loamic)).

О фрагментарный – сухой, сохранившие строение ветки и листья.

AU1 – 0–10 см – 10 YR 2/1, сухой, рыхлый, темно-серый, почти черный, зернистый и мелко-, среднекомковатый. Преимущественно копрогенный, суглинистый, пылеватый, липкий. Пронизан тонкими и средними корнями. Переход постепенный, граница ровная. Не кипит от HCl.

AU1+B – 10–20(25) см – свежий, уплотнен. Механическая

смесь темно-серого материала (A1) 10 YR 2/2 и серовато-желтовато-бурого материала горизонта В. Темно-серый материал полностью оструктурен, зернисто-мелкокомковатый с присутствием мелкоореховатых отдельностей. Суглинистый, липкий. Желтовато-серо-бурые участки: прокрашены точечно гумусом, сильнопористые, много тонких и средних корней, много червороин, переход заметный, граница неровная. Локально сильно вскипает от HCl (на бурых участках).

AUBdc – 20(25)–35(40) см – свежий, плотный. На общем желтовато-буром фоне 10 YR 6/4 размытые и четкие пятна диаметром 3–5 см серого цвета 10 YR 5/3. Преимущественно оструктурен. Крупноореховатый (глыбистый). На правой стенке на 20–25 см прослой черного материала, структура горизонтальной ориентации – грубые плитки/ призмы. Корней мало, мелких и средних. Переход заметный по цвету, граница неровная. Слабо вскипает, локально.

BC1_{zoo} – 35(40)–60 см – увлажнен, плотный, на желто-буром фоне 10 YR 6/4 темно-серая пятнистость 10 YR 5/3 диаметром 0.5–1 см (червороины). Вертикальные ходы-трубки (трещины) (начинаются с 25 см – идут до нижней части профиля) заполнены темно-серым гумусированным материалом, с копролитами. Диаметр 1.5 см. Крупноореховато-глыбистый, пористый, обилие копролитов в ходах корней и червороинах. Единичные точечные железистые скопления. Переход заметный, по уменьшению корневых ходов и червороин, граница ровная. Локально, слабо вскипает.

BC2_{q,zoo} – 60–80 см – 10 YR 5/4-6/4, свежий, плотный, желтовато-бурый суглинок, пронизан трещинами (трубками), заполненными копролитами и гумусово-глинистым материалом, пятна червороин диаметром до 1 см, корни средние, единично. Полностью оструктурен, структура крупноореховато-призматическая, четкая. Сильнопористый. Обилие железистых скоплений в “волосяных” трещинах. Единичные железистые пятна на поверхности педов. Переход постепенный, граница ровная. Не кипит от HCl.

BC3_{dc,q} / [BCAdc,q] –80–100 см – 10 YR 6/4–6/6, свежий, плотный, желтовато-светло-бурый суглинок (более однородно окрашен), круглые червороины, ходы тонких корней. Структура призматическая и глыбистая, крупная. Суглинисто-пылеватый, пористый. Поры и тонкие ходы корней сильно ожелезнены. Бурно кипит от HCl. Видимых новообразований карбонатов нет.

В пределах пашни, расположенной по периферии очистных сооружений, описан агрочернозем дисперсно-карбонатный квази-глееватый, разрез LG-04-22 (51°36.903' N; 035°14.864' E) формула профиля: PU1(dc)-PU2-AUB1-AUB2dc,tr-BCAdc,tr-BCAdc,q-BCdc. Согласно WRB (2015), почва отвечает определению Chernozem Loamic Aric Turbic.

PU1(dc) – 0–10 см – 10 YR 3/1-2/1, коричневато-темно-серый, свежий, плотный, мелкозернисто-комковатый с глыбистыми агрегатами, частично бесструктурный, суглинистый; много тонких корней. Переход постепенный по цвету и пористости. Слабо вскипает от HCl.

PU2 – 10–28(30) см – 10 YR 2/1, черный свежий плотный зернисто-мелкокомковатый копрогенный суглинистый, тонкие корни, переход ясный граница волнистая. Не вскипает от HCl. Подплужная подошва.

AUB1 – 30–40 см – 10 YR 3/2, свежий буровато-темно-серый пятнистый, на темно-сером фоне бурые пятна 5–10 мм, уплотнен, биотурбированный, ореховато-комковатый копрогенный, тонкие корни, переход ясный, граница ровная. Локально вскипает от HCl (бурые участки).

AUB2dc,tr – 40–50 см – 10 YR 4/3/+3/2, сухой, на желтовато-буром фоне темно-серые гумусированные участки, крупная кротовина (12 см) темно-серая с черными пятнами копролитов. Комковато-ореховатый, нечеткая структура, рассыпается при взятии, суглинистый. На правой стенке четкая кротовина 5–6 см светло-бурая с черными пятнами копролитов. В порах черный органический материал. Тонкие корни. Переход постепенный. Не вскипает от HCl.

BCAdc, tr – 50–70 см – 10 YR 4/3-10 YR 3/2, пятнистый желто-бурый, на буром фоне светло-желтые пятна 1–3 см, темно-серые округлые пятна 0.5–10 см; уплотнен, нечетко оструктурен, ореховатый, переход постепенный. Локально вскипает от HCl

BCAdc, q – 70–90 см – 10 YR 4/3-10 YR 5/3, сухой, пестрый, на светло-буром фоне множество мелких ржавых пятен, уплотнен, распадается на призмовидные и ореховатые отдельности, непрочные (рассыпаются при взятии), пористый, в порах железистые трубочки, железистые стяжения и пятна на поверхности педов, на стенках трещин гумусовые кутаны и пропитки. Переход постепенный. Бурно вскипает от HCl.

BCdc – 90–100 см – 10 YR 6/4-10 YR 5/3, сухой серовато-бурый с серыми гумусовыми пятнами; скопления рыхлого гумусированного материала по расширениям трещин, мелкокомковатый преимущественно копрогенный, рассыпчатый; обилие тонких корешков. Бурно вскипает от HCl.

Физические, физико-химические и химические свойства почв. Темногумусовая техногенная арти-стратифицированная почва (LG-01-22), сформированная на остаточном материале абра-дированных исходных почв, имеет щелочную реакцию ($pH = 7.5–8.5$) и высокое содержание карбонатов во всех горизонтах, диагностируемое по бурному вскипанию мелкозема от HCl. В органогенном (O_{2ca}), состоящем из механической смеси растительных остатков, семян и мелкозернистого черного минерального материала, и темногумусовом (AUdc, h) горизонтах с обилием слабо-разложившегося органического вещества, содержание $C_{орг}$ 23.95% и 17.91% соответственно (табл. 1). Почва сильно обогащена азотом во всех горизонтах ($C : N = 10–13$).

Таблица 1. Некоторые химические и физико-химические свойства почв карт полей фильтрации, выведенных из эксплуатации в разное время

Table 1. Some chemical and physicochemical properties of soils in filtration field checks decommissioned at different times

Горизонт	Глубина образца, см	pH _{вод}	C _{орг} , %	C/N	CaCO ₃ , %, вскипание от HCl
<i>Темногумусовая зоотурбированная почва. Разрез LG-05-20. Зброшенная 45 лет назад очищенная карта</i>					
AU1	0–10	8.03	3.32	12	1.23
AU1+B	10–20(25)	8.16	1.75	14	1.55
AUBdc	20(25)– 35(40)	8.33	1.15	11	0.39
BC1	35(40)–60	8.18	0.67	11	0.27
BC2 _q	60–80	8.07	0.50	9	0.45
BC3 _{dc,q}	80–100	8.31	0.53	42	10.37

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Горизонт	Глубина образца, см	pH _{вод}	C _{орг} , %	C/N	CaCO ₃ , %, вскипание от HCl
<i>Темногумусовая техногенная арти-стратифицированная почва. Разрез LG-01-22. Карта последний раз использовалась (затоплялась сточными водами) 2 года назад</i>					
O2ca	0–5	Не опр.	23.95	10.77	Бурно вскипает
AUdc,h	5–10	7.54	17.91	10.23	Бурно вскипает
AU-TCH1ca,rr	10–30	8.50	5.86	12.36	Бурно вскипает
TCH2ca,rr	30–50	8.50	5.14	11.92	Бурно вскипает
TCH3lc,rr	50–75	8.34	2.49	13.75	Бурно вскипает
[BCAmc]	75–100	8.45	1.39	12.40	Бурно вскипает
[BCmc]	100–120	8.35	0.98	11.37	Бурно вскипает

Периодический привнос на поверхность карт со сточными водами твердофазного материала дефеката и транспортерно-моечного осадка приводит к дифференциации гранулометрического состава почв. Поверхностные горизонты имеют среднесуглинистый иловато-крупнопылеватый состав. Горизонт II ТСН2са,г на глубине 30–50 см характеризуется более тяжелым гранулометрическим составом (табл. 2). Наблюдающееся здесь повышение содержания физической глины подтверждается максимальным значением плотности на этой глубине – 0.96 г/см^3 по сравнению с рыхлым верхним темногумусовым горизонтом (0.57 г/см^3).

При сливе вод и обсыхании днища появляющийся растительный покров и почвенная макрофауна фрагментируют, диспергируют известковый (дефекатный) материал, смешивая его с органическим веществом сточных вод. При мезоморфологическом описании разреза обнаружено, что в горизонтах, сложенных дефекатом и транспортерно-моечным осадком, многочисленны ходы макрофауны, заполненные органическим веществом; встречаются копролиты различного размера (рис. 2).

Для темногумусовой зоотурбированной почвы характерна щелочная реакция ($\text{pH} = 8.0\text{--}8.3$) по всему профилю (табл. 1). В профиле почвы хорошо выражена дифференциация по содержанию карбонатов. В верхних гумусово-аккумулятивных и срединных горизонтах почвы количество карбонатов незначительно ($0.27\text{--}1.55\%$, слабокарбонатные, локально слабо вскипают); в нижнем, содержащем мицелярные формы карбонатов, на глубине 80–100 см содержание карбонатов достигает 10.37% , что позволяет отнести горизонт к сильнокарбонатным (бурно вскипает). Содержание органического вещества максимально в поверхностных горизонтах ($C_{\text{орг}} = 3.32\%$) и постепенно убывает с глубиной, оставаясь достаточно высоким в срединных горизонтах за счет активных биотурбационных процессов. При микроморфологических исследованиях обнаружены ходы макрофауны (червороины) и корней с перемещением почвенной массы, копролиты различного размера, морфологии и степени сохранности. Соотношение C : N в гумусовых и срединных горизонтах колеблется от 9 до 14, а в нижнем горизонте составляет 42.

Таблица 2. Гранулометрический состав почв карт полей фильтрации, выведенных из эксплуатации в разное время

Table 2. Soil particle-size distribution in the checks of infiltration fields decommissioned at different times

Горизонт	Глубина образца, см	Содержание фракций (%), размер частиц, мм						
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01
<i>Темногумусовая зоотурбированная почва. Разрез LG-05-20. Зброшенна 45 лет назад очищенная карта</i>								
AU1	0–10	0.18	0.49	56.3	7.31	9.7	26.02	43.03
AU1+B	10–20(25)	0.12	0.36	56.74	8.73	8.6	25.45	42.78
AUBdc	20(25)–35(40)	0.11	0.87	58.89	7.97	7.39	24.77	40.13
BC1	35(40)–60	0.03	1.5	61.05	6.24	7.92	23.26	37.42
BC _{2q}	60–80	0.09	0.26	59.3	8.78	7.11	24.46	40.35
[BCAdc,q]	80–100	0.18	0.5	57.11	8.15	9.22	24.84	42.21
<i>Темногумусовая техногенная арти-стратифицированная почва. Разрез LG-01-22. Карта последний раз использовалась 2 года назад</i>								
AUdc,h	5–10	3.07	17.89	36.76	9.79	13.52	18.97	42.28
AU-TCH1ca,rr	10–30	0.25	8.62	34.21	28.21	16.41	12.31	56.93
TCH2ca,rr	30–50	0.21	9.82	29.21	22.62	23.72	14.41	60.76



Рис. 2. Биогенная проработка фекалия в горизонте AU-TCH1ca,rr на глубине 10–30 см (LG-01-22).
Fig. 2. Biogenic transformation of the sewage sludge in the AU-TSN1ca,rr horizon at a depth of 10–30 cm (LG-01-22).

Для темногоумусовой зоотурбированной почвы характерен по всему профилю среднесуглинистый гранулометрический состав (табл. 2). Отмечено некоторое понижение содержания физической глины (37.42%) на глубине 35(40)–60 см. В мелкозем темногоумусовой почвы, как и в других ранее исследованных почвах днищ карт ПФ (Замотаев и др., 2023) преобладающими являются фракции крупной пыли (0.05–0.01 мм) и илистой фракции (<0.001 мм).

Подробная аналитическая характеристика агрочерноземов Львовского района, к которым относится и описанный разрез LG-04-22, приведена в предыдущих публикациях (Замотаев и др., 2001, 2016, 2018). Почвы характеризуются тяжелым гранулометрическим составом, отсутствием дифференциации по илу и признакам иллювирувания глины. Содержание гумуса в агротемногумусовом гор. PU колеблется от 3.9 до 5.7%. Близкая к нейтральной реакция среды наблюдается в большей части профиля до глубины с максимумом карбонатов, где она резко меняется на щелочную.

Верхняя часть горизонта PU агрочернозема дисперсно-карбонатного (LG-04-22), как показали морфологические исследования, мелкозернисто-комковатая с глыбистыми агрегатами, плотная (плотность 1.3 г/см³, твердость 27–30 мм). В нижних горизонтах ВСА проявляются признаки сегрегации железа: в порах железистые трубочки, стяжения и пятна на поверхности педов. На стенках трещин наблюдаются гумусовые кутаны и бурно вскипающие карбонатные пропитки. Все эти признаки вполне типичны для ранее описанных в литературе агрочерноземов Курской области (Афанасьева, 1966; Щеглов, 1999; Караваева, Денисенко, 2009; Базыкина, Овечкин, 2012; Мамонтов и др., 2020; Булышева и др., 2021; Белобров и др., 2023).

Макрофауна в почвах карт полей фильтрации. Почвенная макрофауна формируется представителями различных функциональных групп, являющимися индикаторами адаптации организмов к конкретным экологическим условиям.

Состав макрофауны. В исследованных почвах карт ПФ Львовского сахарного завода, а также прилегающей к ним пашни обнаружена разнообразная почвенная макрофауна. В целом на

момент отбора проб выявлено 19 таксонов (табл. 3). Все таксоны характерны для естественных черноземных почв лесостепной зоны (Злотин, Ходашова, 1974; по Мордкович, Любечанский, 2020). Обнаружены кольчатые черви (люмбрициды и энхитреиды), пауки, сенокосцы, улитки – гастроподы, многоножки (хилоподы и диплоподы), личинки чешуекрылых, перепончатокрылых, скорпионниц, имаго и личинки жесткокрылых (жужелицы, стафилиниды, шелкуны, долгоносики), личинки двукрылых. Это – представители из 8 классов и 16 отрядов. На момент отбора проб ни на одном из исследованных участков не найдены пластинчатоусые жуки и жуки-чернотелки, характерные для лесостепной зоны. Однако делать выводы об их полном отсутствии нельзя, и эти группы, возможно, будут обнаружены при последующих учетах макрофауны в другие периоды времени в связи с циклами развития и условиями окружающей среды.

По числу таксонов исследуемые почвы карт ПФ, выведенные из использования в разное время, близки между собой. В них установлено по 12 таксонов макрофауны. Однако сходство между участками по таксонам составляет не более 43% по коэффициенту Жаккара. Общие для участков ПФ – это дождевые черви, пауки, мокрицы, диплоподы, улитки-гастроподы, жужелицы, стафилиниды, личинки двукрылых. В темногомусовой техногенной артистратифицированной почве карты ПФ (LG-01-22), которая последний раз использовалась 2 года назад, обнаружены личинки чешуекрылых и скорпионниц. В темногомусовой зоотурбированной почве в заброшенной 45 лет назад карте (LG-05-20) – энхитреиды, хилоподы, сенокосцы, жуки-долгоносики.

Для обоих участков характерно большое количество улиток (*Gastropoda*). Однако в почве карты, которая затапливалась сточными водами 2 года назад, это живые особи, а на давно выведенной из эксплуатации – пустые раковинки. Улитки-гастроподы активно развиваются поздней осенью и в весенний период, что связано с разложением растительного опада и увлажнением почвы. Их пустые раковинки обычно обнаруживаются в конце летнего периода в верхнем горизонте почвы.

Таблица 3. Состав, численность, биомасса и тип питания почвенной макрофауны исследованных участков
Table 3. Composition, abundance, biomass and type of feeding of soil macrofauna in the studied areas

Состав макрофауны	LG-01-22	LG-05-20	LG-04-22	Тип питания
Класс Sedentaria, отряд Harplotaxida				
Семейство:				
Lumbricidae (<i>дождевые черви</i>)	3.0	18.0	2.7	сапрофаг
Lumbricidae(p) (<i>коконы дождевых червей</i>)	0.7	0.3	-	сапрофаг
Семейство:				
Enchytraeidae (<i>энхитреиды</i>)	-	4.0	2.0	сапрофаг
Класс Arachnida, отряд Aranea (<i>пауки</i>)	1.7	2.3	-	хищник
Класс Arachnida, отряд Opiliones (<i>сенокосцы</i>)		1.0	-	хищник
Класс Gastropoda (<i>улитки-гастроподы</i>)	11.7	+	-	фитофаг
Класс Malacostraca, отряд Isopoda, подотряд Oniscoidea (<i>ракообразные – мокрицы</i>)	1.7	0.3	-	сапрофаг
Класс Chilopoda, отряд Geophilomorpha, семейство Geophilidae (<i>многоножки – геофилиды</i>)	-	2.3	0.3	хищник
Класс Diplopoda (<i>многоножки – диплоподы</i>)	0.7	1.7	-	сапрофаг
Класс Insecta:				
Отряд Lepidoptera (I) (<i>чешуекрылые</i>)	0.7	-	-	фитофаг
Отряд Mecoptera (I) (<i>скорпионницы</i>)	0.3	-	-	хищник
Отряд Hymenoptera (I) (<i>перепончатокрылые</i>)	-	-	0.3	

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Состав макрофауны	LG-01-22	LG-05-20	LG-04-22	Тип питания
Отряд Coleoptera, семейство Carabidae (i) (<i>жуки жужелицы имаго</i>)	3.3	0.3	0.3	хищник
Carabidae (I) (<i>жуки жужелицы личинки</i>)	0.7	0.3	-	хищник
Отряд Coleoptera, семейство Staphylinidae (i) (<i>жуки стафилиниды имаго</i>)	9.3	0.7	0.3	хищник
Staphylinidae (I) (<i>жуки стафилиниды личинки</i>)	0.3	-	-	хищник
Отряд Coleoptera, семейство Elateridae (i) (<i>жуки щелкуны имаго</i>)	-	-	0.7	фитофаг
Elateridae (I) (<i>жуки щелкуны личинки</i>)	-	-	1.0	фитофаг
Отряд Coleoptera, семейство Curculionidae (I) (<i>жуки долгоносики личинки</i>)	-	1.3	-	фитофаг
Отряд Coleoptera (i)* (<i>жесткокрылые имаго</i>)	0.7	-	-	
Отряд Coleoptera (i)** (<i>жесткокрылые имаго</i>)	-	0.7	-	
Отряд Coleoptera (p) (<i>жесткокрылые куколки</i>)	0.3	-	-	
Отряд Diptera (I) (<i>двукрылые личинки</i>)	-	2.0	1.0	
Отряд Diptera (p) (<i>двукрылые пупарий</i>)	0.3	-	0.3	
Численность, экз./м²	565 ± 400	565 ± 70	144 ± 73	
Биомасса, г/м²	26.6 ± 21.4	42.6 ± 14.08	9.3 ± 7.68	

Обращает внимание отсутствие хищных многоножек – хилопод (семейство геофилиды), в темногумусовой техногенной аркти-стратифицированной почве. Эта группа беспозвоночных типична для верхних минеральных горизонтов почв лесостепной зоны. Ее отсутствие может свидетельствовать о влиянии физико-химических параметров, в первую очередь, присутствии не типичных для природных почв химических соединений, поступающих со сточными водами.

В агрочерноземе дисперсно-карбонатном число таксонов снижено до 8 (табл. 3). Здесь отсутствуют пауки, сенокосцы, улитки, мокрицы, диплоподы, личинки чешуекрылых, скорпионниц и жуков-долгоносиков. Общее сходство по составу макрофауны с почвами карт ПФ не более 25% по расчетам коэффициента Жаккара.

Численность макрофауны оказалась сходной в почвах на ПФ – 565 экз./м², что в несколько раз превышает численность в агрочерноземе на участке пашни, где обнаружено только 144 экз./м². Все полученные значения численности ниже показателей, характерных для естественных черноземных почв под лесными формациями Центрально-Черноземного заповедника (рис. 3), где численность может достигать 3 300 экз./м². В то же время они сопоставимы со степным нативным участком заповедника, численность почвенной макрофауны для которого составляет 484 экз./м².

Однако если исключить из анализа численность энхитреид – кольчатых малощетинковых червей (рис. 4), сборы которых методом ручной разборки могут быть неполноценными из-за малых размеров беспозвоночных, неприметной окраски (существуют отдельные методики учетов именно энхитреид), то полученные результаты по почвам ПФ становятся даже выше известных для Центрально-Черноземного заповедника. Численность макрофауны агрочернозема и в таком случае в несколько раз ниже известных данных (Мордкович, Любечанский, 2020).

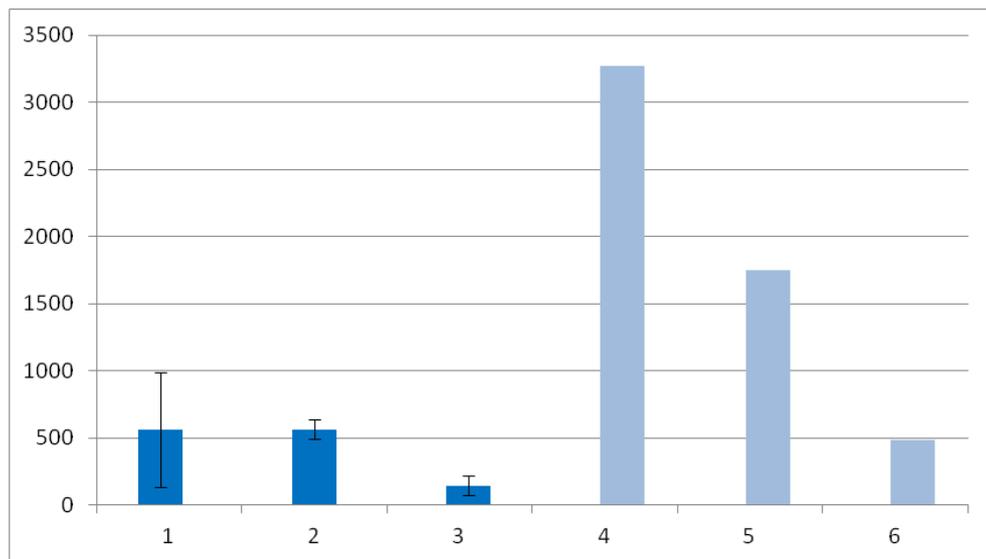


Рис. 3. Численность почвенной макрофауны (экз./м²). Пробные участки: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – дубрава, 5 – лесные луга на полянах, 6 – нативная луговая степь. Участки 4, 5, 6 – Центрально-Черноземный заповедник (Злотин, Ходашова, 1974, по Мордкович, Любечанский, 2020).

Fig. 3. Number of soil macrofauna (individuals/m²). Test plots: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – oak grove, 5 – forest meadows, 6 – native meadow steppe. Plots 4, 5, 6 – Central Chernozem Reserve (Zlotin, Khodashova, 1974, after Mordkovich, Lyubechansky, 2020).

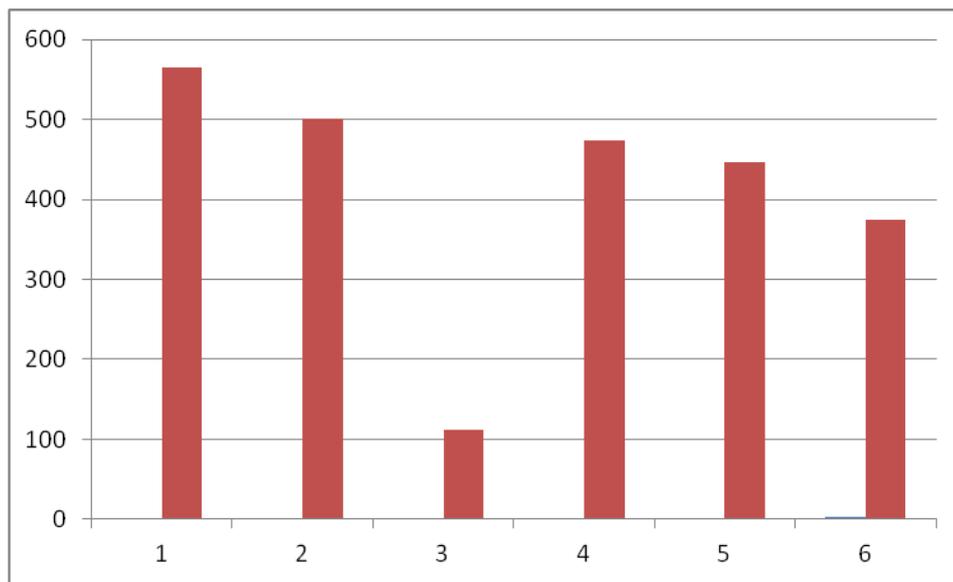


Рис. 4. Численность почвенной макрофауны без учета энхитреид (экз./м²). Пробные участки: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – дубрава, 5 – лесные луга на полянах, 6 – нативная луговая степь. Участки 4, 5, 6 – Центрально-Черноземный заповедник (Злотин, Ходашова, 1974; по Мордкович, Любечанский, 2020).

Fig. 4. Number of soil macrofauna excluding enchytraeids (individuals/m²). Test plots: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – oak grove, 5 – forest meadows, 6 – native meadow steppe. Plots 4, 5, 6 – Central Chernozem Reserve (Zlotin, Khodashova, 1974; after Mordkovich, Lyubechansky, 2020).

Доминантные комплексы. Анализ доминантных комплексов показал (табл. 4), что, при сходных значениях численности макрофауны почв карт ПФ, набор доминирующих групп, чья численность составляет от 5% и выше от общей на участке, значительно различается. В почвах обеих карт ПФ на момент отбора проб многочисленны дождевые черви и пауки, причем в темногомусовой зоотурбированной почве на заброшенной карте обилие дождевых червей составляет более 50% от общей численности макрофауны на участке. Только в темногомусовой техногенной арти-стратифицированной почве в состав доминантного комплекса входят улитки, мокрицы, жуки жужелицы и стафилиниды. Тогда как в темногомусовой зоотурбированной почве обильное количество составляют многоножки хилоподы семейства геофилид, диплоподы, энхитреиды и личинки двукрылых. Набор доминантов в почвах давно неиспользуемой (заброшенной) карты ПФ ближе к агрочерноземам. На этих участках установлены три группы беспозвоночных с высокой численностью – дождевые черви, энхитреиды и личинки двукрылых. При этом на долю дождевых червей в агрочерноземе пашни и в темногомусовой почве заброшенной карты приходится более 30% от общей численности макрофауны. Кроме того, в агрочерноземе в составе доминантного почвенного комплекса присутствуют жуки щелкуны – типичные обитатели агроценозов; в почвах карт ПФ жуки щелкуны не были обнаружены ни в личиночной стадии, ни в стадии имаго.

Трофическая структура. Если сопоставить обнаруженные на исследуемых участках доминантные комплексы макрофауны с характером питания беспозвоночных (трофические предпочтения), то обнаруживаются следующие особенности. В темногомусовой техногенной арти-стратифицированной почве (LG-01-22) в составе комплекса макрофауны преобладают хищники – 40% и фитофаги – 33% (суммарно более 70%). Сапрофаги составляют только 10%. В темногомусовой зоотурбированной почве (LG-05-20) на заброшенной 45 лет назад карте сапрофаги составляют уже 72% (из которых 51% приходится на дождевых червей), доля хищников снижается до 17%, а количество фитофагов не превышает 3%. Это оказывает большое влияние на реорганизацию почвенной массы и трансформацию органического вещества, спо-

собствуя процессам гумификации, что подтверждается морфоаналитическими исследованиями и дополняет имеющиеся в литературе материалы.

Таблица 4. Доминантный комплекс макрофауны исследованных участков

Table 4. Dominant macrofauna complex in the studied areas

Состав макрофауны	LG-01-22	LG-05-20	LG-04-22
Lumbricidae	8	51	30
Aranea	5	7	н. о.
Gastropoda	33	н. о.	н. о.
Oniscoidea	5	1	н. о.
Carabidae (i)	9	1	4
Staphylinidae (i)	26	2	4
Geophilidae	н. о.	7	4
Diplopoda	2	5	н. о.
Diptera (l)	н. о.	6	11
Enchytraeidae	н. о.	11	22
Elateridae (i)	н. о.	н. о.	7
Elateridae (l)	н. о.	н. о.	11

Примечание. н. о. – не обнаружены.

Note. н. о. – not found.

В агропочве более 52% численности составляют сапрофаги (прежде всего дождевые черви, а также энхитреиды) и фитофаги – 18%. На долю хищников приходится около 12%, что значительно ниже доли хищников в почвах карт.

Биомасса. По обнаруженным значениям биомассы макрофауны участки карт ПФ в 3–5 раз превышают биомассу на участке пашни и составляют от 20 до 40 грамм на м² (рис. 5). Основной вклад в этот показатель на всех участках вносит биомасса дождевых червей. Биомасса макрофауны карт ПФ сопоставима с биомассой макрофауны в черноземе под луговой степью (Гиляров, Чернов, 1975), однако в 2–3 раза ниже, чем для серых лесных почв и черноземов под дубравами.

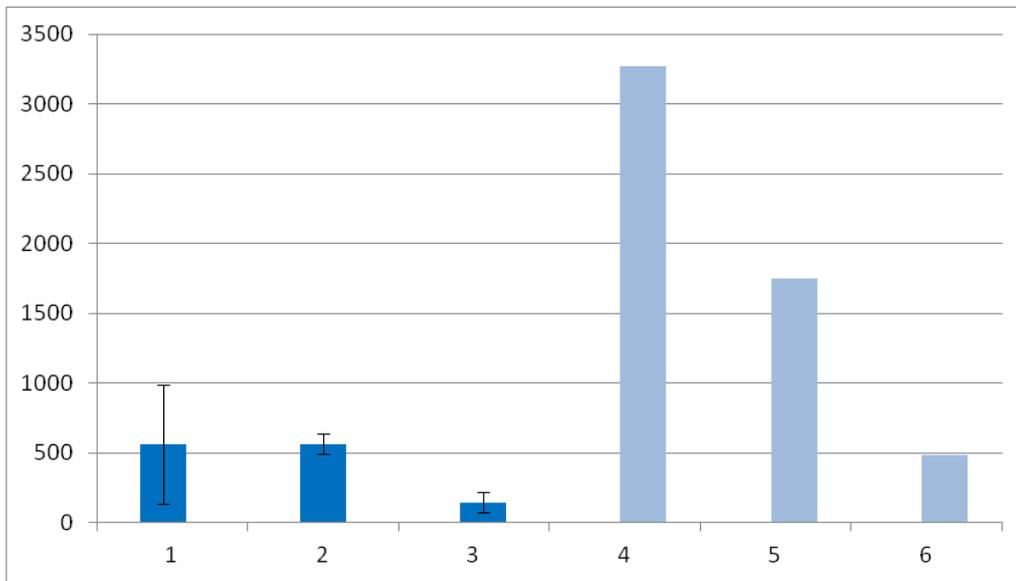


Рис. 5. Биомасса почвенной макрофауны (г/м²). Пробные участки: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – дубрава на серой лесной почве, 5 – дубрава на черноземе, 6 – луговая степь на черноземе (участки 4, 5, 6 – Гиляров, Чернов, 1975, по Мордкович, Любечанский, 2020).

Fig. 5. Biomass of soil macrofauna (g/m²). Test plots: 1 – LG-01-22, 2 – LG-05-20, 3 – LG-04-22, 4 – oak grove on gray forest soil, 5 – oak grove on chernozem, 6 – meadow steppe on chernozem (plots 4, 5, 6 – Gilyarov, Chernov, 1975, after Mordkovich, Lyubechansky, 2020).

Микроорганизмы в почвах. В результате микробиологических исследований почв дниц карт выяснилось нетипичное распределение бактерий по профилю по сравнению с фоновыми черноземами Курской биосферной станции (Mikheev et al., 2021). В поверхностных горизонтах – органогенном и темногумусовом (0–10 см) – техногенной арти-стратифицированной почвы в карте, не используемой в течение 2 лет (LG-01-22) и покрытой в момент описания эхиноцистисом дольчатым (*Echinocystis labata*), установлены близкие высокие величины численности бактерий, обладающих двумя типами стратегий: быстрорастущие сапрофитные и олиготрофные (способные расти в почве с низким содержанием органических веществ) (рис. 6). Вниз по профилю их численность постепенно снижается, и с глубины 30 см (гор. ТСНЗ1с,гг) начинают преобладать не требовательные к элементам питания олиготрофные бактерии. В органогенном горизонте, состоящем из сухих растительных остатков, преимущественно фрагментов тростника обыкновенного с примесью карбонатного мелкозема, выявлено большое количество споровых форм. Как отмечалось, образцы, взятые для исследования, были отобраны в начале сентября, и возможной причиной увеличения численности споровых форм явилось летнее иссушение верхнего слоя.

Плесневые грибы – микромицеты обнаружены лишь до глубины 30 см от поверхности (рис. 7), что может быть связано как с водным режимом – большим увлажнением нижних горизонтов, так и с локализацией на поверхности почвы опада тростника обыкновенного. Особенностью изученного профиля является максимальная численность актиномицетов в погребенном трансформированном сточными водами абраземе аккумулятивно-карбонатном на глубине 55–100 см. Здесь они, по-видимому, включаются в трансформацию органического вещества погребенного горизонта естественной почвы (рис. 1), уже подвергшегося деструкции в период эксплуатации карты. Как известно, такое распределение не типично для природных почв, в которых вниз по профилю происходит значительное уменьшение количества микроорганизмов.

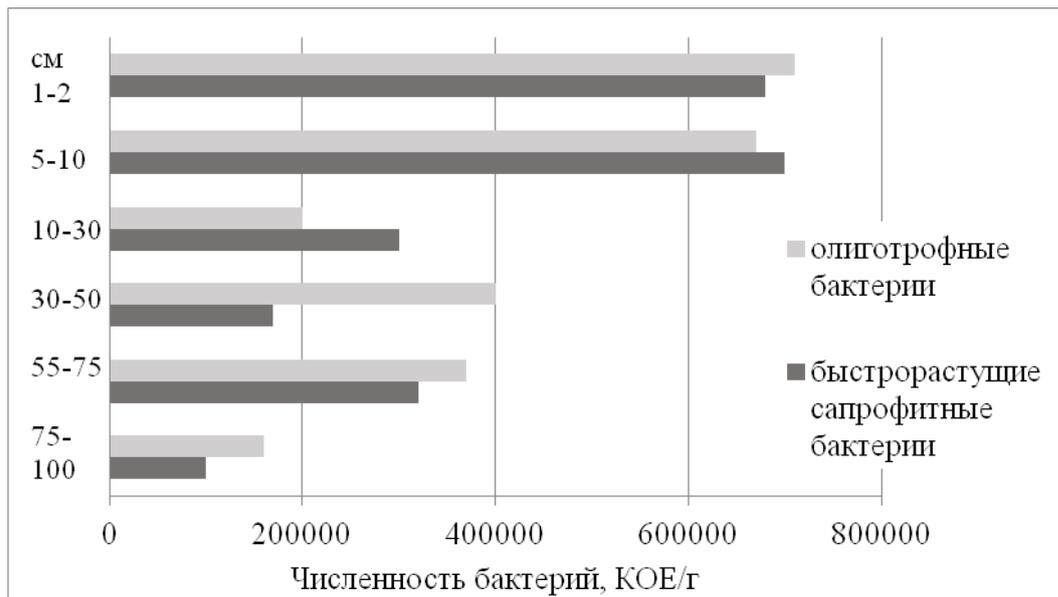


Рис. 6. Численность бактерий в темногумусовой техногенной арти-стратифицированной почве (LG-01-22).

Fig. 6. Number of bacteria in dark humus technogenic artistratified soil (LG-01-22).

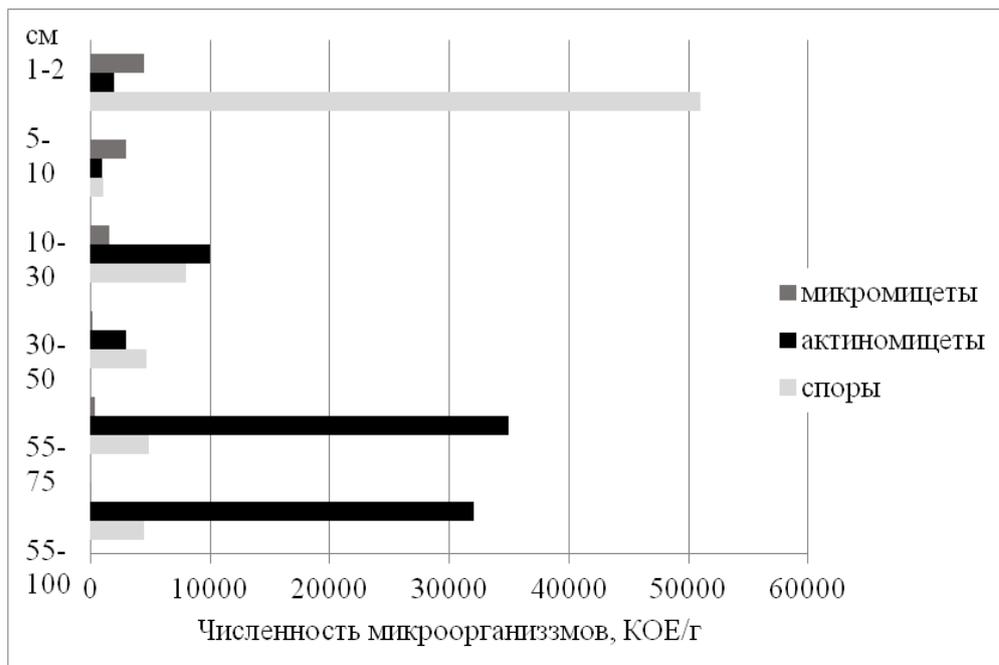


Рис. 7. Численность спор аэробных бактерий, актиномицетов и плесневых грибов в техногенной артистратифицированной почве (LG-01-22).

Fig. 7. Number of spores of aerobic bacteria, actinomycetes and mold fungi in technogenic artistratified soil (LG-01-22).

Использование метода MALDI-TOF MS позволило идентифицировать в почве *Bacillus marisflavi*, *Pseudomonas putida* и *Oceanobacillus kimchii*. Присутствовали непатогенные стафилококки в количестве 8×10^2 КОЕ/г, непатогенные псевдомонады (*Pseudomonas libanensis*, *Pseudomonas synxantha*), представители семейства энтеробактерий (*Buttiauxella agrestis*, *Serratia liquefaciens*), а также *Aeromonas eucrenophila* и энтерококки в количестве 5.0×10^2 КОЕ/г.

Изучение распределения численности бактерий по горизонтам профиля (LG-05-20) темногумусовой почвы карты ПФ, которая последний раз заливалась производственными сточными водами 45 лет назад, показало преобладание олиготрофов в верхнем темногумусовом горизонте (рис. 8).

В темногумусовом горизонте обнаружены олиготрофы и споровые формы бактерий (рис. 8, 9), что свидетельствует о не вполне благоприятных условиях для развития микроорганизмов. В переходных подгумусовых горизонтах (AUB) преобладают быстрорастущие сапрофитные бактерии (рис. 8), что связано с высоким содержанием на глубине 10–40 см легко разлагаемого (доступного) органического вещества ($C_{\text{орг}} = 1.75\%$). Во всех горизонтах присутствуют плесневые грибы, которые, являясь основными деструкторами сложных органических соединений (лигнин, хитин, дубильные вещества, целлюлоза), делают возможным дальнейшее их использование другими микроорганизмами. Обращает внимание высокая численность актиномицетов во всех горизонтах профиля (рис. 9), что не характерно для природных почв. В верхней части они разрушают растительный опад, а на глубине 30–40 см, по-видимому, выступают деструкторами труднодоступных полимеров в составе органических веществ, поступивших в почву со сточными водами и дефекацией во время использования карты.

Среди видов бактерий присутствовали *Stenotrophomonas maltophilia*, *Achromobacter xylosoxidans*, *Achromobacter piechaudii*, *Pseudomonas putida*, *Acinetobacter calcoaceticus*. На глубине 30–40 см определены *Serratia liquefaciens*, *Buttiauxella* sp., *Leclercia adecarboxylata*. Идентифицированы непатогенные стафилококки, их численность составила до 10^3 КОЕ/г.

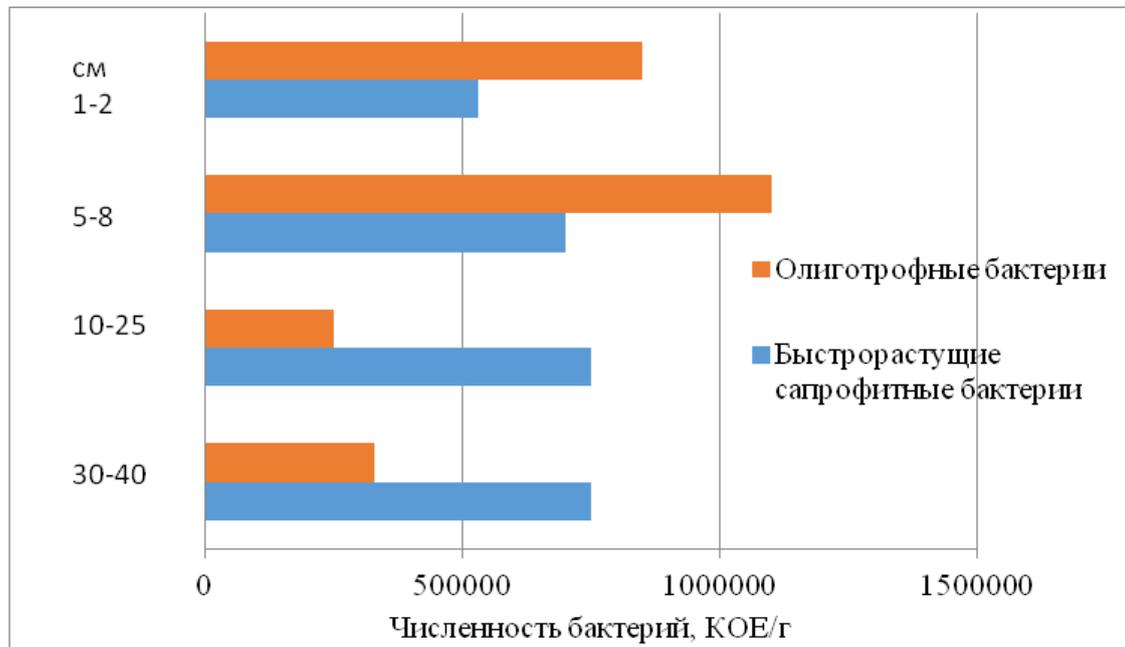


Рис. 8. Численность бактерий в различных горизонтах темногоhumусовой почвы (LG 05-20).

Fig. 8. Number of bacteria in different horizons of dark humus soil (LG 05-20).

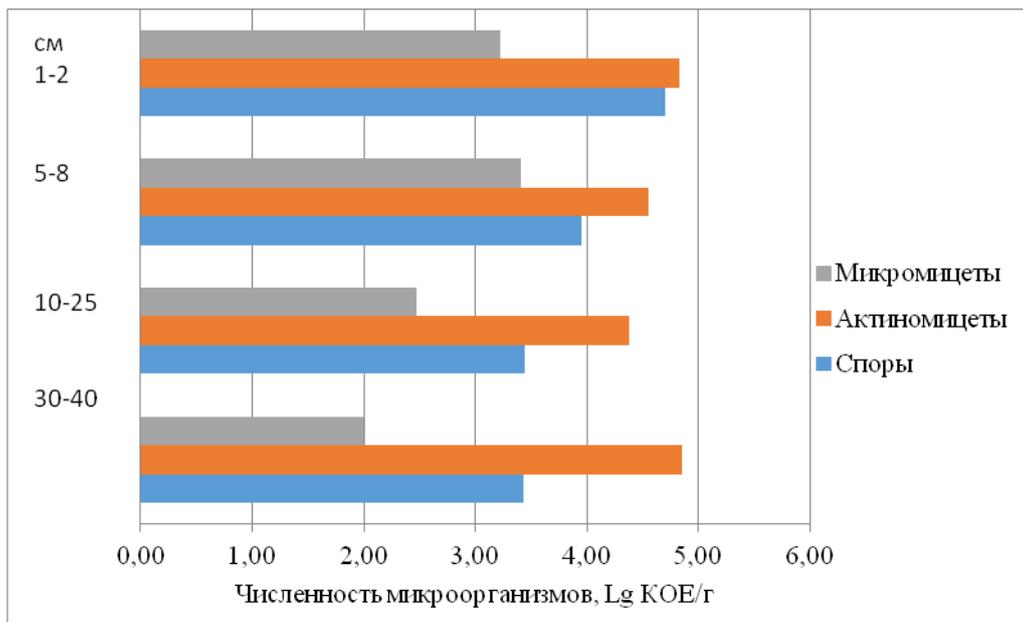


Рис. 9. Численность спор аэробных бактерий, актиномицетов и плесневых грибов в темногумусовой зоотурбированной почве (LG 05-20).

Fig. 9. Number of spores of aerobic bacteria, actinomycetes and mold fungi in dark humus zooturbated soil (LG 05-20).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвы ПФ формируются в специфических природно-техногенных условиях и по своим биологическим свойствам отличаются от природных почв. Значительное влияние на микробиологические сообщества и макрофауну оказывают влажность почв, а также обилие и разнообразие органических и минеральных веществ, поступающих на ПФ со сточными водами.

Все группы макрофауны в почвах ПФ характерны для черноземных почв лесостепных регионов. Однако полученные значения существенно ниже численности макрофауны черноземных почв под дубравами Центрально-Черноземного заповедника, но сопоставимы с биомассой беспозвоночных в черноземе под луговой степью. Этот показатель в значительной степени определяется количеством энхитреид, учет которых в дальнейшем из-за их малых размеров следует продолжить, с использованием специальной методики.

Биомасса макрофауны в техногенной арти-стратифицированной почве периодически действующей карты в 1.5 раза ниже, чем в темногумусовой зоотурбированной почве неиспользуемой карты. Несмотря на схожесть по набору таксонов (43%), у изученных почв ПФ есть ряд принципиальных различий. В почве карты, последний раз заливаемой 2 года назад, в составе комплекса макрофауны преобладают хищники и фитофаги (более 70%) при незначительном количестве сапрофагов. По нашему мнению, в основном это связано с поступлением техногенных стоков, обогащенных органическими веществами и биофильными элементами, что формирует особые условия существования почвенной биоты, не характерные для региональных природных местообитаний. Напротив, в почве давно неиспользуемой карты (45 лет) значительно выше численность сапрофагов (72%), среди них 51% приходится на дождевых червей. О результате активной деятельности последних свидетельствуют многочисленные и разнообразные признаки биогенной проработки материала в профиле на всех морфологических уровнях: разложение опада, биогенное оструктурирование, зоотурбации с формированием червороин, обилие копролитов различного размера, зоогенный перенос материала меж-

ду горизонтами.

Микрофлора в почвах ПФ и естественных черноземах миграционно-мицелиарных Курской биосферной станции идентичны по составу физиологических групп, но различаются по их количеству и распределению в профиле. Особенностью техногенной анти-стратифицированной почвы периодически заливаемой карты является отсутствие плесневых грибов в нижней части профиля, что может быть связано как с водным режимом – большим увлажнением нижних горизонтов, так и с локализацией на поверхности почвы опада тростника обыкновенного. Напротив, во всех горизонтах темногумусовой зоотурбированной почвы в карте, заброшенной 45 лет назад, обнаружены плесневые грибы. Кроме того, здесь наблюдается высокая численность актиномицетов, которые являются деструкторами органических веществ, поступивших в почву со сточными водами и дефекатом еще в период использования карты.

Для сравнения, судя по данным, в окружающих ПФ агро-черноземах дисперсно-карбонатных численность, биомасса и число таксонов беспозвоночных значительно меньше, что связано с неблагоприятными физическими свойствами пахотных почв (глыбистость, высокая плотность, сегрегация железа). Имеющиеся публикации по составу макрофауны в осваиваемых по традиционной технологии черноземах и почвах других типов подтверждают данную закономерность (Tsiafouli et al., 2015; Булгакова, 2017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьева Е.А.* Черноземы Средне-Русской возвышенности. М.: Наука, 1966. 227 с.
2. *Андрусевич Е.В., Жуков А.В., Кунах О.Н.* Экоморфическая организация сообществ мезопедобионтов как основа зоологической диагностики антропогенных почв // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 1126. Серія: біологія. Вип. 22. 2014. С. 86–97.
3. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
4. *Базыкина Г.С., Овечкин С.В.* Миграционно-мицелиарные черноземы Курской области в климатических и биосферных циклах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012. Вып. 70. С. 3–17.

DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-3-18).

5. Балабко П.Н., Хуснетдинова Т.И., Карпова Д.В., Славянский А.А. Влияние отходов свеклосахарного производства на плодородие дерново-подзолистой почвы при выращивании картофеля // *Агрохимический вестник*. 2014. № 6. С. 22–25.
6. Баранцевич Е.П., Баранцевич Н.Е. Применение MALDI-TOF масс-спектрометрии в клинической микробиологии // *Трансляционная медицина*. 2014. № 6. С. 23–28.
7. Белобров В.П., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Айдиев А.Я. Структура почвенного покрова и трансформация морфометрических параметров типичных черноземов в технологии прямого посева // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2023. Вып. 115. С. 5–31. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-115-5-31](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-5-31).
8. Булгакова М.А. Состав и численность дождевых червей как косвенный показатель физических свойств почв степных агроценозов Предуралья // *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 2. С. 227.
9. Булышева А.М., Хохлова О.С., Бакунович Н.О., Русаков А.В., Мякшина Т.Н. Изменение свойств почв залежного ряда Курской области и тренды восстановления постагрогенных почв лесостепной и степной зон // *Почвоведение*. 2021. № 8. С. 983–998.
10. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
11. Возняковская Ю.М., Курдюков Ю.Ф., Попова Ж.П., Лощинина Л.П. Оценка биологического состояния чернозема под различными севооборотами // *Почвоведение*. 1996. № 9. С. 1107–1111.
12. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
13. Всеволодова-Перель Т.С. Дождевые черви фауны России. Кадастр и определитель. М.: Наука, 1997. 102 с.
14. Гиляров М.С., Чернов Ю.И. Почвенные беспозвоночные в составе сообществ умеренного пояса // *Ресурсы биосферы*. Л.: Наука. 1975. Т. 1. С. 218–240.
15. Гиляров М.С., Криволицкий Д.А. Жизнь в почве. М.: Мол. гвардия, 1985. 191 с.
16. Гурин А.Г., Гнеушева В.В. Изменение агрохимических свойств почвы и ее биологической активности при использовании отходов сахарного производства на посевах яровой пшеницы // *Вестник аграрной науки*. 2018. № 1(70). С. 3–7.
17. Железова А.Д., Тхакахова А.К., Ярославцева Н.В., Гарбуз С.А., Лазарев В.И., Козут Б.М., Кутовая О.В., Холодов В.А.

- Микробиологические показатели агрегатов типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2017. № 6. С. 711–717.
18. *Замотаев И.В., Белобров В.П.* Эколого-генетические проблемы землепользования на Среднерусской возвышенности (на примере Льговского района Курской области) // Идеи В.В. Докучаева и современные проблемы сельской местности. Ч. 1. Москва–Смоленск, 2001. С. 18–24.
19. *Замотаев И.В., Белобров В.П., Курбатова А.Н., Белоброва Д.В.* Агрогенная и постагрогенная трансформация почв Льговского района Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 85. С. 97–114. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-97-114](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-97-114).
20. *Замотаев И.В., Белобров В.П., Юдин С.А., Белоброва Д.В.* Оценка почвенных свойств при мониторинге земель на регионально-локальном уровне // Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. 2018. Т. 42. № 2. С. 172–180.
21. *Замотаев И.В., Грачева Р.Г., Конопляникова Ю.В., Долгих А.В., Карелин Д.В., Белоновская Е.А., Добрянский А.С., Михеев П.В.* Почвообразование на отходах сахарной промышленности в Центральном Черноземье // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1450–1471.
22. *Замотаев И.В., Грачева Р.Г., Михеев П.В., Конопляникова Ю.В.* Формирование и трансформация почв в районах размещения отходов сахарной индустрии (обзор) // Почвоведение. 2022. № 8. С. 949–961.
23. *Караваяева Н.А., Денисенко Е.А.* Постагрогенные миграционно-мицелярные черноземы разновозрастных залежей южной лесостепи ЕТР // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1165–1176.
24. *Злотин Р.И., Ходашова К.С.* Роль животных в биологическом круговороте лесостепных экосистем. М.: Наука, 1974. 220 с.
25. *Иванов А.Н.* Влияние дефеката на свойства, плодородие серых лесных почв Бие-Чумышского междуречья и урожайность сельскохозяйственных культур. Автореф. дис. ... к. с./х. н. Барнаул, 2004. 18 с.
26. *Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Глаголев М.В., Добрянский А.С., Сабреков А.Ф., Замотаев И.В.* Годовой бюджет углеродсодержащих биогенных парниковых газов при смешанном землепользовании: Льговский район как модельный объект Центрального Черноземья // Почвоведение. 2023. № 8. С. 911–924.
27. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
28. *Козеев К.Ш., Стрелкова В.И., Тищенко С.А.* Влияние переувлажнения на биоту и свойства почв Юга России. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2006.

143 с.

29. *Коноплина Е.А.* Оценка воздействия вторичных ресурсов сахарного производства на биоресурсы агроэкосистем. Автореф. дис. ... к. с./х. наук. Воронеж, 2011. 20 с.

30. *Кутовая О.В., Никитин Д.А., Гераськина А.П.* Технология no-till как фактор активности почвенных беспозвоночных в агрочерноземах Ставропольского края // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 1. С. 199–210.

31. *Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Чевурдин Ю.И.* Влияние поверхностного переувлажнения на биологические свойства лугово-черноземных почв Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 82. С. 56–70. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-56-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70).

32. *Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р.* Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-182-201](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201).

33. Методы почвенно-зоологических исследований / Отв. ред. акад. *М.С. Гиляров*. М.: Наука, 1975. 279 с.

34. Микроорганизмы и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. 206 с.

35. *Минникова Т.В., Русева А.С., Колесников С.И., Труфанов Д.А.* Численность бактерий в нефтезагрязненном черноземе обыкновенном после ремедиации // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Т. 78. № 3. С. 65–75.

36. Мониторинг природных экосистем Центрально-Черноземного заповедника // Труды Центрально-Черноземного государственного заповедника. 2021. Вып. 20. 411 с.

37. *Мордкович В.Г.* Беспозвоночные животные и диагностика элементарных почвенных процессов // Почвоведение. 1991. № 10. С. 92–99.

38. *Мордкович В.Г.* Зоологическая диагностика почв: императивы, предназначение и место в составе почвенной зоологии и почвоведения // Журнал общей биологии. 2013. Т. 74. № 6. С. 463–471.

39. *Мордкович В.Г., Любечанский И.И.* Почвенные беспозвоночные русского лесостепья (обзор публикаций XX–XXI вв. и ревизия результатов) // Почвы и окружающая среда. 2020. № 4. С. 1–35.

40. *Никитин Д.А., Иванова Е.А., Железова А.Д., Семенов М.В., Гаджимаров Р.Г., Тхакахова А.К., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Кутовая О.В.* Оценка влияния технологии no-till и вспашки на микробиом южных агрочерноземов // Почвоведение. 2020. № 12.

С. 1508–1520.

41. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
42. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.
43. Пузанова Л.Н. Агроэкологическая оценка и сельскохозяйственное использование субстрата очистных сооружений свеклосахарных заводов: на примере ОАО “Сахарный комбинат “Льговский””: Автореф. дис. ... к. с-х. наук. Курск, 2009. 19 с.
44. Пухова Н.Ю., Верховцева Н.В., Ларина Г.Е. Структура микробного сообщества чернозема выщелоченного в зависимости от антропогенной нагрузки // Проблемы агрохимии и экологии. 2011. № 4. С. 42–47.
45. Рахлеева А.А. Роль зоогенных структур крупных почвенных беспозвоночных в создании и поддержании неоднородности почвенных свойств (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 3. С. 30–35.
46. Снегин Э.А., Артемчук О.Ю. Оценка степени устойчивости популяций виноградной улитки (*Helix pomatia*) к действию генотоксичных компонентов городской среды // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2018. Вып. 13(33). С. 110–114.
47. Щеглов Д.И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. М.: Наука, 1999. 211 с.
48. Щеглов Д.И., Чаплыгин Д.Ю., Говоров В.В. Почвенная мезофауна в черноземах Каменной степи // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2006. № 2. С. 184–189.
49. Coggan N.V., Hayward M.W., Gibb H. A global database and “state of the field” review of research into ecosystem engineering by land animals // J. Anim. Ecol. 2018. Vol. 87. P. 974–994. DOI: [10.1111/1365-2656.12819](https://doi.org/10.1111/1365-2656.12819).
50. Giebel R., Worden C., Rust S.M. et al. Microbial fingerprinting using matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS) applications and challenges // Adv. Appl. Microbiol. 2010. Vol. 71. P. 149–184.
51. Holland R.D., Wilkes H.G., Rafii F. et al. Rapid identification of intact whole bacteria based on spectral patterns using matrix-assisted laser desorption/ionization with time-of-flight mass spectrometry // Rapid Commun. Mass Spectrom. 1996. Vol. 10. P. 1227–1232.
52. IUSS Working Group WRB 2015 World Reference Base for Soil

Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps World Soil Resources Reports 106 (Rome: FAO). 192 p.

53. Lavelle P., Spain A., Blouin M., Brown G., Decaëns T., Grimaldi M., Jiménez J.J., McKay D., Mathieu J., Velasquez E., Zangerlé A. Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions // Soil Sci. 2016. Vol. 181. Iss. 3/4. P. 91–109. DOI: [10.1097/SS.000000000000155](https://doi.org/10.1097/SS.000000000000155).

54. Le Bayon R.-C., Bullinger-Weber G., Schomburg A., Turberg P., Schlaepfer R., Guenat C. Earthworms as Ecosystem Engineers: A Review. In Earthworms: Types, Roles and Research. New York: NOVA Science Publishers, 2017. P. 129–178. URL:

<https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A27067>.

55. Mikheev P., Zamotaev I., Telnova N. Microbial Features in Newly Formed Soils of Disposal Fields from Sugar Refineries // E3S Web of Conferences. Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM) 265.03009. 2021. Vol. 265. P. 1–5.

56. Tsiafouli M.A., Thébault E., Sgardelis S.P., De Ruiter P.C., Van Der Putten, W.H., Birkhofer K., Hemerik L., de Vries F.T., Bardgett R.D., Brady M.V., Bjornlund L., Jørgensen H.B., Christensen S., Hertefeldt T.D., Hotes S., Gera Hol W.H., Frouz J., Liiri M., Mortimer S.R., Setälä H., Tzanopoulos J., Uteseny K., Pižl V., Stary J., Wolters V., Hedlund K. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21(2). P. 973–985. DOI: [10.1111/gcb.12752](https://doi.org/10.1111/gcb.12752).

REFERENCES

1. Afanas'eva E.A., *Chernozemy Sredne-Russkoi vozvyshennosti* (Chernozems of the Central Russian Upland), Moscow: Nauka, 1966, 227 p.
2. Andrusevich E.V., Zhukov A.V., Kunakh O.N., *Ekomorфическая организација сообшчеств mezopedobiontov kak osnova zoologicheskoi diagnostiki antropogennykh pochv* (Ecomorphic organization of mesopedobiont communities as the basis for zoological diagnostics of anthropogenic soils), *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu imeni V.N. Karazina*, 2014, No. 1126, Seriya: biologiya, Vol. 22, pp. 86–97.
3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Guide to chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970, 487 p.
4. Bazykina G.S., Ovechkin S.V., Migration-mycelial chernozems in biospheric cycles within the Kursk region, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2012, Vol. 70, pp. 3–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2012-70-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-3-18).

5. Balabko P.N., Khusnetdinova T.I., Karpova D.V., Slavyanskii A.A., Vliyanie otkhodov sveklosakharnogo proizvodstva na plodorodie dernovo-podzolistoi pochvy pri vyrashchivanii kartofelya (The influence of beet sugar production waste on the fertility of soddy-podzolic soil when growing potatoes), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2014, No. 6, pp. 22–25.
6. Barantsevich E.P., Barantsevich N.E., Primenenie MALDI-TOF masspektrometrii v klinicheskoi mikrobiologii (Application of MALDI-TOF mass spectrometry in clinical microbiology), *Translyatsionnaya meditsina*, 2014, No. 6, pp. 23–28.
7. Belobrov V.P., Yudin S.A., Ermolaev N.R., Aidiev A.Ya., Soil cover structure and transformation of morphometric parameters of Haplic Chernozems under no-tillage, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 5–31, DOI: [10.19047/0136-1694-2023-115-5-31](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-5-31).
8. Bulgakova M.A., Sostav i chislennost' dozhdevykh chervei kak kosvennyi pokazatel' fizicheskikh svoystv pochv stepnykh agrotsenozov Predural'ya (Composition and abundance of earthworms as an indirect indicator of the physical properties of soils in steppe agrocenoses of the Cis-Urals), *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2017, No. 2, pp. 227.
9. Bulysheva A.M., Khokhlova O.S., Bakunovich N.O., Rusakov A.V., Myakshina T.N., Izmenenie svoystv pochv zalezhnogo ryada Kurskoi oblasti i trendy vosstanovleniya postagrogennykh pochv lesostepnoi i stepnoi zon (Changes in the properties of fallow soils in the Kursk region and trends in the restoration of postagrogenic soils in the forest-steppe and steppe zones), *Pochvovedenie*, 2021, No. 8, pp. 983–998.
10. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
11. Voznyakovskaya Yu.M., Kurdyukov Yu.F., Popova Zh.P., Loshchinina L.P., Otsenka biologicheskogo sostoyaniya chernozema pod razlichnymi sevooborotami (Assessment of the biological state of chernozem under various crop rotations), *Pochvovedenie*, 1996, No. 9, pp. 1107–1111.
12. Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochv* (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998, 272 p.
13. Vsevolodova-Perel' T.S., *Dozhdevye chervi fauny Rossii. Kadastr i opredelitel'* (Earthworms of Russian fauna. Cadastre and key), Moscow: Nauka, 1997, 102 p.
14. Gilyarov M.S., Chernov Yu.I., Pochvennye bespozvonochnye v sostave soobshchestv umerennogo poyasa (Soil invertebrates in temperate communities), In: *Resursy biosfery*, Leningrad: Nauka, 1975, Vol. 1, pp. 218–240.

15. Gilyarov M.S., Krivolutskii D.A., *Zhizn' v pochve* (Life in the soil), Moscow: Mol. gvardiya, 1985, 191 p.
16. Gurin A.G., Gneusheva V.V., *Izmenenie agrokhimicheskikh svoystv pochvy i ee biologicheskoi aktivnosti pri ispol'zovanii otkhodov sakharnogo proizvodstva na posevakh yarovoi pshenitsy* (Changes in the agrochemical properties of soil and its biological activity when using sugar production waste on spring wheat crops), *Vestnik agrarnoi nauki*, 2018, No. 1(70), pp. 3–7.
17. Zhelezova A.D., Tkhakakhova A.K., Yaroslavtseva N.V., Garbuz S.A., Lazarev V.I., Kogut B.M., Kutovaya O.V., Kholodov V.A., *Mikrobiologicheskie pokazateli agregatov tipichnykh chernozemov v mnogoletnikh polevykh opytakh* (Microbiological parameters of aggregates of typical chernozems in long-term field experiments), *Pochvovedenie*, 2017, No. 6, pp. 711–717.
18. Zamotaev I.V., Belobrov V.P., *Ekologo-geneticheskie problemy zemlepol'zovaniya na Srednerusskoi vozvyshennosti (na primere L'govskogo raiona Kurskoi oblasti)* (Ecological and genetic problems of land use in the Central Russian Upland (using the example of the Lgovsky district of the Kursk region)), In: *Idei V.V. Dokuchaeva i sovremennye problemy sel'skoi mestnosti*. Part. 1. Moscow – Smolensk, 2001, pp. 18–24.
19. Zamotaev I.V., Belobrov V.P., Kurbatova A.N., Belobrova D.V., *Anthropogenic and post-Anthropogenic transformation of soils of l'gov region of kursk oblast*, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 85, pp. 97–114, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-97-114](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-97-114).
20. Zamotaev I.V., Belobrov V.P., Yudin S.A., Belobrova D.V., *Otsenka pochvennykh svoystv pri monitoringe zemel' na regional'no-lokal'nom urovne* (Assessment of soil properties during land monitoring at the regional-local level), *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya Estestvennyye nauki*, 2018, Vol. 42, No. 2, pp. 172–180.
21. Zamotaev I.V., Gracheva R.G., Konoplyanikova Yu.V., Dolgikh A.V., Karelin D.V., Belonovskaya E.A., Dobryanskii A.S., Mikheev P.V., *Pochvoobrazovanie na otkhodakh sakharnoi promyshlennosti v Tsentral'nom Chernozem'e* (Soil formation on waste from the sugar industry in the Central Black Earth Region), *Pochvovedenie*, 2023, No. 11, pp. 1450–1471.
22. Zamotaev I.V., Gracheva R.G., Mikheev P.V., Konoplyanikova Yu.V., *Formirovanie i transformatsiya pochv v raionakh razmeshcheniya otkhodov sakharnoi industrii (obzor)* (Formation and transformation of soils in areas where sugar industry waste is disposed of (review)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 8, pp. 949–961.
23. Karavaeva N.A., Denisenko E.A., *Postagrogennyye migratsionno-mitselyarnyye chernozemy raznovozrastnykh zalezhei yuzhnoi lesostepi ETR* (Postagrogenic migration-mycelial chernozems of deposits of different ages in

the southern forest-steppe of the EPR), *Pochvovedenie*, 2009, No. 10, pp. 1165–1176.

24. Zlotin R.I., Khodashova K.S., *Rol' zhivotnykh v biologicheskom krugovorote lesostepnykh ekosistem* (The role of animals in the biological cycle of forest-steppe ecosystems), Moscow: Nauka, 1974, 220 p.

25. Ivanov A.N., *Vliyanie defekata na svoistva, plodorodie serykh lesnykh pochv Bie-Chumyshskogo mezhdurech'ya i urozhainost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur: Avtoref. dis. ... kand. s./kh. n.* (The influence of defecate on the properties, fertility of gray forest soils of the Bie-Chumysh interfluvium and the productivity of agricultural crops, Extended abstract of Cand. Agri. Sci. theses), Barnaul, 2004, 18 p.

26. Karelin D.V., Sukhoveeva O.E., Glagolev M.V., Dobryanskii A.S., Sabrekov A.F., Zamotaev I.V., *Godovoi byudzhnet uglerodsoderzhashchikh biogennykh parnikovyykh gazov pri smeshannom zemlepol'zovanii: L'govskii raion kak model'nyi ob'ekt Tsentral'nogo Chernozem'ya* (Annual budget of carbon-containing biogenic greenhouse gases for mixed land use: Lgov region as a model object of the Central Black Earth Region), *Pochvovedenie*, 2023, No. 8, pp. 911–924.

27. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.

28. Kozeev K.Sh., Strelkova V.I., Tishchenko S.A., *Vliyanie pereuvlazhneniya na biotu i svoistva pochv Yuga Rossii* (Impact of overwatering on biota and soil properties in the South of Russia), Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2006, 143 p.

29. Konoplina E.A., *Otsenka vozdeistviya vtorichnykh resursov sakharnogo proizvodstva na bioresursy agroekosistem: Avtoref. dis. ... kand. s./kh. nauk* (Assessment of the impact of secondary resources from sugar production on the bioresources of agroecosystems, Extended abstract of Cand. Agri. Sci. theses), Voronezh, 2011, 20 p.

30. Kutovaya O.V., Nikitin D.A., Geras'kina A.P., *Tekhnologiya no-till kak faktor aktivnosti pochvennykh bespozvonochnykh v agrochernozemakh Stavropol'skogo kraya* (No-till technology as a factor in the activity of soil invertebrates in agrochernozems of the Stavropol Territory), *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2021, Vol. 56, No. 1, pp. 199–210.

31. Kutovaya O.V., Tkhakakhova A.K., Cheverdin Yu.I., *Effects of surface flooding on biological properties of meadow-chernozems in Kamennaya steppe*, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 82, pp. 56–70, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-56-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70).

32. Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R., *Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use*, *Dokuchaev Soil*

Bulletin, 2020, Vol. 101, pp. 182–201, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-182-201](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201).

33. *Metody pochvenno-zoologicheskikh issledovanii* (Methods of soil zoology research), M.S. Gilyarov (Ed.), Moscow: Nauka, 1975, 279 p.

34. *Mikroorganizmy i okhrana pochv* (Microorganisms and soil protection), Moscow: Izd-vo MGU, 1989, 206 p.

35. Minnikova T.V., Ruseva A.S., Kolesnikov S.I., Trufanov D.A., Chislennost' bakterii v neftezagryaznennom chernozeme obyknovennom posle remediatsii (The number of bacteria in oil-contaminated ordinary chernozem after remediation), *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 17, Pochvovedenie*, 2023, Vol. 78, No. 3, pp. 65–75.

36. Monitoring prirodnykh ekosistem Tsentral'no-Chernozemnogo zapovednika (Monitoring of natural ecosystems of the Central Black Earth Reserve), *Trudy Tsentral'no-Chernozemnogo gosudarstvennogo zapovednika*, 2021, Iss. 20, 411 p.

37. Mordkovich V.G., Bespozvonochnye zhivotnye i diagnostika elementarnykh pochvennykh protsessov (Invertebrate animals and diagnostics of elementary soil processes), *Pochvovedenie*, 1991, No. 10, pp. 92–99.

38. Mordkovich V.G., Zoologicheskaya diagnostika pochv: imperativy, prednaznachenie i mesto v sostave pochvennoi zoologii i pochvovedeniya (Zoological diagnostics of soils: imperatives, purpose and place in soil zoology and pedology), *Zhurnal obshchei biologii*, 2013, Vol. 74, No. 6, pp. 463–471.

39. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I., Pochvennye bespozvonochnye russkogo lesostep'ya (obzor publikatsii XX–XXI vv. i reviziya rezultatov) (Soil invertebrates of the Russian forest-steppe (review of publications of the XX–XXI centuries and revision of the results)), *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2020, No. 4, pp. 1–35.

40. Nikitin D.A., Ivanova E.A., Zhelezova A.D., Semenov M.V., Gadzhumarov R.G., Tkhakakhova A.K., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Kutovaya O.V., Otsenka vliyaniya tekhnologii no-till i vspashki na mikrobiom yuzhnykh agrochernozemov (Assessment of the impact of no-till technology and plowing on the microbiome of southern agrochernozems), *Pochvovedenie*, 2020, No. 12, pp. 1508–1520.

41. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field guide to soils in Russia), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

42. Prokofeva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E., Vvedenie pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskikh territorii v klassifikatsiyu pochv Rossii (Introduction of soils and soil-like

formations of urban areas into the soil classification of Russia), *Pochvovedenie*, 2014, No. 10, pp. 1155–1164.

43. Puzanova L.N., *Agroekologicheskaya otsenka i sel'skokhozyaistvennoe ispol'zovanie substrata ochistnykh sooruzhenii sveklosakharnykh zavodov: na primere OAO "Sakharnyi kombinat "L'govskii": Avtoref. dis. ... kand. s-kh. nauk* (Agroecological assessment and agricultural use of the substrate of treatment facilities of beet sugar factories: on the example of OJSC "Sugar Plant "L'govsky", Extended abstract of Cand. Agri. Sci. theses), Kursk, 2009, 19 p.

44. Pukhova N.Yu., Verkhovtseva N.V., Larina G.E., *Struktura mikrobnogo soobshchestva chernozema vyshchelochennogo v zavisimosti ot antropogennoi nagruzki* (Structure of the microbial community of leached chernozem depending on anthropogenic load), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2011, No. 4, pp. 42–47.

45. Rakhleeva A.A., *Rol' zoogennykh struktur krupnykh pochvennykh bespozvonochnykh v sozdanii i podderzhanii neodnorodnosti pochvennykh svoystv (obzor)*, *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17: Pochvovedenie*, 2022, No. 3, pp. 30–35.

46. Snegin E.A., Artemchuk O.Yu., *Otsenka stepeni ustoichivosti populyatsii vinogradnoi ulitki (Helix pomatia) k deistviyu genotoksichnykh komponentov gorodskoi sredy* (The role of zoogenic structures of large soil invertebrates in the creation and maintenance of heterogeneity of soil properties (review)), In: *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, Sevastopol': IPTS, 2018, Vol. 13(33), pp. 110–114.

47. Shcheglov D.I., *Chernozemy tsentra Russkoi ravniny i ikh evolyutsiya pod vliyaniem estestvennykh i antropogennykh faktorov* (Chernozems of the center of the Russian Plain and their evolution under the influence of natural and anthropogenic factors), Moscow: Nauka, 1999, 211 p.

48. Shcheglov D.I., Chaplygin D.Yu., Govorov V.V., *Pochvennaya mezofauna v chernozemakh Kamennoi stepi* (Soil mesofauna in the chernozems of the Kamennaya Steppe), *Vestnik VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2006, No. 2, pp. 184–189.

49. Bayon R.C., Bullinger-Weber G., Schomburg A. et al. Earthworms as ecosystem engineers: A review, In: *Earthworms – Types, Roles and Research*, New York, 2017, URL:

<https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A27067>.

50. Coggan N.V., Hayward M.W., Gibb H., A global database and “state of the field” review of research into ecosystem engineering by land animals, *J. Anim. Ecol.*, 2018, Vol. 87, pp. 974–994, DOI: [10.1111/1365-2656.12819](https://doi.org/10.1111/1365-2656.12819).

51. Giebel R., Worden C., Rust S.M. et al., *Microbial fingerprinting using matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry*

(MALDI-TOF MS) applications and challenges, *Adv. Appl. Microbiol.*, 2010, Vol. 71, pp. 149–184.

52. Holland R.D., Wilkes H.G., Rafii F. et al., Rapid identification of intact whole bacteria based on spectral patterns using matrix-assisted laser desorption/ionization with time-of-flight mass spectrometry, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 1996, Vol. 10, pp. 1227–1232.

53. IUSS Working Group WRB 2015, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps World Soil Resources Reports 106. Rome: FAO, 192 p.

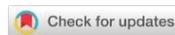
54. Lavelle P., Spain A., Blouin M., Brown G., Decaëns T., Grimaldi M., Jiménez J.J., McKey D., Mathieu J., Velasquez E., Zangerlé A., Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions, *Soil Sci.*, 2016, Vol. 181, Iss. 3/4, pp. 91–109, DOI: [10.1097/SS.000000000000155](https://doi.org/10.1097/SS.000000000000155).

55. Mikheev P., Zamotaev I., Telnova N., Microbial Features in Newly Formed Soils of Disposal Fields from Sugar Refineries, *E3S Web of Conferences. Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM)*, 265. 03009, 2021, Vol. 265, pp. 1–5.

56. Tsiafouli M.A., Thébault E., Sgardelis S.P., De Ruiter P.C., Van Der Putten, W.H., Birkhofer K., Hemerik L., de Vries F.T., Bardgett R.D., Brady M.V., Bjornlund L., Jørgensen H.B., Christensen S., Hertefeldt T.D., Hotes S., Gera Hol W.H., Frouz J., Liiri M., Mortimer S.R., Setälä H., Tzanopoulos J., Uteseny K., Pižl V., Stary J., Wolters V., Hedlund K., Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21(2), pp. 973–985, DOI: [10.1111/gcb.12752](https://doi.org/10.1111/gcb.12752).

УДК 638.47

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-200-240



Ссылки для цитирования:

Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Почвенные карты городов для унифицированной цифровой модели почвенного покрова России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 200-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-200-240

Cite this article as:

Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Soil maps of cities for the unified digital model of the soil cover of Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 200-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-200-240

Благодарность:

Авторы благодарны И.Ю. Савину за поддержку тематики исследования и ценные советы, С.В. Чуванову за цифровую обработку картографических материалов и И.А. Мартыненко за подборку информации о почвенных картах городов. Работа выполнена в рамках темы НИР 0439-2022-0011 “Усовершенствовать подходы к картографированию, мониторингу и классификации почв для информационного обеспечения оптимизации использования почвенных ресурсов России”.

Acknowledgments:

The authors are grateful to I.Yu. Savin for supporting the research topic and valuable advice, to S.V. Chuvanov for digital processing of cartographic materials and to I.A. Martynenko for compilation of information on soil maps of cities. The work was carried out within the framework of the research topic 0439-2022-0011 “Improve approaches to mapping, monitoring and classification of soils for information support of optimisation of soil resources use in Russia”.

Почвенные карты городов для унифицированной цифровой модели почвенного покрова России

© 2024 г. Т. В. Ананко^{1*}, М. И. Герасимова^{1,2**},
Н. В. Савицкая^{1***}

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

* e-mail: anankotat@yandex.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com,

e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru.

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

Поступила в редакцию 04.03.2024, после доработки 20.08.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Почвенный покров городов в административных границах включает почвы в разной степени нарушенные или вновь созданные антропогенными процессами, а также непочвенные образования. С целью отражения многообразия почв городов на унифицированной цифровой модели почвенного покрова России, создаваемой на основе Почвенной карты РФ масштаба 1 : 2.5 млн, были составлены почвенные карты 10 средних по численности населения городов России, расположенных в разных природных зонах. Картографирование проводилось дистанционным методом визуального дешифрирования по спутниковым данным Google Earth, на основе информации о природных почвах и представлений о городских почвах и их связях с городской средой, сложившихся в последние десятилетия при изучении почв Москвы, С.-Петербурга, Волгограда и ряда других городов страны. Городские почвы диагностировались по правилам классификации почв России, а их ареалы рассматривались как комбинации почв и непочвенных поверхностных образований. Во всех взятых в выборку городах выделены три группы почв и почвенных комбинаций по типу землепользования: собственно городские, сельскохозяйственные и природные. Их соотношение в городах зависит как от социально-экономических и исторических, так и от природных факторов.

Ключевые слова: визуальное детальное дешифрирование; урбостратоземы и урбо-почвы; Google Earth.

Soil maps of cities for the unified digital model of the soil cover of Russia

© 2024 T. V. Ananko^{1*}, M. I. Gerasimova^{1,2**}, N. V. Savitskaya^{1***}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*e-mail: anankotat@yandex.ru,

**
<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com,

e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru.

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.*

Received 04.03.2024, Revised 20.08.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: The soil cover of cities and towns within their administrative boundaries is composed of soils, more or less modified by the urban environment along with native, agricultural soils and non-soils. For preserving this diversity when introducing these new objects to the unified digital model of the soil cover of Russia, soil maps of 10 “test” cities have been compiled. The cities are located in several natural zones, and are intermediate in terms of their population. Mapping was performed by means of detailed purposeful deciphering, data on mapping units on the original soil map, and recent systematics of urban soils and their dependence on the urban environment. The approaches applied were supported by the experience in soil mapping of St-Petersburg, Moscow, Volgograd and few other cities. Soils were qualified in the system of Russian soil classification, and their areas, along with those of non-soils, were regarded as units in the theory of soil cover patterns. In all cities investigated, soil associations comprised urban soils *per se*, transitional soils including agro-soils and conventionally native ones; their ratios in the soil cover depend on both historical-socio-economical reasons and the natural environment.

Keywords: visual detailed deciphering; functional zones; urbopedocombinations; urbostratozems and urbo-soils.

ВВЕДЕНИЕ

В Почвенном институте им. В.В.Докучаева проводится работа по созданию унифицированной цифровой модели (УЦМ) почвенного покрова России с разрешением 500 м на основе Почвенной карты РСФСР (ПКРФ, 1988) масштаба 1 : 2.5 млн. Модель создается в системе классификации и диагностики почв России (КиДПР, 2004/2008), и в нее вводятся антропогенно-измененные почвы. Агрогенные почвы были введены на УЦМ по определенным правилам из обновленной Базы Данных (БД) ПКРФ (Жоголев, Савин, 2016; Савин и др., 2017; Герасимова и др., 2023). Для городских почв аналогичный подход оказался не “работающим” из-за несоответствия размеров большинства городов масштабу карты и многообразия почв в современном городе, поскольку оно включает собственно городские почвы, природные, агрогенные почвы и непочвенные образования. В результате характеристика

ареалов в почвенном покрове города может состоять из 10–15 почв, которые сложно внести напрямую в БД карты. Имеющихся в данный момент в обновленной БД двух городских почв (урбостратоземы и экраноземы) явно недостаточно для отражения почвенного покрова городов на УЦМ.

Наиболее адекватным и информативным способом представления почв городов на УЦМ могут быть карты городских почвенных комбинаций, в которых учитываются соотношения различных городских и (полу-) природных почв. Картографирование почвенного покрова городов, как вариантов почвенных комбинаций, было использовано для С.-Петербурга (Апарин, Сухачева, 2013, 2014), Москвы (Большой..., 2012), Ростова-на Дону (Горбов, 2018), Волгограда (Гордиенко и др., 2019); Перми (Шестаков и др., 2014), где картографические единицы содержат несколько почв, соответствующих мозаичности территории, создаваемой зданиями, зеленой инфраструктурой, дорогами, т. е. экономическими и социальными факторами. Сравнительно редко единица легенды бывает представлена одной почвой (Гордиенко, Манаенков, 2018). В терминах теории структуры почвенного покрова (Фридланд, 1972) почвенный покров городской застройки можно рассматривать как мозаики, т. к. он состоит из не связанных между собой контрастных элементов, и этот термин был использован Б.Ф. Апариним и Е.Ю. Сухачевой на почвенной карте С.-Петербурга. Для почвенной карты Перми И.Ю. Шестаков предложил термин “урбопедокомплексы” (УПК): “комбинации почв и ТПО в пределах одной функциональной зоны на одинаковых почвообразующих породах. УПК отличались по преобладающим почвам и ТПО, которые унаследовали некоторые признаки природных почв и почвообразующих пород, трансформированных основным типом землепользования” (Шестаков и др., 2014).

Цель работы: Дистанционным методом детального визуального дешифрирования по спутниковым данным Google Earth создать модели почвенных карт типичных, т. е. средних по численности населения, городов разных природных зон в идеологии и номенклатуре классификации почв России для внесения этой информации на УЦМ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – городские почвы. Определения.

В настоящее время накоплен значительный опыт картографирования почвенного покрова городов (Кулик и др., 2015; Шестаков и др., 2014, 2014а; Гордиенко и др., 2019; Калманова, Матюшкина, 2013 и др.). В названиях почв используются разные классификации. Среди почвоведов широко известна классификация городских почв М.Н. Строгановой, в которой почвы разделяются по их положению в городской среде и частично по свойствам (Строганова, и др., 1997; Строганова, 1998; Герасимова, Строганова и др., 2003). В легендах некоторых карт эта классификация сочетается с другими подходами, как индивидуальными, так и использующими элементы Классификации и диагностики почв России (КиДПР, 2008) (Апарин, Сухачева, 2013, 2014; Гордиенко и др., 2019; Кулик и др., 2015; Серeda, Куролап, 2019).

Работа по созданию УЦМ ведется в формате классификации почв России, хотя для городских почв она недостаточно разработана. По этой причине в работе используются предложения специалистов, собранные в ходе обсуждения вопросов классификации городских почв, посвященному их встраиванию в КиДПР (Прокофьева и др., 2014).

В соответствии с принципами КиДПР, диагностика городских почв основывается на комбинации в почвенном профиле разных диагностических горизонтов и признаков, в данном случае “чисто городских”: горизонта “урбик” **UR** и производного от него признака “урбистратифицированный” **ur** (рис. 1).

Центральным образом городских почв являются *урбостратоземы* отдела стратоземов ствола синлитогенных почв. Городской вариант стратоземов с регулярным накоплением городских артефактов и мелкозема был определен как урбостратозем. Горизонт UR в урбостратоземе имеет мощность > 50 см, подстилается различными грунтами или остатками прежней почвы. Почвы с менее резко выраженными “городскими” чертами и мощностью UR < 50 см выделяются как урбо-почвы (например, урбочерноземы). Слабое влияние городской среды: наличие на поверхности природных почв (или агро-почв) насыпанного мелкозема с городски-

ми артефактами, нарушения верхних 5–10 см отражается признаком “урбистратифицированный” ur, добавляемым к индексам природных горизонтов. Особую группу составляют экраноземы – почвы дорог, дворов малых улиц под слабопроницаемыми дорожными покрытиями (Прокофьева, 1998); они могут залегать на насыпных грунтах, почвах или их остатках.

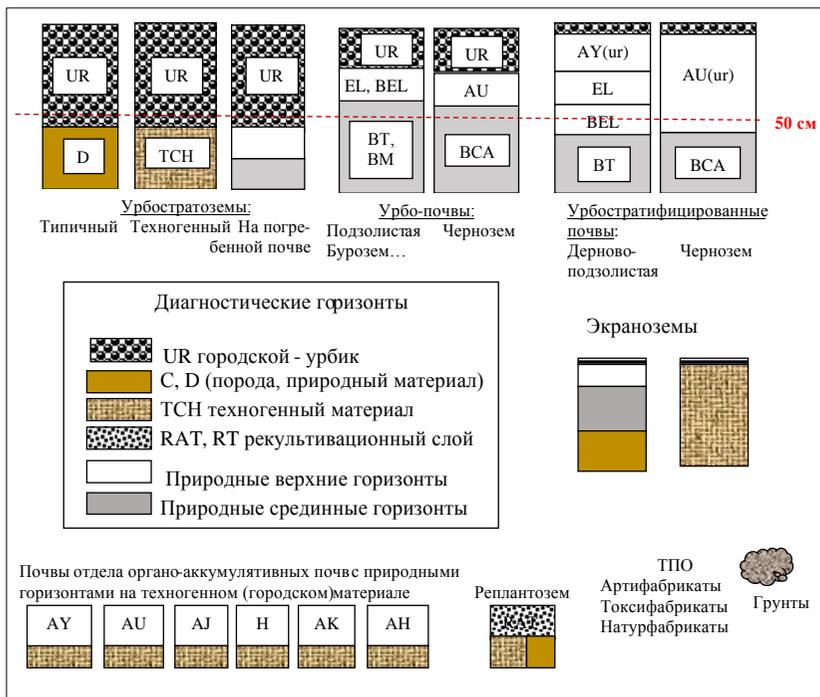


Рис. 1. Схемы строения профилей городских почв.
Fig. 1. Schemes of soil profiles in urban environment.

Кроме почв, в состав поверхностного покрова городских территорий входят ТПО – техногенные поверхностные образования, или не-почвы, но являющиеся, как и почвы, объектами картографирования (Тонконогов, 2001). К ним относятся: перемещенные природные грунты, например, для создания газонов, выровненные

вания поверхности и других целей, остатки породы после удаления (срезания) ее верхней части, искусственные грунты разного происхождения и состава. Различные примеры вариантов техногенных грунтов приведены в статье о техногенных отложениях г. Томска (Осинцева, Евсеева, 2012). Для карты Перми И.Е. Шестаковым с соавторами предложено разделение ТПО на группы по В.Д. Тонконогову (Шестаков и др., 2014).

Данное исследование проводилось на примере 10 городов России с численностью населения 250–500 тыс., расположенных в разных природных зонах – от северной тайги до степи (табл. 1). В выбранных городах отмечается высокая доля застроенных и запечатанных территорий, определенная по спутниковым данным (Zanaga et al., 2022).

Города изучались в рамках административных границ городских округов, взятых из программы *Яндекс карты* (свободная кроссплатформенная геоинформационная система). (<https://yandex.ru/maps/geo/>). В городские округа, помимо собственно городской застройки, входят также сельские поселения и участки с относительно слабо нарушенными природными ландшафтами: лесами, лесопосадками, садами, огородами, полями и залежами.

Методы исследования. Картографирование почвенного покрова городов проводилось дистанционным методом детального визуального дешифрирования космических снимков в программе *Планета Земля (Google Earth)* без привлечения полевых материалов с использованием в некоторых точках аэрофотоизображений земной поверхности с целью выделения ареалов/зон, характеризующихся разным функциональным использованием территории и, соответственно, разных по характеру и интенсивности антропогенной нагрузки на почвы. Идентификация каждой из выделенных зон, ее границы и особенности, корректировались исходя из имеющейся в этой программе информации: рельеф местности, полные круговые панорамы, фотографии улиц городов, любительские фотографии, встроенные в программу, а также разновременные снимки по годам и сезонам.

Таблица 1. Города – объекты исследования

Table 1. Cities – research objects

Город, население, тыс. чел.	Высота н. у. м.	Природные почвы по карте РСФСР, 1988	Рельеф, почвообразующие породы
<i>Почвы тайги и хвойно-широколиственных лесов</i>			
Архангельск, 345	7 м	Пойменные кислые	Пойма Северной Двины; пески, супеси, суглинки
Сургут, 387	30 м	Пойменные кислые, пойменные заболоченные, подзолы иллювиально-гумусовые, таежные глеевые дифференцированные, в т. ч. оподзоленные	Пойма и террасы Оби; пески, суглинки, насыпные пески
Смоленск, 320	248 м	Дерново-мелко - и неглубокоподзолистые, дерново-подзолисто-глеевые	Моренная возвышенность; покровные суглинки
Калининград, 493	15 м	Дерново-подзолистые (без разделения), буроземы, буроземы оподзоленные, пойменные кислые	Ледниково-морская равнина; двучленные отложения, озерные суглинки и супеси
Комсомольск -на-Амуре, 241	47 м	Глееземы таежные гумусово-перегнойные, пойменные луговые, пойменные заболоченные	Террасы Амура; глины на гравийно-галечниковых отложениях

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Город, население, тыс. чел.	Высота н. у. м.	Природные почвы по карте РСФСР, 1988	Рельеф, почвообразующие породы
<i>Почвы широколиственных лесов и лесостепи</i>			
Орел, 304	154 м	Темно-серые лесные и серые лесные	Средне-Русская возвышенность; покровные суглинки
Саранск, 317	171 м	Черноземы выщелоченные, серые и темно-серые лесные, пойменные слабокислые и нейтральные	Периферия Приволжской возв., суглинки, выходы плотных пород
Владикавказ, 302	670 м	Буроземы глееватые и глеевые, буроземы слабо ненасыщенные, черноземы выщелоченные мицелярно-карбонатные глубокие, лугово-черноземные	Подгорная равнина, предгорья; глины, элювий и делювий осадочных пород.
Ставрополь, 455	600 м	Темно-серые лесные, черноземы южные и обыкновенные мицелярно-карбонатные глубокие	Ставропольская возвышенность; суглинки и выходы плотных пород
<i>Почвы степей</i>			
Якутск, 331	116 м	Черноземы обыкновенные, лугово-черноземные, пойменные кислые	Террасы и пойма Лены; суглинки, супеси, пески

Особое значение при выделении этих зон придавалось соотношению открытой и закрытой поверхностей. Под закрытой поверхностью почвы в большинстве случаев уничтожены при возведении зданий, строительстве дорог, площадей, и прокладке городских коммуникаций (Savin et al., 2024). Открытые поверхности (без застройки или с отдельными зданиями) оценивались с точки зрения типа и давности застройки, густоты и характера растительности, нарушений поверхности, облика ландшафта в разные сезоны, т. е. проводился поиск тех особенностей территории, которые определяют возможности формирования разных вариантов городских почв и сохранения природных. Эти сведения, в сочетании с информацией о природных условиях и изложенными выше представлениями (рис. 1), были основанием для диагностики городских, полу-природных почв и ТПО.

Категория городских земель с открытой поверхностью в контексте статьи близка понятию зеленой инфраструктуры города (Климанова и др., 2020). Поэтому, исходя из задачи идентификации почв и ТПО, зоны различного функционального использования выделялись достаточно детально, особенно для селитебных территорий, и им были даны условные названия. Затем на карты выделенных зон были наложены полигоны Почвенной карты РФ для определения состава природных почв в каждой из них. Территории практически всех городов оказались в пределах нескольких полигонов Почвенной карты, за исключением Архангельска, территория которого полностью вошла в границы ареала аллювиальных почв поймы Северной Двины. В программе Quantum GIS 3 были подсчитаны площади (км²) и доли (%) каждой из выделенных зон от площади города с использованием равноплощадной проекции Ламберта (Lambert Azimuthal Equal Area). Кроме того, были определены также доли в них открытой поверхности и доли почв от площади города (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика зон разного функционального использования городов – объектов исследования
Table 2. Characteristics of zones of functional use in cities – study objects

Город	Промзона	Центр	Многоэтажки	Черемушки	Коттеджи	Сады, огороды	Луга, залежи	Леса, лесопарки	Болота	Аэропорты, полигоны	Пашня	<u>Всего полев</u>
Архангельск	$\frac{9}{20^{**}}$ $\frac{2}{2^{***}}$	$\frac{0.1}{10}$ 0.01	$\frac{0.5}{10}$ 0.05	$\frac{14}{60}$ 9	$\frac{2}{40}$ 1	$\frac{9}{75}$ 7	$\frac{9}{100}$ 9	$\frac{18}{100}$ 18	$\frac{12}{100}$ 12	0	$\frac{1}{100}$ 1	58****
Сургут	$\frac{16}{5}$ 1	$\frac{0.5}{10}$ 0.05	$\frac{0.7}{10}$ 0.1	$\frac{8}{40}$ 3	$\frac{2}{70}$ 1	$\frac{10}{80}$ 8	$\frac{15}{100}$ 15	$\frac{28}{100}$ 28	$\frac{2}{100}$ 2	$\frac{4}{70}$ 3	0	61
Комсомольск-на-Амуре	$\frac{10}{20}$ 2	$\frac{0.03}{10}$ 0	0	$\frac{8}{50}$ 4	0	$\frac{10}{80}$ 8	$\frac{35}{100}$ 35	$\frac{21}{100}$ 21	$\frac{0}{100}$ 0	$\frac{4}{70}$ 3	0	74
Якутск	$\frac{14}{20}$ 3	$\frac{0.1}{5}$ 0	$\frac{1}{5}$ 0.05	$\frac{8}{40}$ 3	$\frac{39}{70}$ 27	$\frac{8}{80}$ 6	$\frac{28}{100}$ 28	$\frac{6}{100}$ 6	$\frac{0}{100}$ 0	$\frac{3}{70}$ 2	0	75
Смоленск	$\frac{7}{10}$ 1	$\frac{0.1}{5}$ 0.01	$\frac{0.2}{5}$ 0.01	$\frac{16}{50}$ 8	$\frac{6}{50}$ 3	$\frac{29}{80}$ 23	$\frac{7}{100}$ 7	$\frac{28}{100}$ 28	$\frac{0}{100}$ 0	$\frac{6}{80}$ 5	0	77
Калининград	$\frac{7}{10}$ 1	$\frac{0.1}{10}$ 0.01	$\frac{2}{20}$ 0.4	$\frac{16}{50}$ 8	$\frac{12}{50}$ 6	$\frac{20}{80}$ 16	$\frac{21}{100}$ 21	$\frac{9}{100}$ 9	$\frac{0}{100}$ 0	$\frac{3}{80}$ 2	0	63

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Город	Промзона	Центр	Многоэтажки	Черемухи	Коттеджи	Сады, огороды	Луга, залежи	Леса, лесопарки	Болота	Аэропорты, полигоны	Пашня	<u>Всего почв</u>
Орел	$\frac{8}{5}$ 0.4	$\frac{0.2}{10}$ 0.02	$\frac{1}{10}$ 0.1	$\frac{18}{50}$ 9	$\frac{13}{60}$ 7	$\frac{19}{90}$ 17	$\frac{22}{100}$ 22	$\frac{14}{100}$ 14	0	$\frac{3.5}{90}$ 3	0	72
Саранск	$\frac{24}{5}$ 1	$\frac{0.5}{10}$ 0.05	$\frac{1}{10}$ 0.1	$\frac{19}{50}$ 9	$\frac{7}{50}$ 4	$\frac{6}{65}$ 4	$\frac{4}{100}$ 8	$\frac{18}{100}$ 8	0	0	$\frac{19}{100}$ 19	53
Владикавказ	$\frac{11}{10}$ 1	$\frac{0.1}{10}$ 0.01	$\frac{3}{10}$ 0.3	$\frac{19}{40}$ 7	$\frac{31}{20}$ 6	$\frac{14}{35}$ 5	$\frac{4}{100}$ 4	$\frac{16}{100}$ 16	0	0	$\frac{4}{100}$ 4	43
Ставрополь	$\frac{9}{10}$ 1	$\frac{2}{10}$ 0.2	$\frac{1.5}{10}$ 0.01	$\frac{12}{50}$ 6	$\frac{29}{30}$ 9	$\frac{9}{90}$ 8	$\frac{25}{100}$ 25	$\frac{13}{100}$ 13	0	0	0	62

Примечание. *Доля площади зоны от площади города (числитель дроби), %. **Доля открытой поверхности в зоне от ее площади (знаменатель), %. ***Доля площади почв в зоне от площади города, %. ****Общая доля площади почв от площади города, %.

Note. *Share of the area of the zone from the area of the city (numerator of the fraction), %. **Share of the open surface in the zone (denominator), %. ***Share of the area of soils in the zone of the area of the city, %. **** The area of soils of the area of the city, %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного дистанционного визуального дешифрирования территорий десяти средних городов и изложенных выше представлений о городских почвах были выделены зоны (или ареалы) различного функционального использования территории городов, различающиеся составом почвенного покрова. Красочная легенда выделенных зон представлена в приложении (Приложение, табл. 1.1)

Интерпретация результатов дешифрирования для составления почвенных карт

Во всех городах выделяется очень небольшой по площади исторический и административный, торговый и культурный *центр* города со старинными домами, в т. ч. культурного наследия, и малым количеством зеленых массивов. Его площадь обычно не превышает 0.5%. Почвы открытой поверхности под газонами, скверами занимают не более 5% (табл. 2); остальное пространство занято строениями, торговыми центрами и асфальтовым покрытием парковок, площадей, транспортных магистралей. Почвы зеленой инфраструктуры по материалам исследований городов названы урбаноземами (Большой..., 2012; Строганова, 1997; Синцов и др., 2011), в более позднем варианте урбостратоземами (Прокофьева и др., 2014). Диагностический горизонт “урбик” образовался в процессе длительного существования города, накопления пыли, городских артефактов, в том числе строительного и бытового мусора, особенно в центре города. Мощность горизонта “урбик” превышает 50 см. Для центра характерно наличие культурного слоя в старых городах (Апарин, Сухачева, 2014).

В *промзонах* доля открытой поверхности составляет в среднем от 5% до 15%. Это – зеленые насаждения вдоль дорог, газоны у административных зданий, заросшие пустыри. Основная территория – уничтоженные почвы под зданиями заводов и фабрик, асфальтовыми или бетонными покрытиями. На привезенных или сохранившихся после строительства грунтах формируются урбостратоземы и почвы отдела слаборазвитых или органомаккумулятивных. В портовых городах выделена “припортовая

промзона” со слабо развитыми слоистыми аллювиальными почвами и участками песков. Почвы, как правило, загрязнены тяжелыми металлами, углеводородами и разными продуктами производства. Большие площади занимают ТПО.

Зона жилой застройки разделена на две категории: с плотной современной застройкой, очень высокими домами при малой доле скверов, газонов и клумб: категория “*Многоэтажки*”. Другой вариант застройки 5–7-этажными домами 1960–70-х годов с относительно большими зелеными дворами получил условное название “*Черемушки*”.

Судя по космическим снимкам, современная многоэтажная застройка ведется либо точно в старой части города, либо образует небольшие по площади участки на окраинах. В последнем случае строительство идет на почти естественных почвах, на месте сельских поселений, или на заброшенных промзонах и пустырях. При строительстве используется тяжелая техника, перемещаются большие массы грунта (срезание, подсыпка), поступает строительный мусор и остатки разных сооружений, бывших на этих местах, т. е. происходят сильные нарушения почвенного покрова. На небольших открытых участках между домами на перемещенных и насыпных техногенных грунтах со временем формируются органо-аккумулятивные почвы: серогумусовые или темногумусовые, соответственно, в таежной и (лесо)степной зонах. Вместе с тем, современные требования к комфортности жизни вызывают необходимость рекультивации открытых поверхностей для создания зеленой инфраструктуры. На разуплотненный грунт насыпается рекультивационный субстрат, представляющий собой торфо-компостную смесь (слой RAT) или гумусированный материал верхних почвенных горизонтов. Почвенный профиль в таких случаях включает маломощный искусственный гумусированный слой, нанесенный на перемещенный или инситный грунт, в т. ч. на ТПО, и почвы называются реплантоземами (рис. 1). Термин был предложен И.А. Крупенниковым и Б.П. Подымовым для сильно смытых почв виноградников Молдавии, на поверхность которых “возвращен” смытый гумусированный материал; термин был использован М.Н. Строгановой для аналогичной ситуации в городе (Строганова, 1997). Доля открытой поверхности, занятой ур-

бостратоземами, органо-аккумулятивными почвами, реплантоземами и ТПО, как правило, не превышает 10% (табл. 2).

В выделенной зоне “*Черемушки*” выше доля открытой поверхности и менее масштабны нарушения почв. Почвы с незначительными нарушениями верхнего горизонта, в т. ч. с добавками городских артефактов, распространены во дворах под сохранившимися участками природной растительности. Мощность горизонта UR в них может быть как больше, так и меньше 50 см. В последнем случае, при сохранении части горизонтов природной почвы, выделяются урбо-почвы, например, урбодерново-подзолистые, урбосерые, урбочерноземы. При большой мощности горизонта урбик выделяются урбостратоземы, например, на газонах на погрешенных природных или агрогенных почвах; в городах, расположенных в поймах крупных рек, на насыпных грунтах. Часть заасфальтированной поверхности в виде узких междомовых дорог, тропинок, участков вокруг малых торговых точек рассматривается как экраноземы, поскольку покрытия часто перекрывают непосредственно почву в отличие от автострад и больших территорий под асфальтом или бетоном на специальных мощных насыпных слоях, как в центре города. Перечисленные почвы занимают в среднем 50% площади “*Черемушек*”. Таким образом, урбопедокомбинации представлены здесь урбостратоземами, урбоприродными почвами, экраноземами и ТПО.

Зона малоэтажной застройки также делится по результатам дешифрирования на две категории: первая состоит из домов коттеджного типа с ограниченным зеленым окружением в виде клумб, газонов и посадок кустарников, фрагментов естественной растительности (“*Коттеджи*”). При строительстве не исключены как механические нарушения верхних горизонтов почв, так и перекрытие исходной почвы грунтом или остатками почвенных горизонтов, а также подсыпка грунта. Доля открытой поверхности составляет 40–60%, снижаясь в некоторых городах до 20–30%. Почвенный покров представлен комбинациями урбо-почв, урбистратифицированных природных почв, агрогенных почв, экраноземов и ТПО. Вторая категория – малоэтажная относительно редкая застройка с огородами и садами (“*Сады, огороды*”) с преобладающими агрогенными, в т. ч. проградированными почвами и

слабо измененными урбистратифицированными природными. Доля открытой поверхности колеблется здесь в широких пределах: от 65% в городе до 90% в дачных поселках.

Следующие две зоны – “*Луга, залежи*” и “*Лесопарки, леса, болота*” характеризуются малым вкладом в их почвы “городских” элементов; в первой – почвы формируются современным процессом гумусонакопления, соответственно, преобладают близкие к природным почвы, на залежах под травянистой растительностью – постагrogenные. В лесопарках с естественной растительностью преобладают природные почвы со слабыми “городскими” признаками, а в лесных массивах, расположенных у границы города, – природные почвы. Болота, в т. ч. в поймах, могут быть как природными, так и осушенными, соответственно, с торфяными почвами или торфоземами.

В некоторых городах в черте города выделены также очень малые территории аэропортов и различных технических полигонов с мозаичным почвенным покровом, состоящим из мало измененных природных, запечатанных почв и ТПО. В ряде городов имеются пашни с агроземами и агро-природными почвами.

Почвенные карты городов

Карты почвенного покрова городов в М 1 : 250 000 и легенды к ним составлены в формате КиДПР с дополнениями по городским почвам (Прокофьева и др., 2014) (Приложение рис. 1.1–1.10).

Для оценки характера почвенного покрова городов было определено процентное соотношение трех групп почв по типам землепользования в урбо-, агро- и природных ландшафтах, минимально подверженных антропогенному воздействию, а также уничтоженных почв (табл. 3). Это соотношение определяется в первую очередь социально-экономическими, историческими причинами и положением границ городов. Тем не менее, природные факторы также имеют значение в отношении состава почвенного покрова, представленного в таблице как итог проведенного согласования природных и антропогенных факторов в диагностике почв.

Таблица 3. Состав почвенного покрова по трем группам почв и почвенных комбинаций 10 средних городов России

Table 3. Soils in soil associations by three groups in 10 cities of Russia

Города. (Уничто- женные почвы)	Группы почв и почвенных комбинаций в городах, % от площади города		
	Городские	Агрогенные	Природные
Архангельск (14%)*	Урбостратоземы на погребенных почвах и насыпных грунтах, экраноземы, перегнойно-гумусовые на насыпных грунтах, ТПО (11%)	Агроземы гумусовые, преимущественно проградированные, торфоземы (6%)	Аллювиальные гумусовые глееватые и глеевые, в т. ч. постагрогенные, аллювиальные перегнойные оподзоленные глееватые, в т. ч. урбистратифицированные, торфяные эутрофные (41%)
Сургут (26%)	Урбостратоземы, экраноземы, урбогрубогумусовые глееватые, реплантоземы на насыпных грунтах, ТПО (8%)	Агроземы и агроземы альфегумусовые проградированные (8%)	Аллювиальные гумусовые глееватые и глеевые, подзолы в т. ч. урбистратифицированные, аллювиальные торфянисто- и торфяно-глеевые, светлоземы глееватые (45%)

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Города. (Уничто- женные почвы)	Группы почв и почвенных комбинаций в городах, % от площади города		
	Городские	Агрогенные	Природные
Комсо- мольск-на- Амуре (11%)	Урбостратоземы, урбосеро- гумусовые глееватые, экраноземы, ТПО (6%)	Агроземы глееватые и оксиг- леевые проградированные, аллювиальные агросерогуму- совые проградированные (8%)	Аллювиальные перегнойно- и торфяно-глеевые, глееземы перегнойные и грубогумусо- вые, выходы песчаных пород (62%)
Якутск (19%)	Урбостратоземы, урбо черно- земы, урбопалево- ржавоземы, экраноземы, темногумусовые на техно- генных грунтах, ТПО (6%)	Агроземы аккумулятивно- карбонатные (8%)	Аллювиальные темногумусо- вые, палево-ржавоземы опод- золенные урбистратифици- рованные, черноземы ур- бостратифицированные, поч- вы аласов (61%)
Смоленск (25%)	Урбостратоземы, в т. ч. на погребенных почвах, экрано- земы, урбодерново- подзолистые и урбодерново- подзолисто-глеевые, серогу- мусовые, ТПО (15%)	Агродерново-подзолистые проградированные, агродер- ново-подзолисто- оксиглеевые проградирован- ные (22%)	Дерново-подзолистые и дер- ново-подзолисто-глеевые преимущественно урбистра- тифицированные и постагро- генные (38%)

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Города. (Уничто- женные почвы)	Группы почв и поченных комбинаций в городах, % от площади города		
	Городские	Агрогенные	Природные
Калининград (25%)	Урбостратоземы, урбодерново-подзолистые и урбобуроземы, экраноземы, серогумусовые, реплантоземы, ТПО (17%)	Агродерново- подзолистые проградированные, агроземы метаморфические проградированные (16%)	Аллювиальные серогумусовые, аллювиальные серогумусовые глееватые и глеевые, дерново-подзолистые преимущественно урбистратифицированные (30%)
Орел (28%)	Урбостратоземы на погребенных почвах, экраноземы, урбосерые и урботемносерые, серогумусовые на техногенных грунтах, реплантоземы, ТПО (20%)	Агросерые и агротемносерые, агроаллювиальные темногумусовые (16%)	Серые, темносерые и аллювиальные темногумусовые, преимущественно постагрогенные и урбистратифицированные (36%)
Саранск (36%)	Урбостратоземы, урбочерноземы глинисто-иллювиальные, темногумусовые на техногенных грунтах, пелоземы, экраноземы, реплантоземы (14%)	Агротемногумусовые аллювиальные, агрочерноземы глинисто-иллювиальные, агросерые (25%)	Черноземы глинисто-иллювиальные и серые, в т. ч. урбистратифицированные (25%)

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Города. (Уничто- женные почвы)	Группы почв и почвенных комбинаций в городах, от площади города		
	Городские	Агрогенные	Природные
Владикавказ (62%)	Урбобуросемы глееватые, ур- бочерноземы глинисто- иллювиальные, урбистратозе- мы, темногумусовые, экрано- земы, ТПО (14%)	Агроземы структурно- метаморфические, (11%)	Аллювиальные слаборазви- тые слоистые, буросемы тем- ные, в том числе оподзолен- ные, включая постагроген- ные (13%)
Ставрополь (38%)	Урботемносерые и урбочер- ноземы, урбостратоземы, темногумусовые урбистра- тифицированные, экранозе- мы (16%)	Агротемносерые и агрочерноземы (8%)	Темносерые и черноземы преимущественно постагро- генные, темногумусовые, литоземы темногумусовые (38%)

Примечание. *В скобках даны доли трех групп почв и почвенных комбинаций, а также уничтоженных почв под зданиями, транспортными магистралями, площадями и другими городскими объектами. В городах, где сумма четырех показателей таблицы меньше 100%, недостающие %% приходятся на долю водной поверхности крупных рек, озер.

Note. *In brackets the shares of three groups of soils and soil combinations are given, as well as destroyed soils under buildings, transport routes, squares and other urban objects. In cities, where the sum of four indicators of the table is below 100%, the missing % comes to the share of water surface of large rivers, lakes.

Так, существенно меньше собственно городских почв оказалось в четырех северных городах, расположенных в долинах крупных рек (6–11%). В них также меньше всего агрогенных почв, приуроченных к приусадебным участкам малоэтажной городской застройки (6–8%), и максимальная доля природных почв (40–60%).

В группе агрогенных почв северных городов преобладают агроземы – почвы с исходно маломощными верхними горизонтами: агроземы глееватые и оксиглеевые, агроземы альфегумусовые; на приусадебных участках не исключаются проградированные агроземы. Городские почвы представлены преимущественно урбостратоземами на насыпных песчаных грунтах, особенно в долинах крупных рек, почвами отдела органо-аккумулятивных на техногенной породе, а также экраноземами. Среди природных почв преобладают аллювиальные перегнойно- и торфяно-глеевые и аллювиальные торфяные почвы лесов и болот, а также аллювиальные серогумусовые глееватые и глеевые. Количество уничтоженных почв минимально (14–23%).

Особое место среди северных городов по сочетанию природных почв занимает Якутск, расположенный в пределах криолитозоны, в пойме и на первой и второй надпойменных террасах Лены: черноземов глубокомерзлотных, в т. ч. глееватых с мерзлотными палево-ржавоземами (палево-бурыми, по Л.Г. Еловской, 1987) и аллювиальными темногумусовыми почвами (Щелчкова и др., 2022). Значительная часть открытых пространств в Якутске представлена аласами, особенно в пределах промзоны и малоэтажной городской застройки.

Почвы в городах Центральной России занимают более 70% общей площади города, что связано со значительным процентом малоэтажной городской застройки с высокой долей открытой поверхности. И только в Калининграде он снижается до 63%. Доля собственно городских почв (городской застройки) колеблется от 15 до 25%. Они отличаются высоким почвенным разнообразием, что объясняется, с одной стороны, разными видами воздействий на природные почвы и разной сохранностью их профилей, с другой стороны, среди городских почв больше сильно нарушенных почв и ТПО. Типичные городские почвы – урбостратоземы – при-

сутствуют во всех городах, в их центрах, где мало почв, и в “Черемушках”.

К городским также отнесены почвы на техногенных и природных породах, в которых за несколько лет формируются гумусовые или органические горизонты (темногумусовые в Саранске и Орле, серогумусовые в Калининграде, а также урбо-почвы: урбодерново-подзолистые, урбосерые, урбочерноземы глинисто-иллювиальные и другие в ареалах коттеджной застройки).

Группа агрогенных почв дачных участков и малоэтажной городской застройки представлена агро-почвами, преимущественно проградированными. В Саранске доля агро-почв от площади города – 19%. Саранск также отличается самой большой промзоной (24% от площади города), поэтому так велика в нем доля уничтоженных почв. Природные почвы можно считать лишь условно природными, в частности, те, которые названы урбостратифицированными в лесопарках (рис. 1).

Меньше всего почв, т. е. открытой поверхности, оказалось в горных городах: во Владикавказе всего 43%, что можно объяснить повышенной плотностью застройки в удобных для жизни местах, а также небольшой долей мелкоземистых почв, пригодных для земледелия на фоне щебнистых и слаборазвитых почв склонов. Высокая доля природных почв в Ставрополе обусловлена значительными площадями заброшенных пашен с эродированными постагрогенными черноземами. Среди городских почв в южных городах больше урбопочв, производных от черноземов и темносерых, приуроченных к коттеджной застройке, чем урбостратоземов.

По результатам подсчетов участия природных почв в составе почвенного покрова 10 городов можно построить следующий ряд убывания: Комсомольск-на-Амуре > Якутск > Сургут > Архангельск > Смоленск > Ставрополь > Орел > Калининград > Саранск > Владикавказ. Количество уничтоженных почв под зданиями, железными и шоссейными дорогами во всех городах различается незначительно. Исключения составляют Комсомольск-на-Амуре и Архангельск с малой долей уничтоженных почв (11 и 14%) в противоположность Саранску, Ставрополю и Владикавказу: 37, 38 и 60% соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составлены прогнозные почвенные карты 10 городов России с населением 200–500 тыс. чел., расположенных в разных природных зонах в условиях равнинного, низкогорного и флювиального рельефа (Приложение).

Составление карт было основано на трех подходах: (1) дистанционное детальное визуальное дешифрирование территории городов, ориентированное на оценку условий почвообразования, антропогенных и природных; (2) наложение ареалов городов на Почвенную карту РФ масштаба 1 : 2.5 млн. для установления исходных природных почв на территории города; (3) идентификация почв городов – объектов исследования в современных представлениях о городских почвах и принципах классификации почв России.

На основании анализа литературных материалов и общих представлений о городских почвах, сложившихся в последние десятилетия, предложена общая схема приуроченности городских почв к ареалам различных типов землепользования.

Характерными почвами города являются урбостратоземы, как правило, приуроченные преимущественно к центру города и частично к среднеэтажной застройке типа “*Черемушки*”. В менее “жестких” городских условиях преобладают урбо-почвы, характерные преимущественно для малоэтажной коттеджной застройки; при незначительных “урбо-нарушениях” верхних 5–10 см почвы относятся к урбистратифицированным; они распространены в лесопарках, на приусадебных участках с относительно редкой застройкой и естественной растительностью. На нарушенных или переотложенных грунтах (техногенных) формируются органо-аккумулятивные почвы.

В группе городских почв влияние природных факторов на почвенный покров проявляется в зональной дифференциации свойств урбостратоземов, урбо-почв и органо-аккумулятивных почв. Отмеченное преобладание в составе почвенного покрова городской застройки урбостратоземов в городах таежной зоны и лесостепи, а в южных – урбо-почв, что связано как с социально-экономическими и историческими, так и природными факторами.

В группе агрогенных почв в городах природные факторы проявляются в преимущественном формировании агроземов и их проградированных вариантов из исходно маломощных профилей таежных и горных почв, а агро-почв из черноземов, серых и дерново-подзолистых почв на суглинистых породах.

В группе природных почв преобладающими в пяти городах являются аллювиальные почвы, в которых влияние зонального фактора проявляется в разнообразии органических и гумусовых горизонтов и степени оглеения профиля. В остальных городах распространены зональные почвы, в т. ч. постагрогенные и урбистратифицированные.

Анализ составленных карт показал, что на территории большинства средних городов почвы и ТПО открытых поверхностей (зеленой инфраструктуры) занимают в среднем 60–75% территории города. Их меньшая доля объясняется высокой плотностью застройки (Владикавказ), сокращением площадей природных почв (Саранск) или очень большими ареалами водных объектов (Архангельск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Опыт обновления почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420. DOI: [10.7868/S0032180X17120024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024).
2. *Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Методологические основы классификации почв мегаполисов на примере г. Санкт-Петербурга // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 3. 2013. Вып. 2. С. 115–122.
3. *Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Принципы создания почвенной карты мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 790–802.
4. *Большой атлас Москвы.* М.: Феория, 2012. 1000 с.
5. *Герасимова М.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е., Савицкая Н.В.* Агрогенные почвы на обновленной версии почвенной карты России масштаба 1 : 2.5 млн: классификационное разнообразие и положение в почвенном покрове // Почвоведение. 2023. № 2. С. 143–153.
6. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация). Смоленск: Ойкумена. 2003. 263 с.

7. *Горбов С.Н.* Генезис, классификация, экологическая роль городских почв Юга Европейской части России: на примере Ростовской агломерации: Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2018. 48 с.
8. *Гордиенко О.А., Манаенков И.В.* Картографирование почвенного покрова города Котова Волгоградской области // Сборник материалов VI Международной научно-практической конф. “Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития”. Ишим, 2018. С. 80–83.
9. *Гордиенко О.А., Манаенков И.В., Холоденко А.В., Иванцова Е.А.* Картографирование и оценка степени запечатанности почв города Волгограда // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1383–1392. DOI: [10.1134/S0032180X191110054](https://doi.org/10.1134/S0032180X191110054).
10. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 171 с.
11. *Жоголев А.В., Савин И.Ю.* Автоматизированное обновление среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1319–1327.
12. *Калманова В.Б., Матюшкина Л.А.* Систематика, диагностика и картографирование городских почв юга Дальнего Востока (на примере г. Биробиджан, Еврейская автономная область) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013. № 5(171). С. 97–104.
13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
14. *Климанова О.А., Колбовский Е.А., Илларионова О.А.* Зеленая инфраструктура города. М.: КМК, 2020. 324 с.
15. *Кулик К.Н., Кретинин В.М., Кошелева О.Ю.* Опыт картографирования почвенного покрова города Волгограда // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2015. № 1. С. 40–45.
16. *Осинцева Н.В., Евсеева Н.С.* Типы техногенных отложений на территории г. Томска и их геоэкологические аспекты // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 8. С. 176–181.
17. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн / под ред. *В.М. Фридланда*. М.: ГУГК при СМ СССР, 1988. 16 листов.
18. *Прокофьева Т.В.* Городские почвы, запечатанные дорожными покрытиями: на примере Москвы. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 1998. 24 с.
19. *Прокофьева Т.В., Герасимова М.И.* Городские почвы: диагностика и классификационное определение по материалам научной экскурсии конференции SUITMA-9 по Москве // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1057–1070.

20. *Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е.* Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.
21. *Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А.* Систематика почв и почвообразующих пород города Москвы и возможность включения их в общую классификацию. Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
22. *Савин И.Ю.* Картографирование экраноземов Московской агломерации по спутниковым данным Landsat // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 55–61.
23. *Савин И.Ю., Герасимова М.И., Лебедева И.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е., Белоусова Н.И., Королюк Т.В., Шубина И.Г., Хохлов С.Ф., Шишконокова Е.А., Савицкая Н.В.* О создании новой версии цифровой почвенной карты России масштаба 1 : 2.5 млн // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов. Сборник докладов Второй Всероссийской открытой конференции с международным участием. 2017. С. 23–26.
24. *Серeda Л.О., Куролат С.А.* Почвенный покров территории города Воронежа. Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества // Материалы Международной научно-практической конференции. Челябинск, 2019. С. 352–357.
25. *Синцов А.В., Бармин А.Н., Адямова Г.У.* Почвенный покров урбанизированных территорий. Астрахань: АЦТ, 2010. 163 с.
26. *Строганова М.Н.* Городские почвы: генезис, систематика и экологическое значение (на примере г. Москвы): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 1998. 71 с.
27. *Строганова М.Н., Мяжкова А.Д., Прокофьева Т.В.* Городские почвы: генезис, классификация, функции // Почва, город, экология / ред. Добровольский Г.В. и др. М.: Издательство: Фонд “За экономическую грамотность”, 1997. С. 15–88.
28. *Тонконогов В.Д.* Техногенные поверхностные образования // Почвоведение. 2001. № 6. С. 653–659.
29. *Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: изд. АН СССР, 1972. 423 с.
30. *Шестаков И.Е., Еремченко О.З., Филькин Т.Г.* Картографирование почвенного покрова городских территорий на примере г. Пермь // Почвоведение. 2014. № 1. С. 12–21.
31. *Шестаков И.Е., Еремченко О.З., Филькин Т.Г.* Подходы к составлению картосхем почвенного покрова городских территорий на

примере г. Пермь // Почвоведение. 2014а. № 1. С. 1–10.

32. Щелчкова М.В., Обутова Д.В., Николаев А.Н., Соломонов Н.Г. Современное состояние почв зеленых зон города Якутска // Экология урбанизированных территорий. 2022. С. 30–37. DOI: [10.24412/1816-1863-2022-3-30-37](https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-3-30-37).

33. Savin I.Y., Orlova K.S., Avetyan S.A. An Anthropogenic Soil Disturbance Map of Russia // Dokl. Earth Sc. 2024. Vol. 515. P. 449–452. DOI: [10.1134/S10283334X23603097](https://doi.org/10.1134/S10283334X23603097).

34. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D., De Keersmaecker W., Brockmann C., Kirches G., Wevers J., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Lesiv M., Herold M., Tsendbazar N.E., Xu P., Ramoino F., Arino O. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. 2022. DOI: [10.5281/zenodo.7254221](https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221).

REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya pochvennoi karty RSFSR mashtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience of updating the soil map of the RSFSR at a scale of 1 : 2.5 million in the soil classification system of Russia), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420, DOI: [10.7868/S0032180X17120024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024).
2. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Metodologicheskie osnovy klassifikatsii pochv megapolisov na primere g. Sankt-Peterburga (Methodological bases of classification of soils of megacities on the example of St. Petersburg), *Vestnik S.-Peterb. un-ta, Ser. 3*, 2013, Iss. 2, pp. 115–122.
3. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Printsipy sozdaniya pochvennoi karty megapolisa (na primere Sankt-Peterburga) (Principles of creating a soil map of a megacity (by the example of St. Petersburg)), *Pochvovedenie*, 2014, No. 7, pp. 790–802.
4. *Bol'shoi atlas Moskvy* (Big atlas of Moscow), Moscow: Feoriya, 2012, 1000 p.
5. Gerasimova M.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Savitskaya N.V., Agrogennye pochvy na obnovlennoi versii pochvennoi karty Rossii mashtaba 1 : 2.5 mln: klassifikatsionnoe raznoobrazie i polozhenie v pochvennom pokrove (Agrogenic soils on the updated version of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2.5 million: classification diversity and position in the soil cover), *Pochvovedenie*, 2023, No. 2, pp. 143–153.
6. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokof'eva T.V., *Antropogennnye pochvy (genesis, geografiya, rekul'tivatsiya)* (Anthropogenic soils (genesis, geography, reclamation)), Smolensk: Oikumena, 2003, 263 p.
7. Gorbov S.N., *Genesis, klassifikatsiya, ekologicheskaya rol' gorodskikh pochv Yuga Evropeiskoi chasti Rossii: na primere Rostovskoi aglomeratsii*:

Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk (Genesis, classification, ecological role of urban soils of the South of the European part of Russia: by the example of Rostov agglomeration, Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2018, 48 p.

8. Gordienko O.A., Manaenkov I.V., Kartografirovaniye pochvennogo pokrova goroda Kotovo Volgogradskoi oblasti (Mapping of soil cover of the city of Kotovo, Volgograd region), *Proc. VI Int. Sci.-Pract. Conf. "Urboekosistemy: problemy i perspektivy razvitiya"* ("Urban ecosystems: problems and prospects of development"), Ishim, 2018, pp. 80–83.

9. Gordienko O.A., Manaenkov I.V., Kholodenko A.V., Ivantsova E.A., Kartografirovaniye i otsenka stepeni zapechatannosti pochv goroda Volgograda (Mapping and assessment of the degree of soil sealing of the city of Volgograd), *Pochvovedenie*, 2019, No. 11, pp. 1383–1392, DOI: [10.1134/S0032180X19110054](https://doi.org/10.1134/S0032180X19110054).

10. Elovskaia L.G., *Klassifikatsiya i diagnostika merzlotnykh pochv Yakutii* (Classification and diagnostics of permafrost soils of Yakutia), Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1987, 171 p.

11. Zhogolev A.V., Savin I.Yu., Avtomatizirovannoe obnovenie srednemasshtabnykh pochvennykh kart (Automated update of medium-scale soil maps), *Pochvovedenie*, 2016, No. 11, pp. 1319–1327.

12. Kalmanova V.B., Matyushkina L.A., Cistematika, diagnostika i kartografirovaniye gorodskikh pochv yuga Dal'nego Vostoka (na primere g. Birobidzhan, Evreiskaya avtonomnaya oblast') (Systematics, diagnostics and mapping of urban soils in the south of the Far East (by the example of Birobidzhan, Jewish Autonomous Region)), *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, No. 5(171), pp. 97–104.

13. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.

14. Klimanova O.A., Kolbovskii E.A., Illarionova O.A., *Zelenaya infrastruktura goroda* (Green infrastructure of the city), Moscow: KMK, 2020, 324 p.

15. Kulik K.N., Kretinin V.M., Kosheleva O.Yu., Opyt kartografirovaniya pochvennogo pokrova goroda Volgograda (Experience of mapping the soil cover of the city of Volgograd), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2015, No. 1, pp. 40–45.

16. Osintseva N.V., Evseeva N.S., Tipy tekhnogennykh otlozhenii na territorii g. Tomsk i ikh geoekologicheskie aspekty (Types of technogenic deposits on the territory of Tomsk and their geoecological aspects), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, No. 8, pp. 176–181.

17. Fridland V.M. (Ed.), *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln* (Soil map of the RSFSR at a scale of 1 : 2.5 million), Moscow: GUGK pri SM

SSSR, 1988, 16 sheets.

18. Prokof'eva T.V., *Gorodskie pochvy, zapechatannye dorozhnymi pokrytiyami: na primere Moskvy: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Urban soils sealed by road pavements: the example of Moscow, Extended abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow, 1998, 24 p.

19. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., *Gorodskie pochvy: diagnostika i klassifikatsionnoe opredelenie po materialam nauchnoi ekskursii konferentsii SUITMA-9 po Moskve* (Urban soils: diagnostics and classification definition on the materials of the scientific excursion of the conference SUITMA-9 in Moscow), *Pochvovedenie*, 2018, No. 9, pp. 1057–1070.

20. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E., *Vvedenie pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskikh territorii v klassifikatsiyu pochv Rossii* (Introduction of soils and soil-like formations of urban areas in the classification of soils in Russia), *Pochvovedenie*, 2014, No. 10, pp. 1155–1164.

21. Prokof'eva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A., *Sistematika pochv i pochvoobrazuyushchikh porod goroda Moskvy i vozmozhnost' vklucheniya ikh v obshchuyu klassifikatsiyu* (Systematics of soils and soil-forming rocks of Moscow city and the possibility of their inclusion in the general classification), *Pochvovedenie*, 2011, No. 5, pp. 611–623.

22. Savin I.Yu., *Kartografirovaniye ekranozemov Moskovskoi aglomeratsii po sputnikovym dannym Landsat* (Mapping of the Moscow agglomeration shielded soils using Landsat satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 55–61.

23. Savin I.Yu., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Belousova N.I., Korolyuk T.V., Shubina I.G., Khokhlov S.F., Shishkonakova E.A., Savitskaya N.V., *O sozdanii novoi versii tsifrovoi pochvennoi karty Rossii masshtaba 1 : 2.5 mln* (On the creation of a new version of the digital soil map of Russia at a scale of 1 : 2.5 million), *Sovremennyye problemy izucheniya pochvennykh i zemel'nykh resursov*, 2017, pp. 23–26.

24. Sereda L.O., Kurolap S.A., *Pochvennyi pokrov territorii goroda Voronezha* (Soil cover of the territory of the city of Voronezh), In: *Geograficheskoe prostranstvo: sbalansirovannoe razvitiye prirody i obshchestva* (Geographical space: balanced development of nature and society), Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Chelyabinsk, 2019, pp. 352–357.

25. Sintsov A.V., Barmin A.N., Adyamova G.U., *Pochvennyi pokrov urbanizirovannykh territorii* (Soil cover of urbanised territories), Astrakhan': ATsT, 2010, 163 p.

26. Stroganova M.N., *Gorodskie pochvy: genezis, sistematika i ekologicheskoe znachenie (na primere g. Moskvy): Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Urban soils: genesis, systematics and ecological significance (by the example of Moscow), Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow: MGU, 1998, 71 p.
27. Stroganova M.N., Myagkova A.D., Prokof'eva T.V., *Gorodskie pochvy: genezis, klassifikatsiya, funktsii* (Urban soils: genesis, classification, functions), In: *Pochva, gorod, ekologiya* (Soil, city, ecology), Dobrovolskii G.V. (Ed.), Moscow: Izdatel'stvo: Fond "Za ekonomicheskuyu gramotnost'", 1997, pp. 15–88.
28. Tonkonogov V.D., *Tekhnogennyye poverkhnostnyye obrazovaniya* (Technogenic surface formations), *Pochvovedenie*, 2001, No. 6, pp. 653–659.
29. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (Structure of the soil cover), Moscow: izd. AN SSSR, 1972, 423 p.
30. Shestakov I.E., Eremchenko O.Z., Fil'kin T.G., *Kartografirovaniye pochvennogo pokrova gorodskikh territorii na primere g. Perm'* (Mapping of soil cover of urban areas on the example of Perm), *Pochvovedenie*, 2014, No. 1, pp. 12–21.
31. Shestakov I.E., Eremchenko O.Z., Fil'kin T.G., *Podkhody k sostavleniyu kartoskhem pochvennogo pokrova gorodskikh territorii na primere g. Perm'* (Approaches to the mapping of soil cover of urban areas on the example of Perm), *Pochvovedenie*, 2014a, No. 1, pp. 1–10.
32. Shchelchkova M.V., Obutova D.V., Nikolaev A.N., Solomonov N.G., *Sovremennoe sostoyaniye pochv zelenykh zon goroda Yakutsk* (Current state of soils of green areas of the city of Yakutsk), *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2022, pp. 30–37, DOI: [10.24412/1816-1863-2022-3-30-37](https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-3-30-37).
33. Savin I.Y., Orlova K.S., Avetyan S.A., *An Anthropogenic Soil Disturbance Map of Russia*, *Dokl. Earth Sc.*, 2024, Vol 515, pp. 449–452, DOI: [10.1134/S1028334X23603097](https://doi.org/10.1134/S1028334X23603097).
34. Zana D., Van De Kerchove R., Daems D., De Keersmaecker W., Brockmann C., Kirches G., Wevers J., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Lesiv M., Herold M., Tsensbazar N.E., Xu P., Ramoino F., Arino O., *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*, 2022, DOI: [10.5281/zenodo.7254221](https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221).

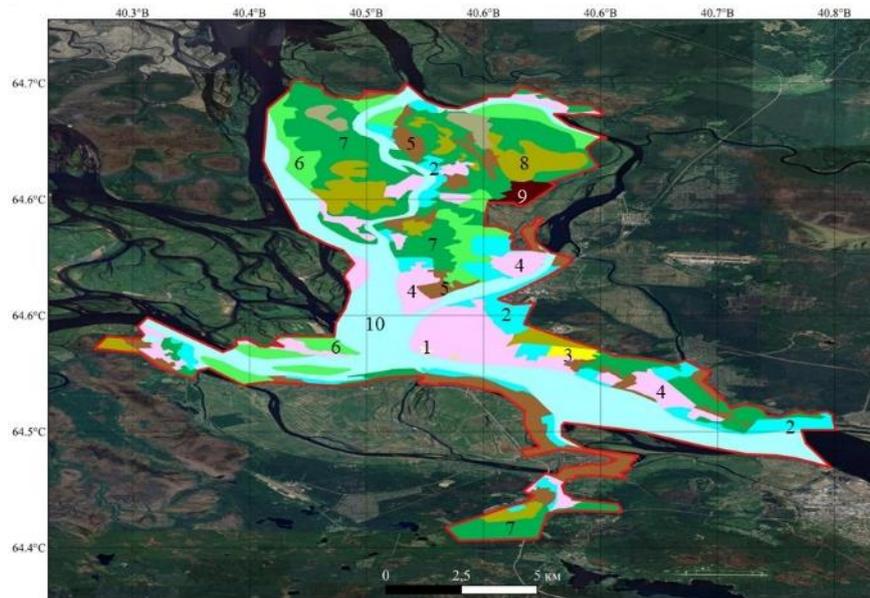
ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.1 Функциональные зоны городов. Легенда

Table 1.1. Functional zones of cities. Legend

	Функциональные зоны городов
	Центр города – исторический и деловой
	Промзона
	Многоэтажные дома "Многоэтажки"
	Среднеэтажная застройка типа "Черемушки"
	Малоэтажная застройка с зеленой инфраструктурой «Коттеджи»
	Малоэтажная застройка с садами и огородами
	Луга, залежи,
	Леса, лесопарки
	Болота
	Пашня
	Аэропорты, технополигоны
	Вода

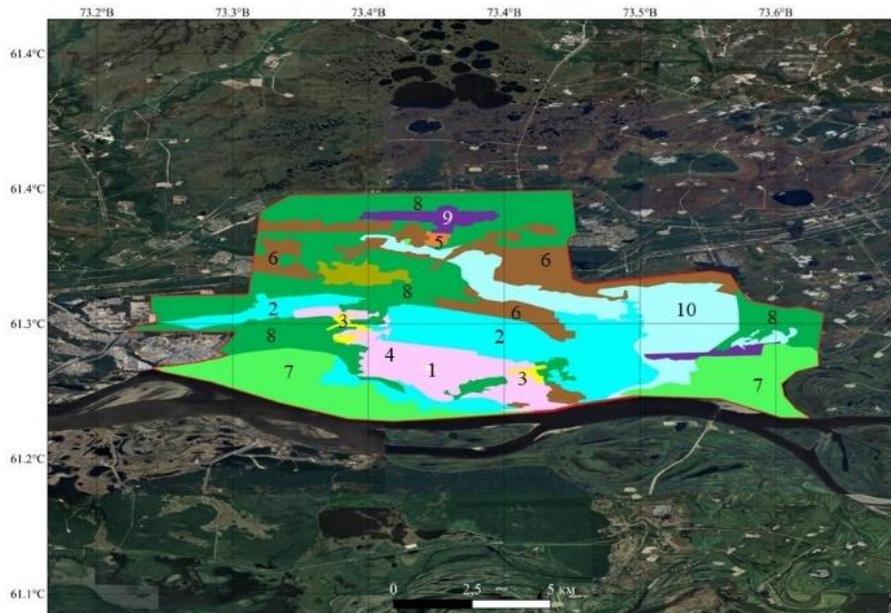
Рис. 1.1. Архангельск Fig. 1.1. Arkhangelsk



Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах/культурном слое
2. ТПО, псаммоземы на техногенных грунтах, пески, урбостратоземы
3. Экраноземы, перегнойно-гумусовые на техногенных грунтах, реплантоземы
4. Урбостратоземы на насыпных грунтах, погребенных природных и агрогенных почвах, экраноземы
5. Агрозоемы проградированные, аллювиальные глееватые урбостратифицированные, экраноземы
6. Аллювиальные гумусовые глееватые в.т.ч. постагрогенные
7. Аллювиальные гумусовые и перегнойные оподзоленные глееватые, в.т.ч. урбостратифицированные
8. Торфяные зутрофные, торфоземы
9. Агрозоемы глееватые и оксиглеевые.
10. Вода

Рис. 1.2. Сыртым Fig. 1.2. Surgut

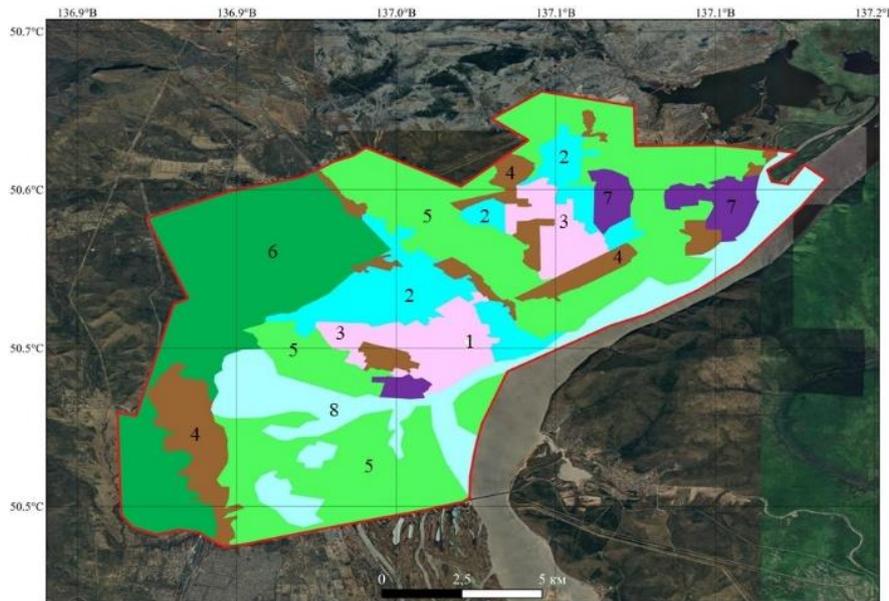


Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах, насыпных грунтах
2. ТПО, экраноземы, урбостратоземы на насыпных грунтах
3. Экраноземы, реплантоземы, грубогумусовые на насыпных грунтах
4. Урбостратоземы на насыпных грунтах, урбогрубогумусовые глееватые, экраноземы
5. Грубогумусовые урбостратифицированные псаммоземы, экраноземы
6. Агроземы и агроземы альфегумусовые проградированные, аллювиальные гумусовые урбостратифицированные
7. Аллювиальные гумусовые глееватые и глеевые, в т.ч. постагрогенные, подзолы постагрогенные

8. Аллювиальные торфянисто - и торфяно - глеевые, светлосемы глееватые
9. Торфяные мезотрофные
10. Грубогумусовые урбостратифицированные на насыпных грунтах, пески

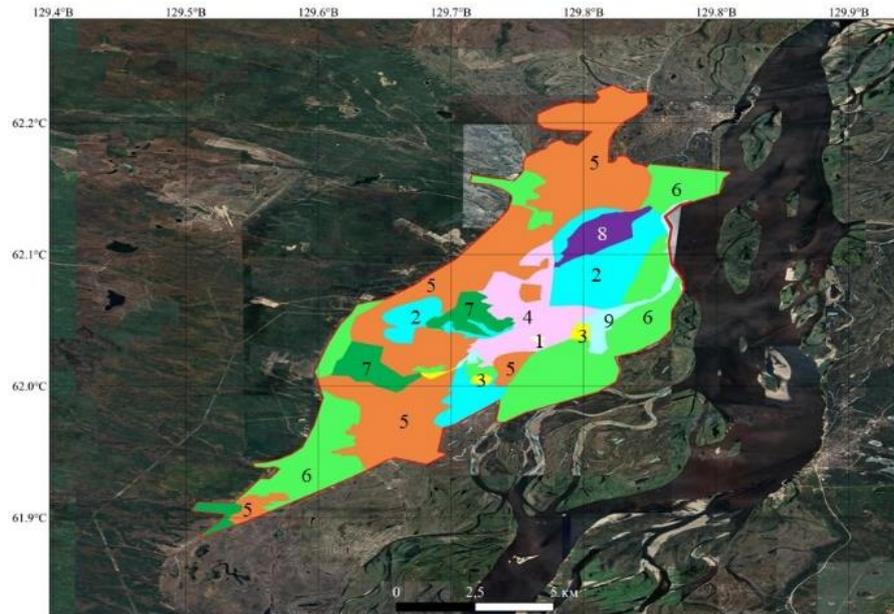
Рис. 1.3. *Комсомольск-на-Амуре* **Fig. 1.3.** *Komsomolsk-on-Amur*



Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах
2. ТПО, пелоземы на техногенных грунтах, урбостратоземы техногенные
3. Урбостратоземы, экраноземы, урбодерновые глееватые
4. Агроземы глееватые проградированные, аллювиальные агрогумусовые, глееземы перегнойные урбостратифицированные
5. Аллювиальные гумусовые глееватые и глеевые, аллювиальные перегнойно - и торфяно-глеевые
6. Глееземы перегнойные и грубогумусовые, аллювиальные слабо развитые слоистые, глееземы перегнойные и грубогумусовые в.т.ч. урбостратифицированные
7. Серогумусовые глееватые и глеевые, выходы рыхлых пород, пелоземы, псаммоземы
8. Вода

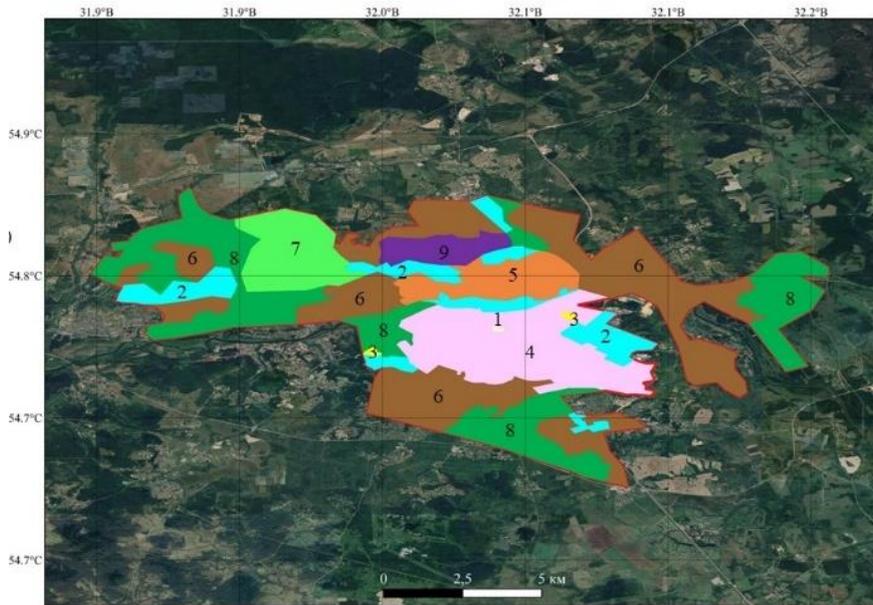
Рис. 1.4. Якутск Fig. 1.4. Yakutsk



Легенда

1. Урбостратоземы мерзлотные на погребенных почвах
2. ТПО, урбостратоземы мерзлотные на погребенных почвах, насыпных грунтах, почвы аласов
3. Экраноземы, темногумусовые на техногенных грунтах, реплантоземы
4. Урбочерноземы мерзлотные, экраноземы, урбостратоземы
5. Черноземы квазиглееватые мерзлотные урбостратифицированные, агроземы аккумулятивно-карбонатные, экраноземы, почвы аласов
6. Аллювиальные темногумусовые, черноземы квазиглееватые, почвы аласов
7. Палео-ржавоземы, в т.ч. урбостратифицированные
8. Темногумусовые урбостратифицированные, экраноземы
9. Вода

Рис. 1.5. Смоленск Fig. 1.5. Smolensk

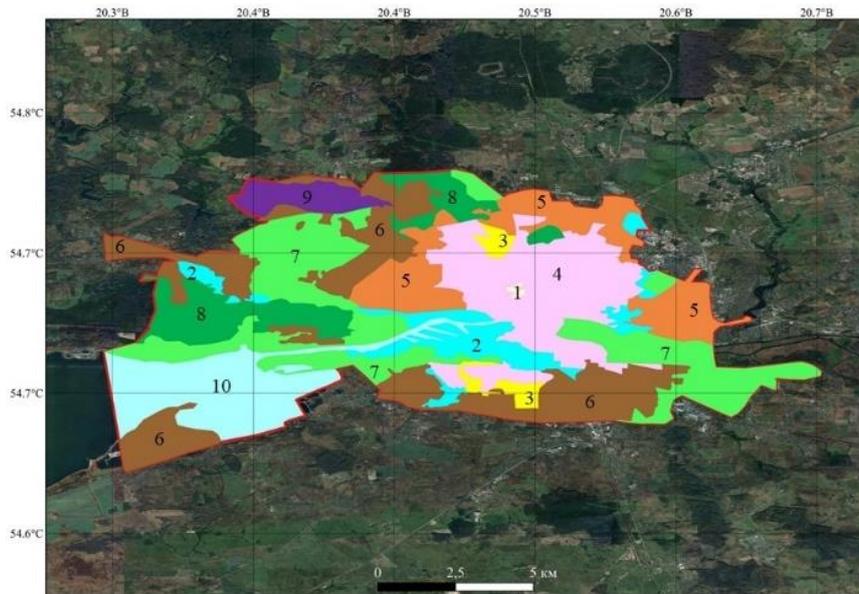


Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах /культ.слое
2. ТПО, урбостратоземы на техногенных грунтах
3. Экраноземы, серогумусовые на техногенных грунтах
4. Урбостратоземы, урбосерые, экраноземы
5. Урбосерые и урботемносерые, серые и темносерые урбостратифицированные, экраноземы, агросерые
6. Агросерые, агротемносерые, агроаллювиальные темногумусовые, серые и темносерые урбостратифицированные
7. Серые и темносерые, преимущественно постагрогенные
8. Серые, в.т.ч. урбостратифицированные, аллювиальные темногумусовые, в.т. ч. урбостратифицированные

9. Серогумусовые на техногенных грунтах, урбосерые переуплотненные

Рис. 1.6. Калининград Fig. 1.6. Kaliningrad

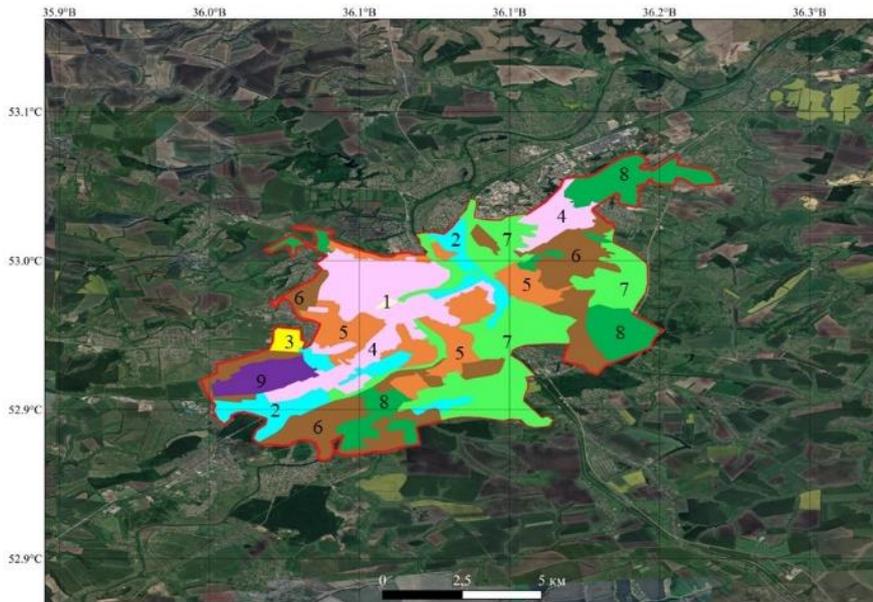


Легенда

1. Урбостратоземы на культурном слое
2. ТПО, урбостратоземы техногенные, экраноземы.
3. Экраноземы, серогумусовые глееватые на техногенных грунтах, реплантоземы
4. Урбостратоземы, экраноземы, урбодерново-подзолистые
5. Урбодерново- подзолистые и урбобуроземы, экраноземы, дерново-подзолисто-глеевые и буроземы урбостратифицированные
6. Агродерново-подзолистые проградированные, агроземы метаморфические проградированные, дерново- подзолистые, буроземы и буроземы оподзоленные урбостратифицированные
7. Аллювиальные серогумусовые, аллювиальные серогумусовые

- глееватые и глеевые, в.т.ч. постагрогенные, серогумусовые
8. Дерново- и перегнойно-подзолистые, в.т.ч. урбостратифицированные.
 9. Серогумусовые на природных и техногенных грунтах, ТПО
 10. Вода

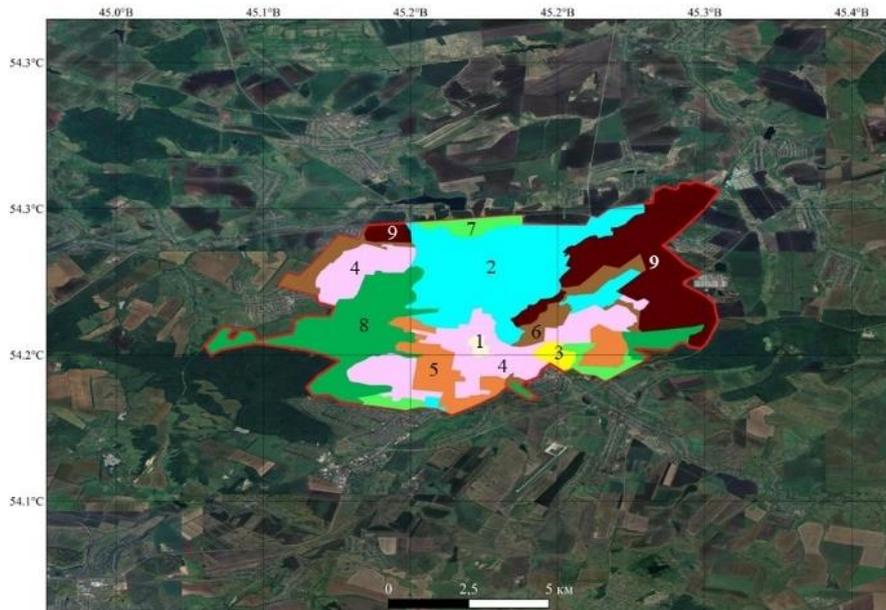
Рис. 1.7. Орел Fig. 1.7. Orel



Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах /культ.слое
2. ТПО, урбостратоземы на техногенных грунтах
3. Экраноземы, серогумусовые на техногенных грунтах
4. Урбостратоземы, урбосерые, экраноземы
5. Урбосерые и урботемносерые, серые и темносерые урбостратифицированные, экраноземы, агросерые
6. Агросерые, агротемносерые, агроаллювиальные темногумусовые, серые и темносерые урбостратифицированные
7. Серые и темносерые, преимущественно постагрогенные
8. Серые, в.т.ч. урбостратифицированные, аллювиальные темногумусовые, в.т.ч. урбостратифицированные
9. Серогумусовые на техногенных грунтах, урбосерые переуплотненные

Рис. 1.8. Саранск Fig. 1.8. Saransk



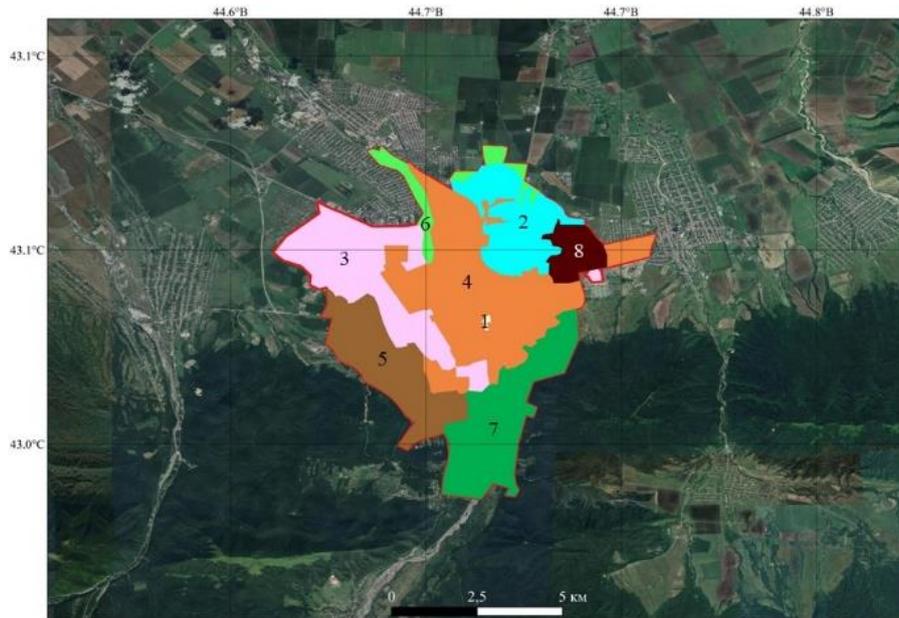
Легенда

1. Урбостратоземы на погребенных почвах/культ. слое
2. ТПО, экраноземы, урбостратоземы техногенные
3. Экраноземы, темногумусовые на техногенных грунтах, реплантоземы
4. Урбостратоземы, экраноземы, урбочерноземы глинисто-иллювиальные
5. Урбочерноземы глинисто-иллювиальные, черноземы глинисто-иллювиальные урбостратифицированные, экраноземы, агрочерноземы глинисто-иллювиальные
6. Агрочерноземы глинисто-иллювиальные, агросерые проградированные,
7. Черноземы глинисто-иллювиальные постагrogenные, серые постагrogenные, серые
8. Черноземы глинисто-

иллювиальные и серые, в.т.ч. урбостратифицированные

9. Агротемногумусовые иллювиальные, агрочерноземы глинисто-иллювиальные, агроземы глинисто-иллювиальные

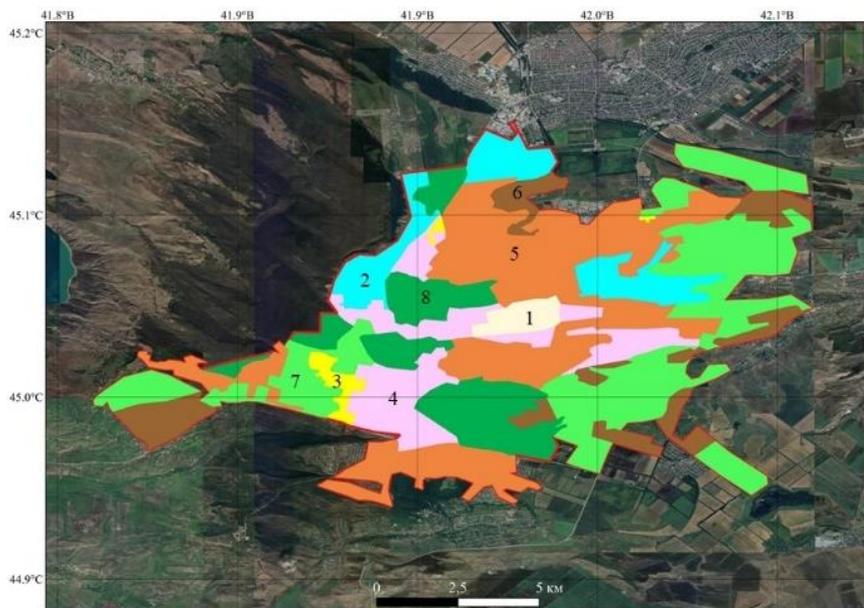
Рис. 1.9. Владикавказ Fig. 1.9. Vladikavkaz



Легенда

1. Урбостратоземы на культурном слое
2. ТПО, экраноземы, урбостратоземы техногенные
3. Урбостратоземы, урбобуросемы глееватые, экраноземы, урбочерноземы глинисто-иллювиальные
4. Урбобуросемы, урбостратоземы, экраноземы, буросемы урбостратифицированные
5. Агроземы структурно-метаморфические проградированные, буросемы урбостратифицированные
6. Слоисто-аллювиальные протогумусовые, буросемы темные, буросемы постагрогенные
7. Буросемы темные, буросемы темные оподзоленные
8. Агроземы темные структурно-метаморфические

Рис. 1.10. Ставрополь Fig. 1.10. Stavropol

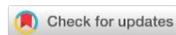


Легенда

1. Урбостратоземы на культурном слое
2. ТПО, экраноземы, урбостратоземы техногенные
3. Экраноземы, темногумусовые на техногенном грунте, реплантоземы
4. Урбостратоземы, урботемносерые, урбочерноземы, экраноземы
5. Урботемносерые, темносерые и черноземы урбо-стратифицированные, экраноземы
6. Агротемносерые и агрочерноземы
7. Темносерые и черноземы в т.ч. постагрогенные и эродированные
8. Темногумусовые, литоземы темногумусовые, карболитоземы, аллювиальные темногумусовые, в т.ч. урбостратифицированные

УДК 631.47:631.67

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-241-280



Ссылки для цитирования:

Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И. Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” в течение полувека // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 241-280. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-241-280

Cite this article as:

Kruglyakova N.G., Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I., Retrospective analysis of agricultural land use of experimental station “Oroschaemaya” during a half century, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 241-280, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-241-280

Благодарность:

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № FGUR-2022-0009, ЕГИСУ НИОКТР № 122022800220-5.

Авторы благодарны заведующему лабораторией почвенной информатики ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, к. б. н. Д.И. Руховичу и научному сотруднику, к. с.-х. н. П.В. Королевой за подборку космических снимков, гидротехнику опытной станции “Орошаемая” А.П. Антонову за консультации о способах орошения и типах дождевальных машин, применявшихся на полях опытной станции, ученому секретарю ВНИИОЗа, к. б. н. О.П. Комаровой за помощь в работе с архивными материалами.

Acknowledgments:

This work was supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Project No. FGUR-2022-0009, EGISU NIOCTR No. 122022800220-5.

The authors are grateful to the Head of the Laboratory of Soil Informatics of the Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute” – D.I. Rukhovich, Candidate of Biol. Sci.; and to P.V. Koroleva, Research Associate, Candidate of Agri. Sci., for the selection of space images; to A.P. Antonov, Hydraulic Engineer of the experimental station “Irrigated”, for consultations on irrigation methods and types of sprinklers used in the fields of the experimental station; and to O.P. Komarova, Academic Secretary of VNIIOZ, Candidate of Biol. Sci., for assistance in working with archival materials.

Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” в течение полувека

© 2024 г. Н. Г. Круглякова^{1,2*}, Н. Б. Хитров², И. Н. Горохова²,
Е. И. Кравченко²

¹ВНИИОЗ – филиал Федерального научного центра
гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Россия,
400002, Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9,
* e-mail: kruglyakova02032013@yandex.ru.

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

Поступила в редакцию 09.03.2024, после доработки 03.04.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Для исследования трансформации, эволюции и деградации почвенного покрова вод влиянием хозяйственной деятельности человека необходима информация об истории использования земель. Цель статьи – представить результаты ретроспективного анализа изменения сельскохозяйственных угодий в зоне распространения почв светло-каштановых солонцовых комплексов. Объект – почвенный покров на землях опытной станции “Орошаемая” – филиала Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, Волгоградская область, Волго-Донская оросительная система, южные склоны Приволжской возвышенности. Анализ выполнен на основе большого числа космических снимков, архивных данных и консультаций специалистов. Представлены схемы использования земель в разные периоды времени с 1970-х годов до 2023 г., графики динамики площади богарной, орошаемой пашни, залежи. Выявлено 9 вариантов смены угодий во времени: 1 – богара постоянно с 1970 г.; 2 – богара → орошение → богара; 3 – орошение → богара; 4 – богара → орошение; 5 – орошение → богара → орошение; 6 – орошение → богара → залежь; 7 – богара → залежь; 8 – залежь постоянно с 1970 г.; 9 – не используемые земли в последние годы. Установлена длительность однотипного использования каждого поля. Рассчитаны статистические характеристики мощности пахотных горизонтов почв опытной станции.

Ключевые слова: пашня; орошение; залежь; мониторинг земель; пахотный горизонт.

Retrospective analysis of agricultural land use of experimental station “Oroshaemaya” during a half century

© 2024 N. G. Kruglyakova^{1,2*}, N. B. Khitrov², I. N. Gorokhova²,
E. I. Kravchenko²

¹All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov,

9 Timiryazeva Str., Volgograd 400002, Russian Federation,

*e-mail: kruglyakova02032013@yandex.ru.

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

Received 09.03.2024, Revised 03.04.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: Information about land use history is needed for investigation of soil cover transformation, evolution and degradation under human economic activity. The aim of article is to submit results of retrospective analysis of agricultural land use at the zone of light-chestnut solonetzic soil cover. Object is lands of the Experimental station “Oroshaemaya”, Volgograd region, Volga-Don irrigation system. Analysis is carried out on the bases of many space images, archive data and consultations of specialists from All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture. Schemes of land use at different time periods from 1970s till 2023, diagrams of dynamics of dry arable lands, irrigated lands and agricultural fallow are submitted. Nine variants of changing land areas over time are identified: 1 – dry arable land constantly from 1970; 2 – dry arable land → irrigated land → dry arable land; 3 – irrigated land → dry arable land; 4 – dry arable land → irrigated land; 5 – irrigated land → dry arable land → irrigated land; 6 – irrigated land → dry arable land → agricultural fallow; 7 – dry arable land → agricultural fallow; 8 – agricultural fallow constantly from 1970; 9 – unused lands in recent years. Duration of the same type of use for each field is determined. Statistical characteristics of plow horizon thickness in soils of Experimental station are calculated.

Keywords: arable land; irrigation; agricultural fallow; land monitoring; plow horizon.

ВВЕДЕНИЕ

Основные тенденции изменения почвенного покрова в по-

следнее столетие обусловлены прямым воздействием на него различных видов деятельности человека и косвенным влиянием изменяющихся климатических, гидрогеологических и социально-экономических условий. Сведения о разных видах деградации почв обобщены в монографии (Научные основы..., 2013). Для территорий лесостепной, степной и сухостепной зон одним из важнейших воздействий является сельскохозяйственная деятельность, в результате которой от 70 до 90% земель вовлечено в пашню. Помимо технологий сухого земледелия в этих зонах широко применяют технологии возделывания культур в условиях орошения.

Орошение земель – один из мощных видов антропогенных воздействий на почвенный покров и ландшафты в целом, связанный с существенным изменением водного баланса территории в условиях климатически обусловленного дефицита влаги (Soil survey..., 1979). В России значительная часть орошаемых земель сосредоточена в сухостепной зоне распространения каштановых солонцовых комплексов (Зимовец, 1991; Экологические требования..., 1996).

В связи с этим при изучении процессов трансформации, эволюции и деградации почв под влиянием антропогенных воздействий необходимо иметь сведения о видах сельскохозяйственных угодий, используемых на них технологиях, а также о свойствах почв в предшествующие периоды, иными словами, целесообразно изучить историю землепользования на исследуемой территории в предыдущие 20–40 лет, а иногда и за более длительный период. Решение этой задачи возможно на основе разных подходов сбора информации: (1) архивных сведений хозяйства о землепользовании и применяемых технологиях, включая опубликованные данные (Брызжев и др., 2013; Горохова и др., 2020); (2) картографических материалов разного времени составления (Иванов и др., 2020; Иванова и др., 2023); (3) данных дистанционного зондирования (ДДЗ) в виде аэрофотоснимков и снимков космической съемки разными аппаратами (Брызжев и др., 2013; Abdelsadek et al., 2022; Aslam et al., 2024; Kaliraj et al., 2017; Kundu et al., 2017; Nkiruka et al., 2023; Salhi et al., 2021; Yao 2013).

В лаборатории почвенной информатики ФИЦ «Почвенный

институт им. В.В. Докучаева” разработали технологию проведения ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова, которая включает сбор в проекте ГИС разнообразной тематической информации (почвенные карты, землеустроительные планы, топографические карты, цифровые модели рельефа) и ДДЗ, исправление пространственных искажений (если они имеются), геореференсирование всех пространственно-распределенных материалов, создание специализированных классификаторов и легенд к картам землепользования и динамики земель (Брызжев и др., 2013). Эта технология использована при анализе влияния лесополос (Рухович и др., 2014), засоления почв (Рухович и др., 2017) и слитых почв замкнутых западин (Рухович и др., 2015) на изменение почвенного покрова и землепользования в Азовском районе Ростовской обл., динамики засоления почв Голодной степи (Рухович и др., 2016), переувлажненных почв на пашне в Тамбовской обл. (Королева и др., 2019), динамики открытой поверхности почвы на пашне в Тульской обл. (Рухович и др., 2018).

Цель статьи – представить результаты ретроспективного анализа сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” с начала 1970-х годов до 2023 г. для решения задач исследования трансформации почвенного покрова с каштановыми солонцовыми комплексами под влиянием богарного и орошаемого земледелия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются сельскохозяйственные угодья опытной станции “Орошаемая” – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова” (ОС “Орошаемая” – филиал ФГБНУ ФНЦ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова”) (<https://oroshae34.ru/>) (рис. 1).

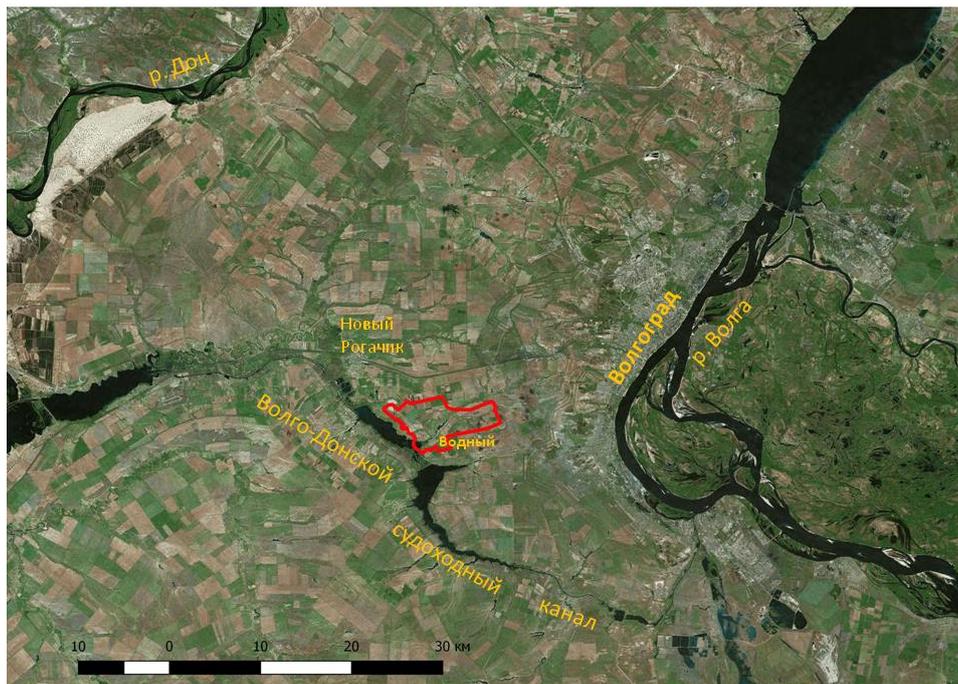


Рис. 1. Положение опытной станции “Орошаемая” (границы обозначены красной линией).
Fig. 1. Position of the experimental station “Irrigated” (borders marked by the red line).

В 1960-х годах исследуемая территория входила в состав отделения № 3 учхоза “Горная Поляна”. В октябре 1967 г. на ее базе было создано опытно-производственное хозяйство (ОПХ) “Орошаемое” Волжского (в последствии Всесоюзного) научно-исследовательского института орошаемого земледелия (ВНИИОЗ). В 1992, 2000, 2010 и 2013 гг. ОПХ “Орошаемое” изменяло юридический статус в соответствии с изменяющимся законодательством в Российской Федерации и ведомственной принадлежности. С 2021 г. ФГУП “Орошаемое” реорганизовано в форме преобразования в Федеральное государственное бюджетное учреждение «Опытная станция “Орошаемая”» (ФГБУ «Опытная станция “Орошаемая”») и присоединения к ФГБНУ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова” в качестве обособленного структурного подразделения.

Опытная станция “Орошаемая” расположена на юго-западном склоне Приволжской возвышенности в 18–20 км к западу от Волгограда. Южная граница земель хозяйства примыкает к Волго-Донскому судоходному каналу между Варваровским и Береславским водохранилищами. По ландшафтному районированию Волгоградской области она находится на юге Волго-Медведицкого ландшафта (Темнышова, Денисова, 2014).

Общая площадь землепользования – 3 644 га, из которых сельскохозяйственные угодья занимают 3 552 га. Площадь пахотных земель – 2 575 га, в составе которых 1 379 га орошаемых (<https://oroshаемое34.ru/>).

Агроклиматические ресурсы территории характеризуются недостаточностью увлажнения, высокой температурой воздуха и почвы, сильными ветрами. Среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах +7.6...+8.5 °С, минимальная среднемесячная температура в январе -9.6 °С, максимальные – в июле–августе составляют +24.8 °С. По агроклиматическому районированию Волгоградской области опытная станция относится к очень теплomu району резко засушливой области Шв (Темнышова, Денисова, 2014).

В геоморфологическом отношении земли хозяйства размещены в Приволжской возвышенной провинции, где в составе аккумулятивно-денудационной южной ее части выделяется Юго-

Западный подрайон низких плато и террас с плосковолнистым рельефом. Именно в этой части плосковыпуклые водоразделы переходят в склоны долин рек Червленная (в настоящее время – меандры этой реки, затоплены водами Варваровского и Береславского водохранилищ Волго-Донского судоходного канала), Песчаная и Карповка.

В литологическом отношении территория неоднородна. Почвообразующими породами являются преобладающие палеобурые четвертичные опесчаненные суглинки с линзами песка и супеси на глубине 1.5–3 м, разные двучленные отложения, представленные указанными выше суглинками, подстилаемыми с 50–120 см песками разного цвета и карбонатности, супесями и слоистыми песчано-суглинистыми отложениями, а также выходящими на дневную поверхность щебнисто-суглинисто-песчаными и щебнисто-суглинистыми отложениями с фрагментами опоки (Дегтярева, Жулидова, 1970; Зинченко и др., 2020).

Территория опытной станции относится к сухостепной природной зоне с развитием светло-каштановых солонцовых комплексов на водораздельных склоновых поверхностях, большая часть которых используется в сельском хозяйстве (Дегтярева, Жулидова, 1970).

На орошаемых землях хозяйства применялись схемы севооборотов зерно-кормового направления (Технологические карты..., 1975; Гудкова, Мелихова, 1983; Кружилин и др., 2000). Четырехпольный: люцерна второго года жизни, люцерна третьего года жизни, яровая пшеница + горохово-подсолнечниковая смесь, озимая пшеница с весенним подсевом люцерны. Пятипольный: люцерна первого года жизни, люцерна второго года жизни, яровая пшеница, озимая пшеница + горохово-подсолнечниковая смесь, кукуруза на силос. Шестипольный: люцерна первого года жизни под покровом яровой пшеницы, люцерна второго года жизни, люцерна третьего года жизни, яровая пшеница, озимая пшеница + горохово-подсолнечниковая смесь, кукуруза на силос. Семипольный: люцерна первого года жизни, люцерна второго года жизни, люцерна третьего года жизни, яровая пшеница, озимая пшеница, озимая пшеница + горохово-подсолнечниковая смесь, кукуруза на силос. Восьмипольный: озимая пшеница с весенним подсевом

люцерны, люцерна второго года жизни, люцерна третьего года жизни, четвертого года жизни, яровая пшеница, озимая пшеница + горохово-подсолнечниковая смесь, кукуруза на силос, яровая пшеница.

До орошения преобладающими почвами были светло-каштановые солонцеватые и несолонцеватые суглинистые почвы в комплексе с каштановыми степными солонцами на водоразделе и склонах, луговато- и лугово-каштановыми почвами в западинах и ложбинах; в лощинах и отвершках балок – комплексы намытых почв, в долине Балки Песчаной – аллювиальные почвы. В течение последнего полувека почвенный покров подвергся преобразованию под влиянием испытания и эксплуатации разных способов и техники орошения и сопутствующих агротехнических и мелиоративных воздействий. В текущее время основной способ орошения – дождевание “Фрегатами” или дождевальными установками барабанного типа. Большая часть территории опытной станции представлена пашней. По классификации почв СССР к указанным выше названиям почв добавляются определения “пахотная”, “орошаемая”, “смытая”. Согласно классификации почв России, почвы представлены агрокаштановыми солонцеватыми, агроземами аккумулятивно-карбонатными солонцеватыми и несолонцеватыми, агроземами глинисто-иллювиальными, агросолонцами, агроземами без срединных горизонтов, а также стратоземами и разными стратифицированными почвами. По международной классификации WRB (IUSS, 2022), это *haplic or Luvic Kastanozems* (*Aric, Loamic*), *haplic Solonetz* (*Aric, Loamic, Cutanic*).

Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции выполнили на основе большого числа космических снимков Landsat и Sentinel с 1973 по 2021 гг. разных сезонов и наземной оценки фактического состояния угодий в 2022 и 2023 гг.

Для визуального дешифрирования угодий использованы данные дистанционного зондирования (ДДЗ):

1. Landsat 1 многоканальный с пространственным разрешением 60 м 1973 (1 кадр) и 1974 гг. (1 кадр).
2. Landsat 2 многоканальный с пространственным разрешением 60 м 1975 г (2 кадра).

3. Landsat 4 TM многоканальный с пространственным разрешением 30 м 1983 г. (2 кадра).

4. Landsat 5 TM многоканальный с пространственным разрешением 30 м 1985 (2 кадра), 1986 (4 кадра), 1987 (4 кадра), 1988 (8 кадров), 1989 (6 кадров), 1990 (4 кадра), 1991 (6 кадров), 1992 (5 кадров), 1993 (2 кадра), 1994 (6 кадров), 1995 (6 кадров), 1996 (3 кадра), 1997 (2 кадра), 1998 (6 кадров), 1999 (10 кадров), 2000 (7 кадров), 2001 (4 кадра), 2002 (2 кадра), 2003 (1 кадр), 2004 (1 кадр), 2005 (2 кадра), 2006 (2 кадра), 2007 (7 кадров), 2008 (2 кадра), 2009 (3 кадра), 2010 (5 кадров), 2011 гг. (5 кадров).

5. Landsat 7 ETM+ многоканальный с пространственным разрешением 30 м 2000 (1 кадр), 2001 (3 кадра), 2002 (1 кадр), 2003 гг. (1 кадр).

6. Landsat 8 OLI многоканальный с пространственным разрешением 30 м 2013 (3 кадра), 2014 (2 кадра), 2015 (3 кадра), 2016 (4 кадра), 2017 (4 кадра), 2018 (7 кадров), 2019 (5 кадров), 2020 (7 кадров), 2021 гг. (3 кадра).

7. Sentinel-2 многоканальный с пространственным разрешением 10 м 2016 (4 кадра), 2017 (19 кадров), 2018 (36 кадров), 2019 (31 кадр), 2020 (32 кадра), 2021 гг. (16 кадров).

Подборку снимков выполнили сотрудники лаборатории почвенной информатики ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Для уточнения информации о виде угодья использовали публикации сотрудников ВНИИОЗа и консультации гидротехников опытной станции.

В QGIS создан векторный слой состояния земельных угодий в разные периоды. В качестве основы для проведения границ использовали современные снимки высокого разрешения, учитывая сравнительное постоянство границ полей за полвека. Исключением были участки с дождевальными машинами (ДМ) Фрегат большого радиуса действия на правом берегу балки Песчаной, которые выделены с большей пространственной погрешностью по центрам пикселей вдоль края круга на снимках Landsat с 1986 по 2000 гг.

Выделяли следующие угодья: (1) пашня богарная (далее “богара”), (2) пашня орошаемая, (3) залежь, (4) узкие линейные полосы, являющиеся разделителями используемых пахотных угодий.

Богарную пашню дешифрировали на основе изменения спектральной яркости снимков нескольких сроков в течение года от весны до осени, связанной с посевом, развитием культуры, ее уборки и подготовки поля к посеву следующей культуры. Обязательным признаком является наличие открытой поверхности почвы весной и/или осенью. Чистые пары в летний период имеют открытую поверхность почвы. Залежь отличается от богары и орошения отсутствием периода с открытой поверхностью почвы в течение нескольких лет подряд. Узкие разделители на полях или между полей дешифрировали по наземным наблюдениям в период 2019–2023 гг. с отслеживанием их исчезновения на космических снимках более ранних сроков съемки. Их возникновение обусловлено развитием сорной растительности вдоль канав бывших оросителей или трасс закрытых трубопроводов с выходами на поверхность гидрантов для разных ДМ.

На рисунке 2 представлен пример составленной схемы использования земель в 2019 г. и три выборочных снимка Sentinel-2 в мае, августе и сентябре.

Орошаемую пашню разделяли по видам использованных ДМ на основе формы поливного участка, наземной информации о виде ДМ, имеющихся публикаций и консультаций специалистов, работавших в ОПХ “Орошаемое”. Участки полива ДМ ДДА-100 отмечены на почвенной карте 1976 г. и выделяются по сохранившимся канавам временных оросителей или прямых узких полос сильно вскипающих почв на их месте после выравнивания поверхности поля. Последние хорошо проявляются на современных космических снимках высокого разрешения в виде светлых узких полос, расположенных параллельно друг другу с интервалом 100–110 м. ДМ Фрегат и ДМ Кубань являются машинами кругового действия со стационарным гидрантом в центре. Они создают круговой рисунок орошаемого массива. Поля, на которых сотрудники ВНИИОЗа проводили и проводят полевые опыты, отличаются мозаичным рисунком большого числа экспериментальных делянок. Их выделяли в особую группу орошаемой пашни под названием “делянки”.

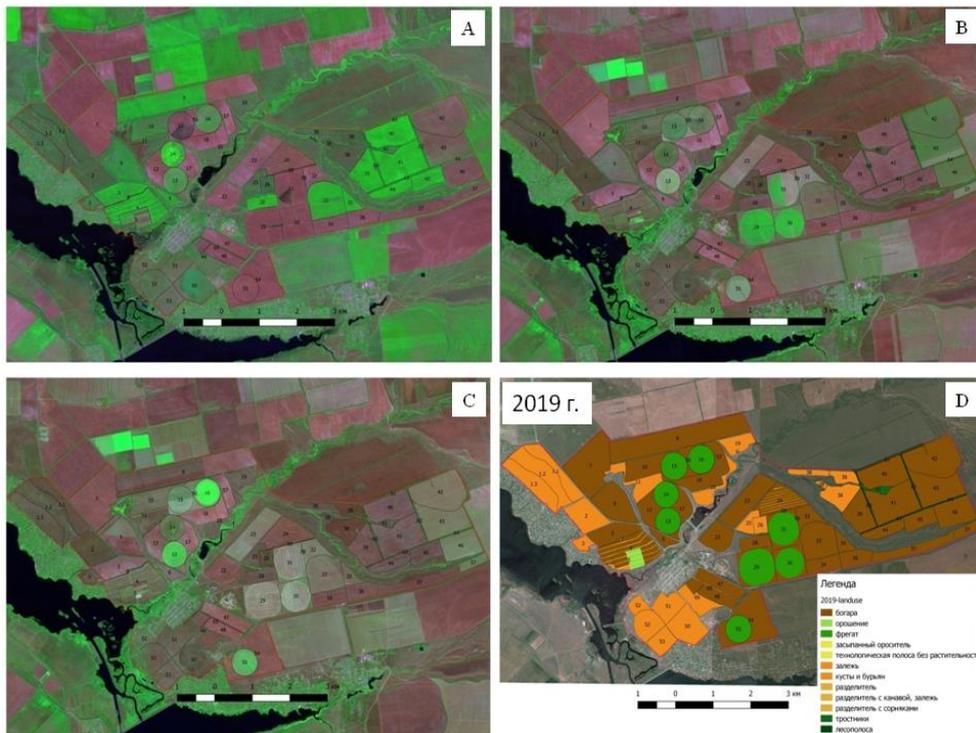


Рис. 2. Космические снимки Sentinel-2 трех сроков (А – 25.05.2019; В – 13.08.2019; С – 05.09.2019) и схема использования земель опытной станции “Орошаемая” в 2019 г. (D). Красная рамка на снимках граница хозяйства. Цифры – условная нумерация полей.

Fig. 2. Sentinel-2 space images of three dates (A – 25.05.2019; B – 13.08.2019; C – 05.09.2019) and the scheme of land use of the experimental station “Irrigated” in 2019 (D). The red line is the farm boundary. Numbers are conventional numbering of fields.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Схемы использования земель в разные годы представлены на рисунке 3, более детально для одного срока на рисунке 4.

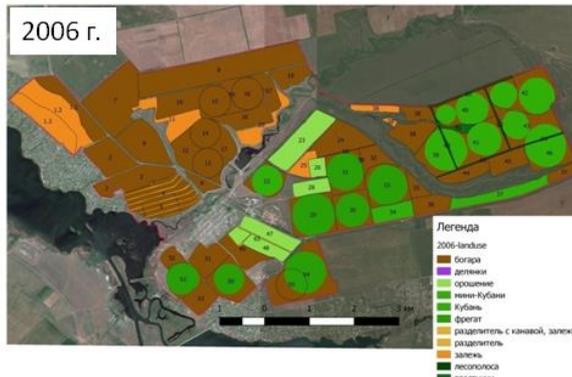
После организации ОПХ большая часть территории сельскохозяйственных угодий была представлена богарной пашней (рис. 5А). В дальнейшем ее общая площадь сначала уменьшалась в связи с развитием орошаемых земель, достигнув минимума в 1995–2000 г., затем неравномерно увеличивалась за счет перевода части орошаемых земель обратно в богарные, либо разных земель в залежь. Два локальных временных максимума общей площади богарной пашни в 2006 и 2016 гг. (рис. 5А) обусловлены временем замены ДМ Фрегат (2006 г.) или постоянным прекращением орошения ДМ Кубань (2016 г.).

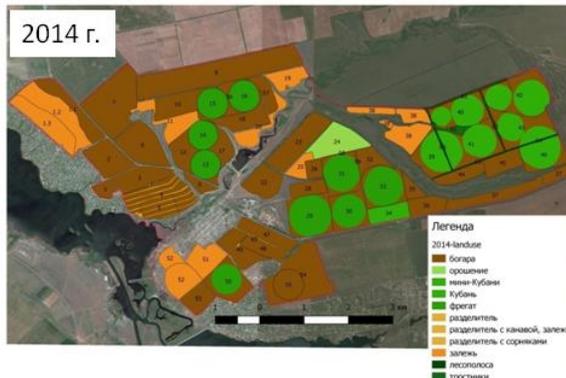
В начале 1970-х годов орошение проводили преимущественно на опытных полях с небольшими делянками (рис. 5 В). При этом использовали разные дождевальные машины: Волжанку (ДКШ-64), Днепр, ДДА-100М и некоторые другие. Большая часть территории в то время была богарой.

На опытных полях изучали эффективность приемов возделывания, удобрения, защиты от болезней разных сельскохозяйственных культур, оптимизировали режим орошения под разные культуры, обосновывали севообороты (Орошаемое земледелие..., 1972, 1994, 2023; Динамика почвенных процессов..., 1990; Проблемы водосберегающего орошения..., 1994; Мамин и др., 2010; Мелихова и др., 2013; Чамурлиев и др., 2013; Мелихов и др., 2018; Тихонова и др., 2014; Роль мелиорации земель..., 2017).

В 1980-х годах появились производственные поливные участки, орошавшиеся ДМ Фрегат. В 1990-х и 2000-х годах отмечается максимальное развитие орошения в хозяйстве (рис. 5А), обусловленное использованием ДМ Фрегат и Кубань кругового действия (рис. 5 В). В это же время испытываются дождевальные установки разных конструкций: Волжанка ДКШ-64, Ладога, Кубань ЛШ, малогабаритная поливальная техника (мини-Кубань-К, мини-Кубань-ФШ, мини-Фрегат-К, мини-Фрегат-ФШ).







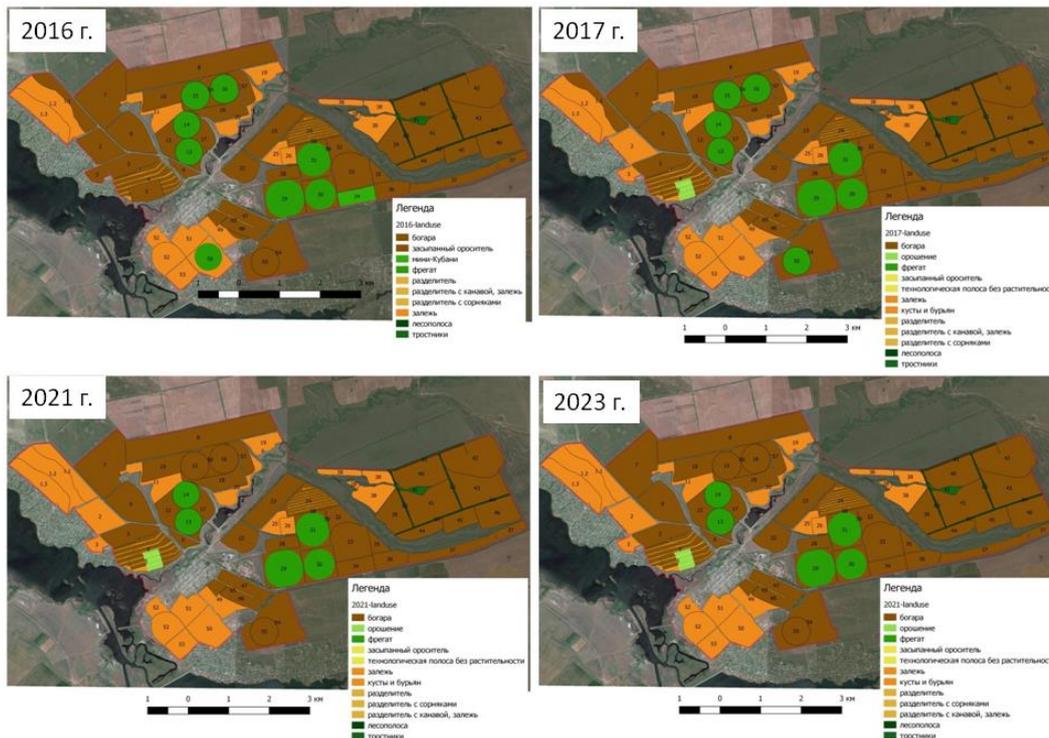


Рис. 3. Схемы использования земель в ОПХ “Орошаемое” и позднее на опытной станции “Орошаемая” с 1970-х годов. Цифры – условные номера полей.

Fig. 3. Schemes of land use at the experimental station “Irrigated” since 1970s. Figures are conventional numbers of fields.

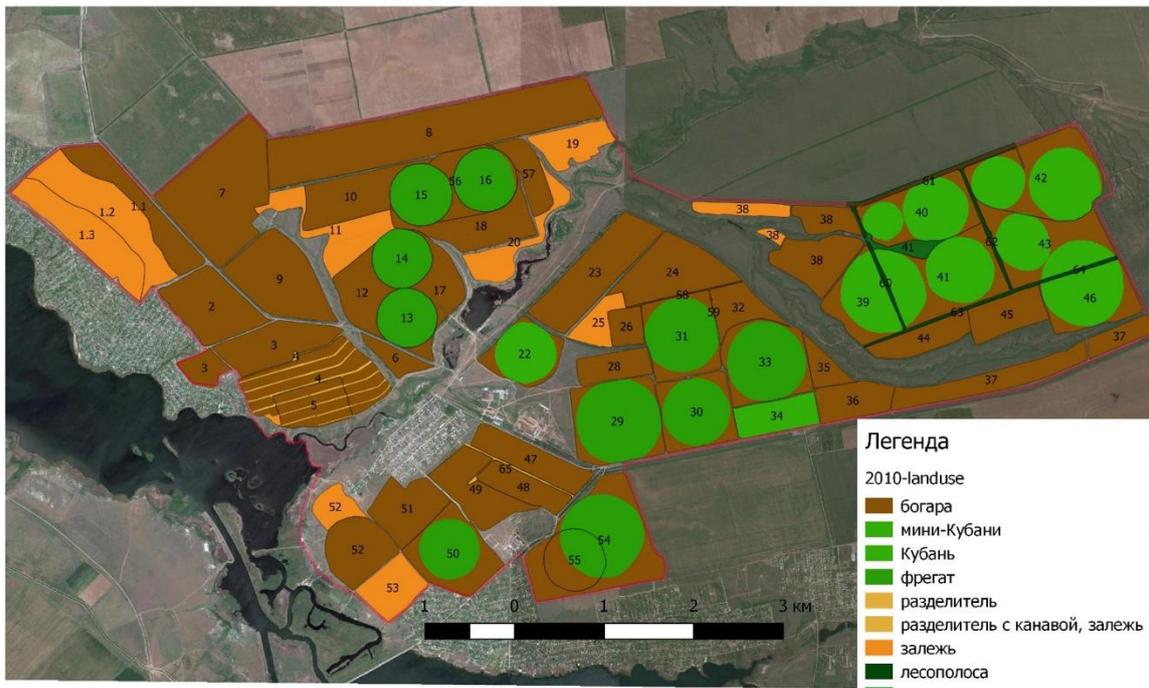


Рис. 4. Схема использования земель в ОПХ “Орошаемое” в 2010 г. Цифры – условные номера полей.
Fig. 4. Scheme of land use at the experimental station “Irrigated” in 2010. Figures – conditional numbers of fields.

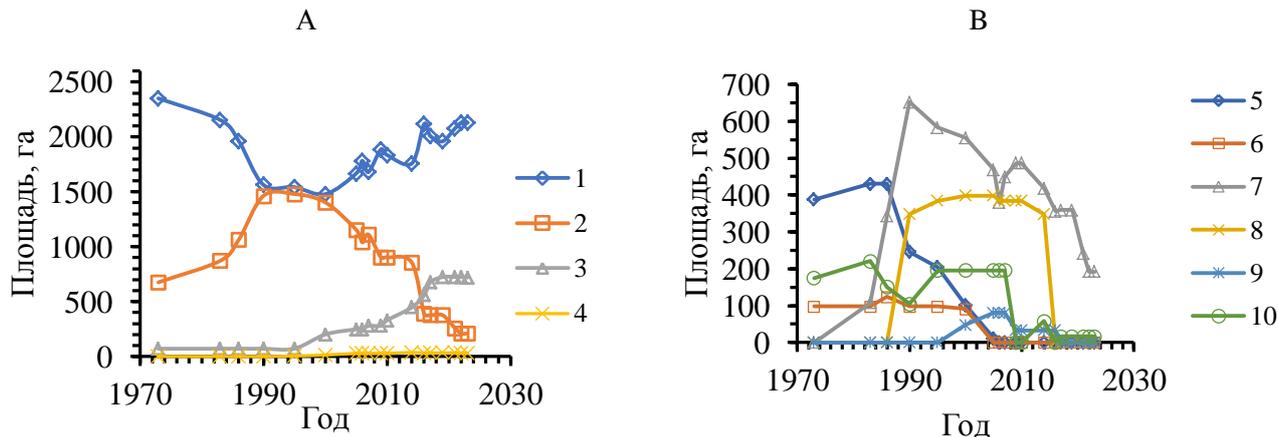


Рис. 5. Динамика площади сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” с 1973 по 2023 гг.: А – суммарная площадь: 1 – пашня, богара; 2 – пашня, орошение (без разделения); 3 – залежь; 4 – не используемые узкие полосы (разные разделители и тростники); В – раздельно пашня, орошаемая разными дождевальными машинами: 5 – делянки на опытных полях; 6 – ДДА-100М; 7 – Фрегат; 8 – Кубань; 9 – мини-Кубань; 10 – дождевальные машины фронтального или барабанного типа.

Fig. 5. Dynamics of agricultural land area of the experimental station “Irrigated” from 1973 to 2023. A – total area: 1 – dry arable land; 2 – arable land, irrigated (without division); 3 – fallow land; 4 – unused narrow land strips (different hedges and reeds); B – arable land divided and irrigated by different sprinklers; 5 – plots on experimental fields; 6 – DDA-100M; 7 – Fregat; 8 – Kuban; 9 – mini-Kuban; 10 – sprinklers of frontal types or hose reelers.

Со второй половины 2010-х годов площадь поливных земель постепенно уменьшается. Производственные посевы орошают ДМ Фрегат, на экспериментальных полях – дождевальными установками барабанного типа. Ранее орошавшиеся поля используют под богару.

Некоторые поля оставляли под залежь, площадь которой заметно стала увеличиваться после 1995 г. в связи с социально-экономическими изменениями в стране. В 2020–2023 гг. участки залежей имели наибольшее распространение (рис. 3, 4, 5). Они приурочены к сильно щебнистым поверхностям (поля 1.2, 11, 25), эродированным склонам на правом берегу балки Песчаной (поля 19, 20), наиболее удаленным от поселка полям (1.1, 1.3, 2, 38), а также к первым экспериментальным полям с делянками возле поселка (поля 49–53).

В течение полувека на территории опытной станции выделены следующие варианты смены вида использования сельскохозяйственных угодий во времени: 1 – богара постоянно с 1970 г. (867 га); 2 – богара → орошение → богара (909 га); 3 – орошение → богара (356 га); 4 – богара → орошение (192 га); 5 – орошение → богара → орошение (17 га); 6 – орошение → богара → залежь (242 га); 7 – богара → залежь (407 га); 8 – залежь постоянно с 1970 г. (71 га); 9 – не используемые земли в последние годы (67 га) (рис. 6А).

Для анализа изменения почв под влиянием сельскохозяйственной деятельности выполнена оценка длительности однотипного использования земель. Для этого на рисунке 6В представлено пространственное распределение угодий с указанием года начала их использования в том виде, который наблюдался в 2023 г., а в таблице 1 – дифференциальный анализ площади угодий с разным вариантом их смены во времени в предыдущий период.

Из богарной пашни 2022–2023 гг. около 40% площади в предыдущие полвека использовалась постоянно под севообороты сухого земледелия (табл. 1, вариант 1). Участки расположены на приводораздельном склоне (поля 7, 8) и в середине склона (поля 3, 9, 12, 17, 18, 57) на правом берегу балки Песчаной, плоском водоразделе справа от балки Западной (поля 44, 45). Большая часть (около 60%) современной богарной пашни подвергалась ороше-

нию (табл. 1, варианты 2 и 3) в период с 1970-х до 2010-х годов. Это обусловлено проведением научно-исследовательских работ, связанных с разработкой режимов орошения под разные культуры, и наибольшего использования орошения в производственных условиях при получении кормов для выращивания крупного рогатого скота голштинско-фризской породы.

Для производственных целей применяли преимущественно ДМ Фрегат и Кубань (табл. 2) в течение 15–35 лет на одном и том же поле. Причем ДМ Кубань в настоящее время полностью демонтированы, последний раз с их помощью проводили орошение в 2015 г. Некоторые ДМ Фрегат также демонтированы (табл. 2, варианты 2, 3 и 6), постоянно продолжается эксплуатация четырех машин на общей площади 192 га (табл. 2, вариант 4).

Полученная информация об истории орошения на разных полях опытной станции используется при анализе изменения почвенного покрова под влиянием антропогенеза.

Поскольку сельскохозяйственные угодья опытной станции использовались преимущественно в пашне в условиях богары или орошения, важно оценить вариацию мощности созданного пахотного слоя на полях с разными вариантами смены угодий. Для этого выполнен статистический анализ общей мощности агрогумусового горизонта Р и его подгоризонтов Р1, Р2, Р3рв (табл. 3).

Анализ показал, что пахотные горизонты на полях шести вариантов смены угодий принципиально не различаются по значениям средних, медиан и других статистических показателей. Согласно технологии (Технологические карты..., 1975; Кружилин и др., 2000), глубина вспашки менялась в зависимости от сельскохозяйственной культуры в интервале 25–30 см, в особых случаях выполняли мелиоративную вспашку до 40 см. Полученные значения средней мощности агрогумусового горизонта Р в 2019–2023 гг. в разных вариантах смены угодий изменяются в пределах 30–32 см, нижний квартиль – 25–30 см и верхний квартиль – 32–37 см, что хорошо соответствует имеющейся технологической информации.

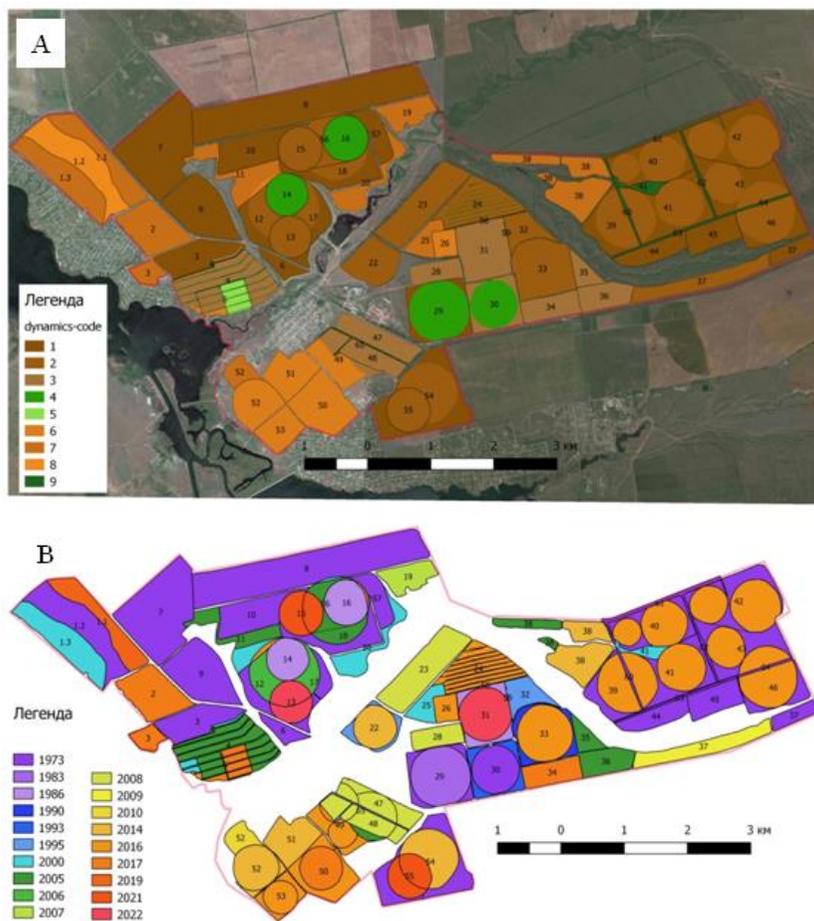


Рис. 6. Схема вариантов динамики использования земель на опытной станции “Орошаемая” (А) и схема дат начала однотипного использования земель по сравнению с таковым в 2023 г. (В). Обозначения: А: 1 – богара постоянно с 1970 г.; 2 – богара → орошение → богара; 3 – орошение → богара; 4 – богара → орошение; 5 – орошение → богара → орошение; 6 – орошение → богара → залежь; 7 – богара → залежь; 8 – залежь постоянно с 1970 г.; 9 – не используемые земли в последние годы. В: легенда – год начала. Цифры на схемах – условная нумерация полей.

Fig. 6. Scheme of various land use dynamics at the experimental station

“Irrigated” (**A**) and scheme of dates of the beginning of the same type of land use, compared to the one in 2023 (**B**). Denotations: **A**: 1 – dry arable land constantly from 1970; 2 – dry arable land → irrigated land → dry arable land; 3 – irrigated land → dry arable land; 4 – dry arable land → irrigated land; 5 – irrigated land → dry arable land → irrigated land; 6 – irrigated land → dry arable land → agricultural fallow; 7 – dry arable land → agricultural fallow; 8 – agricultural fallow constantly from 1970; 9 – unused lands in recent years. **B**: legend is the year of beginning. Numbers in the diagrams are conventional field numbering.

Наименьший коэффициент вариации (12–24%) характерен для общей мощности агрогумусового горизонта, чуть выше он для глубины нижней границы подгоризонта P2 (17–27%), и наибольший (30–50%) – для мощности подгоризонта P1, формирующегося в результате поверхностных обработок при бороновании, и для показателей нижнего подгоризонта Ppb, в котором морфологически сохранились припаханные фрагменты нижележащих горизонтов почвы.

Статистический анализ подтверждает, что на опытной станции использовалась приблизительно одна и та же система механических обработок почвы при возделывании сельскохозяйственных культур, принятая в Волгоградской области. Анализ условий возникновения подгоризонтов Ppb планируется выполнить в другой публикации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая”, расположенной в сухостепной зоне с почвами светло-каштановых солонцовых комплексов на юге Приволжской возвышенности в Волгоградской области, выявил 9 основных вариантов смены угодий во времени: 1 – богара постоянно с 1970 г.; 2 – богара → орошение → богара; 3 – орошение → богара; 4 – богара → орошение; 5 – орошение → богара → орошение; 6 – орошение → богара → залежь; 7 – богара → залежь; 8 – залежь постоянно с 1970 г.; 9 – не используемые земли в последние годы.

Таблица 1. Площади разных вариантов смены использования земель в зависимости от начального года однотипного использования поля по его состоянию на 2023 г.

Table 1. Areas of different land use changes depending on when the constant land use type was initiated on the field, as of its 2023 status.

Год начала однотипного использования	Вариант смены использования земель в течение полувека*									Всего
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Площадь, га									
1973	867	0	0	45	0	0	0	71	30	1013
1983	0	0	0	71	0	0	0	0	0	71
1986	0	0	16	74	0	0	0	0	0	90
1990	0	16	0	0	0	0	0	0	0	16
1993	0	0	18	0	0	0	0	0	0	18
1995	0	36	0	0	0	0	0	0	4	40
2000	0	1	7	0	0	0	126	0	9	143
2005	0	32	122	0	0	0	47	0	10	211
2006	0	35	0	0	0	0	0	0	0	35
2007	0	0	0	0	0	0	31	0	0	31
2008	0	75	105	0	0	0	0	0	0	180
2009	0	48	0	0	0	0	0	0	0	48
2010	0	0	0	0	0	0	17	0	0	17
2014	0	85	0	0	0	88	62	0	8	243
2016	0	468	0	0	0	115	0	0	3	586
2017	0	0	33	2	17	39	75	0	1	167

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Год начала однотипного использования	Вариант смены использования земель в течение полувека*									Всего
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Площадь, га									
2019	0	0	0	0	0	0	49	0	0	49
2021	0	77	0	0	0	0	0	0	0	77
2022	0	35	55	0	0	0	0	0	2	92
Всего	867	908	356	192	17	242	407	71	67	3127

Примечание. * Здесь и далее вариант смены использования земель в течение полувека: 1 – богара постоянно с 1970 г.; 2 – богара → орошение → богара; 3 – орошение → богара; 4 – богара → орошение; 5 – орошение → богара → орошение; 6 – орошение → богара → залежь; 7 – богара → залежь; 8 – залежь постоянно с 1970 г.; 9 – не используемые земли в последние годы.

Note. * Here and after variants of changing land use types over 50 years are numbered as follows: 1 – dry arable land constantly from 1970; 2 – dry arable land → irrigated land → dry arable land; 3 – irrigated land → dry arable land; 4 – dry arable land → irrigated land; 5 – irrigated land → dry arable land → irrigated land; 6 – irrigated land → dry arable land → agricultural fallow; 7 – dry arable land → agricultural fallow; 8 – agricultural fallow constantly from 1970; 9 – unused lands in recent years.

Таблица 2. Площадь земель с разной длительностью орошения в зависимости от вида дождевальной техники
Table 2. Area of lands with different duration of irrigation depending on the type of sprinkler system

Орошение пашни	Вариант смены угодий*	Площадь земель (га) с длительностью орошения			
		менее 10 лет	10-20 лет	20-30 лет	более 30 лет
делянки	2	105	0	0	0
делянки	3	0	27	116	22
делянки	6	0	99	103	17
ДДА	2	26	0	0	0
ДДА	3	0	0	76	0
ДДА	5	0	0	0	17
ДДА	6	0	0	0	4
Фрегат	2	20	106	131	35
Фрегат	3	0	0	44	55
Фрегат	4	1	0	0	191
Фрегат	6	39	44	0	36
Кубань	2	0	36	348	0

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Орошение пашни	Вариант смены угодий*	Площадь земель (га) с длительностью орошения			
		менее 10 лет	10-20 лет	20-30 лет	более 30 лет
мини-Кубань	2	48	0	0	0
мини-Кубань	3	0	33	0	0
фронтальные ДМ	2	58	122	0	0
фронтальные ДМ	3	80	89	0	25
фронтальные ДМ	4	0	45	0	0
фронтальные ДМ	6	0	0	0	15
барабанные ДМ	5	17	0	0	0

Таблица 3. Статистическая характеристика морфометрических показателей пахотных (агрогумусовых) горизонтов почв опытной станции в 2019–2023 гг. в зависимости от варианта смены угодий во времени
Table 3. Statistical characteristics of morphometric indicators of arable (agrohumus) soil horizons of the experimental station in 2019–2023 depending on the variant of land use changes in time

Статистический показатель	Значение показателя для варианта смены угодий (кодировку варианта см. в табл. 1)					
	1	2	3	4	5	7
Общая мощность агрогумусового горизонта P, см						
N	122	65	28	95	21	22
минимум	15	15	18	22	23	21
Q1	25	28	28	30	30	27
медиана	30	32	30	30	30	31
Q3	32	37	34	33	32	36
максимум	46	50	43	47	39	41
среднее	29.0	32.4	30.8	31.1	31.3	30.8
ст. откл	5.2	7.7	5.3	4	3.8	6.1
V, %	18	24	17	13	12	20
Мощность подгоризонта поверхностных обработок (агрогумусовый подгоризонт P1), см						
N	119	65	28	89	19	12
минимум	3	3	2	2	5	4
Q1	5	6	5	5	5	5
медиана	5	8	6	5	8	5
Q3	8	10	10	8	10	7

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Статистический показатель	Значение показателя для варианта смены угодий (кодировку варианта см. в табл. 1)					
	1	2	3	4	5	7
максимум	18	12	10	17	15	12
среднее	6.8	7.5	6.6	6.4	8.1	6.3
ст. откл	2.6	2.3	2.7	3.2	3	2.3
V, %	38	31	41	50	37	37
Глубина нижней границы подгоризонта P2, см						
N	115	65	28	89	19	12
минимум	10	12	15	15	18	10
Q1	15	20	18	20	22	15
медиана	20	23	23	22	23	16
Q3	22	26	25	23	28	21
максимум	33	31	35	34	32	28
среднее	19.9	23.2	22.5	21.5	24.6	17.9
ст. откл	5.3	4.8	4.6	3.7	4.2	4.7
V, %	27	21	20	17	17	26
Глубина верхней границы подгоризонта Ppb, см						
N	55	39	15	62	9	12
минимум	0	0	4	15	20	7
Q1	15	20	16	20	22	11
медиана	20	23	18	22	23	15

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Статистический показатель	Значение показателя для варианта смены угодий (кодировку варианта см. в табл. 1)					
	1	2	3	4	5	7
Q3	22	26	22	23	23	18
максимум	32	41	30	38	30	29
среднее	18.6	22.7	17.4	21.5	23.4	15.2
ст. откл	5.8	7.3	7.6	4.3	3.1	6.2
V, %	31	32	44	20	13	41
Мощность подгоризонта P _{pb} , см						
N	55	39	15	62	9	12
минимум	4	4	7	5	7	8
Q1	8	7	8.5	7	7	15
медиана	10	10	12	9.5	8	17
Q3	14	16	18	13	10	20
максимум	25	30	26	21	13	33
среднее	11.4	11.7	14	10.1	9	18.1
ст. откл	5.1	5.7	6.8	3.7	2.1	6.4
V, %	45	49	49	37	23	35
Доля мощности подгоризонта P _{pb} от общей мощности агрогумусового горизонта P, %						
N	55	39	15	62	9	12
минимум	13	11	21	14	21	22
Q1	27	23	32	24	23	48

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Статистический показатель	Значение показателя для варианта смены угодий (кодировку варианта см. в табл. 1)					
	1	2	3	4	5	7
медиана	35	30	40	30	27	52
Q3	45	40	46	39	31	68
максимум	100	100	87	58	36	80
среднее	38.4	34.6	44.9	31.9	27.6	54.6
ст. откл	17.3	17.5	21.8	10.3	5.4	15.6
V, %	45	51	49	32	20	29

Примечание. N – объем выборки (число почвенных разрезов); минимум, максимум – минимальное и максимальное значения; медиана, среднее – значение медианы и среднего арифметического; Q1, Q3 – нижний и верхний квартили; ст.откл – среднеквадратическое (стандартное) отклонение; V – коэффициент вариации.

Note. N – sample volume (number of soil transects); minimum, maximum – minimum and maximum values; median, mean – median and arithmetic mean values; Q1, Q3 – lower and upper quartiles; standard deviation – standard deviation; V – coefficient of variation.

Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, деятельность опытной станции по своему назначению была направлена на проведение научно-исследовательских работ по разработке и апробации различной техники для орошения земель и изучения режимов орошения и приемов возделывания сельскохозяйственных культур. Во-вторых, на опытной станции производили сельскохозяйственную продукцию в условиях богары и орошения. В-третьих, за полвека произошли серьезные изменения социально-экономических отношений в России, что оказало свое влияние на изменение использования сельскохозяйственных угодий. На основе статистического анализа 353 почвенных разрезов установлено отсутствие значимых различий в общей мощности агрогенно-преобразованного (пахотного) горизонта в группах почв на землях с разными вариантами смены угодий в течение полувека. Это подтверждает использование зональной системы механических обработок почвы в хозяйстве. Полученную информацию по истории землепользования, представленную в виде созданного проекта ГИС, планируется использовать при анализе трансформации, эволюции и деградации почвенного покрова с каштановыми солонцовыми комплексами под воздействием сельскохозяйственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брызжнев А.В., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Организация ретроспективного мониторинга почвенного покрова и земель Азовского района Ростовской области // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1294–1315. DOI: [10.7868/S0032180X13110026](https://doi.org/10.7868/S0032180X13110026).
2. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Кравченко Е.И. Изменение засоленности орошаемых почв участка Червленое за четверть века (Волгоградская область) // Почвоведение. 2020. № 4. С. 463–472. DOI: [10.31857/S0032180X20040061](https://doi.org/10.31857/S0032180X20040061).
3. Гудкова З.П., Мелихова Н.П. Повышение продуктивности севооборотов за счет промежуточных культур // Севообороты в условиях орошения. Сб. тр. ВНИИОЗ. Волгоград, 1983. С. 48–51.
4. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
5. Динамика почвенных процессов и плодородия орошаемых земель /

Сб. науч. тр. под ред. *Кружилина И.П.* Волгоград: НПО “Орошение”, 1990. 192 с.

6. *Зимовец Б.А.* Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М., Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. 249 с.

7. *Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б.* Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 68–109. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-68-109](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109).

8. *Иванов М.А., Абдуллин Х.М., Губайдуллин А.М., Гайнуллин И.И., Гафуров А.М., Усманов Б.М.* Использование архивных пространственных данных при анализе истории землепользования территории болгарских городищ Предволжья Республики Татарстан // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 4. С. 388–403. DOI: [10.18413/2712-7443-2020-44-4-388-403](https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-4-388-403).

9. *Иванова Н.Н., Фомичева Д.В., Рухович Д.И., Шамигурина Е.Н.* Ретроспективный анализ истории сельскохозяйственного освоения и оценка темпов эрозии почв в бассейне р. Локна, Тульская область // Почвоведение. 2023. № 7. С. 872–886. DOI: [10.31857/S0032180X22601475](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601475).

10. *Королева П.В., Рухович Д.И., Шаповалов Д.А., Сулейман Г.А., Долинина Е.А.* Ретроспективный мониторинг переувлажнения почвенного покрова пахотных земель Тамбовской области в 2018–1968 гг. // Почвоведение. 2019. № 7. С. 872–890. DOI: [10.1134/S0032180X19070074](https://doi.org/10.1134/S0032180X19070074).

11. *Кружилин И.П., Мамин В.Ф., Дронова Т.Н., Степанов А.М., Болотин А.Г., Кузнецова Н.В., Толоконников В.В., Козенко О.П., Ломтев А.В., Михайловский В.Б., Чамурлиев О.Г. и др.* Система орошаемого земледелия ОПХ “Орошаемое” (модель адаптивно-ландшафтной системы земледелия на период 2001–2005 гг.). Волгоград: ВНИИОЗ, 2000. 110 с.

12. *Мамин В.Ф., Мелихова Н.П., Зинченко Е.В.* Севообороты на орошаемых землях // Земледелие. 2010. № 1. С. 5–6.

13. *Мелихов В.В., Зибаров А.А., Мелихова Н.П., Вронская Л.В.* Факторы управления плодородием почвы в системе орошаемых севооборотов Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 96–103. DOI: [10.32786/2071-9485-2018-04-12](https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-12).

14. *Мелихова Н.П., Зибаров А.А., Мелихов К.М., Зинченко Е.В.* Оптимизация водного режима культур орошаемых севооборотов – важный фактор повышения их продуктивности и плодородия почвы //

Орошаемое земледелие. 2018. № 4. С. 56–59.

15. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.

16. Орошаемое земледелие в агроландшафтах степей // Сб. науч. тр. под ред. *И.П. Кружиллина*. Волгоград: ВНИИОЗ, 1994. 208 с.

17. Орошаемое земледелие в Поволжье // Труды ВНИИОЗ. Вып. 1. Волгоград: Нижне-Волжское книжное издательство, 1972. 316 с.

18. Орошаемое земледелие – основа устойчивого и достаточного производства продовольствия // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия. Волгоград: Изд-во ВНИИОЗ, 2023. 434 с.

19. Проблемы водосберегающего орошения и мелиорация почв // Сб. науч. тр. под ред. *И.Н. Кружиллина*. Волгоград: ВНИИОЗ, 1994. 134 с.

20. Роль мелиорации земель в реализации государственной научно-технической политики в интересах устойчивого развития сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия. Волгоград: ВНИИОЗ, 2017. 528 с.

21. *Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Королева П.В.* Применение технологии спектральной окрестности линии почв для анализа интенсивности использования почвенного покрова в 1985–2014 гг. (на примере трех районов Тульской области) // Почвоведение. 2018. № 3. С. 357–371. DOI: [10.7868/S0032180X18030103](https://doi.org/10.7868/S0032180X18030103).

22. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Влияние засоленных почв на изменчивость типов землепользования в Азовском районе Ростовской области // Почвоведение. 2017. № 3. С. 289–310. DOI: [10.7868/S0032180X17010130](https://doi.org/10.7868/S0032180X17010130).

23. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1293–1307. DOI: [10.7868/S0032180X14110094](https://doi.org/10.7868/S0032180X14110094).

24. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Методология сравнения разновременных почвенных карт в целях выявления и описания динамики почвенного покрова на примере мониторинга засоления почв // Почвоведение. 2016. № 2. С. 164–181. DOI: [10.7868/S0032180X1602009X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1602009X).
25. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Ретроспективный анализ изменчивости землепользования на слитых почвах замкнутых западин Приазовья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1168–1194. DOI: [10.7868/S0032180X15100093](https://doi.org/10.7868/S0032180X15100093).
26. Темнышова В.А., Денисова Е.В. Ландшафтное районирование Волгоградской области // Научно-методический электронный журнал “Концепт”. 2014. Т. 20. С. 2066–2070. URL: <http://e-koncept.ru/2014/54677.htm>.
27. Технологические карты по возделыванию полевых культур на орошаемых землях. Волгоград: типография изд-ва “Волгоградская правда”, 1975. 82 с.
28. Тихонова М.К., Болотин Д.А., Тегесов Д.С. Мониторинг водных нагрузок в орошаемых агроландшафтах // Орошаемое земледелие. 2014. № 4. С. 9–10.
29. Чамурлиев О.Г., Мелихова Н.П., Зинченко Е.В. Минимизация способов основной обработки почвы под сою на орошаемых землях Нижнего Поволжья. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2013. 101 с.
30. Экологические требования к орошению почв России / Под общ. ред. Б.А. Зимовца и Н.Б. Хитрова. Составители: Б.А. Зимовец, А.Г. Бондарев, И.П. Айдаров, В.Я. Григорьев, И.И. Судницын, Н.П. Чижикова, Н.Б. Хитров, А.И. Корольков, Т.И. Королькова. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. 72 с.
31. Abdelsadek E., Elbeih S., Negm A. Coastal and landuse changes of Burullus Lake, Egypt: A comparison using Landsat and Sentinel-2 satellite images // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2022. Vol. 25. P. 815–829. DOI: [10.1016/j.ejrs.2022.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.07.006).
32. Aslam R.W., Shu H., Tariq A., Naz I., Ahmad M.N., Quddoos A., Javid K., Mustafa F., Aeman H. Monitoring landuse change in Uchhali and Khabeki wetland lakes, Pakistan using remote sensing data // Gondwana Research. 2024. Vol. 129. P. 252–267. DOI: [10.1016/j.gr.2023.12.015](https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.12.015).
33. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. 234 p.

34. Kaliraj S., Chandrasekar N., Ramachandran K.K., Srinivas Y., Saravanan S. Coastal landuse and land cover change and transformations of Kanyakumari coast, India using remote sensing and GIS // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2017. Vol. 20. P. 169–185. DOI: [10.1016/j.ejrs.2017.04.003](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.003).
35. Kundu S., Khare D., Mondal A. Landuse change impact on sub-watersheds prioritization by analytical hierarchy process (AHP) // *Ecological Informatics*. 2017. Vol. 42. P. 100–113. DOI: [10.1016/j.ecoinf.2017.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.10.007).
36. Nkiruka E.M., Chinedu A.D., Smart U.N. Landuse, landcover change dynamics and flooding in the lower Niger basin Onitsha, South Eastern Nigeria // *Land Use Policy*. 2023. Vol. 131. Paper 106748. P. 1–14. DOI: [10.1016/j.landusepol.2023.106748](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106748).
37. Salhi A., Benabdellouahab S., Bouayad El O., Benabdellouahab T., Larifi I., El Mousaoui M., Acharrat N., Himi M., Ponsati A.S. Impacts and social implications of landuse-environment conflicts in a typical Mediterranean watershed // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 764. Paper 142853. P. 1–16. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142853](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142853).
38. Soil survey investigations for irrigation, FAO Soils Bulletin No 42, Rome, 1979.
39. Yao H. Characterizing landuse changes in 1990–2010 in the coastal zone of Nantong, Jiangsu province, China // *Ocean & Coastal Management*. 2013. Vol. 71. P. 108–115. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2012.09.007](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.09.007).

REFERENCES

1. Bryzzhev A.V., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V., Organization of retrospective monitoring of the soil cover in Azov district of Rostov oblast, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(10), pp. 1029–1049, DOI: [10.1134/S1064229315100014](https://doi.org/10.1134/S1064229315100014).
2. Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Kravchenko E.I., Changes in Soil Salinity at the Chervlenoe Irrigation Massive (Volgograd Oblast) in a Quarter of Century, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 4, pp. 494–502, DOI: [10.1134/S1064229320040067](https://doi.org/10.1134/S1064229320040067).
3. Gudkova Z.P., Melikhova N.P., Povyshenie produktivnosti sevooborotov za schet promezhutochnykh kul'tur (Increase in productivity of crop rotations due to intermediate crops), *Sevooboroty v usloviyakh orosheniya. Sb. Tr. VNIIOZ*, Volgograd, 1983, pp. 48–51.
4. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Pochvy Volgogradskoj oblasti* (Soils of Volgograd Region), Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izd-vo, 1970, 319 p.

5. Kruzhilin I.P. (Ed.), *Dinamika pochvennyh processov i plodorodija oroshaemyh zemel* (Dynamics of soil processes and fertility of irrigated lands), Volgograd: NPO “Oroshenie”, 1990, 192 p.
6. Zimovets B.A., *Ekologiya i melioraciya pochv suhostepnoj zony* (Ecology and melioration of soils in dry-steppe zone), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 1991, 249 p.
7. Zinchenko E.V., Gorokhova I.N., Kruglyakova N.G., Khitrov N.B., Modern state of irrigated soils at the south of the Volga upland, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 68–109, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-68-109](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109).
8. Ivanov M.A., Abdullin H.M., Gubaidullin A.M., Gainullin I.I., Gafurov A.M., Usmanov B.M., Using archival spatial data in the analysis of land use of the territory of Bulgarian settlements in the PreVolga of Tatarstan, *Regional Geosystems*, Vol. 44(4), pp. 388–403, DOI: [10.18413/2712-7443-2020-44-4-388-403](https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-4-388-403).
9. Ivanova N.N., Fomicheva D.V., Rukhovich D.I., Shamshurina E.N., Retrospective Analysis of the History of Agricultural Development and Evaluation of Soil Erosion Rates in the Lokna River Basin, Tula Oblast, *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 56, No. 7, pp. 963–975, DOI: [10.1134/S1064229323600586](https://doi.org/10.1134/S1064229323600586).
10. Koroleva P.V., Rukhovich D.I., Suleiman G.A., Dolinina E.A., Shapovalov D.A., Retrospective Monitoring of Soil Waterlogging on Arable Land of Tambov Oblast in 2018–1968, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 7, pp. 834–852, DOI: [10.1134/S106422931907007X](https://doi.org/10.1134/S106422931907007X).
11. Kruzhilin I.P., Mamin V.F., Dronova T.N., Stepanov A.M., Bolotin A.G., Kuznetsova N.V., Tolokonnikov V.V., Kozenko O.P., Lomtev A.V., Mikhaylovskiy V.B., Chamurliev O.G. et al., *Sistema oroshaemogo zemledelija OPH “Oroshaemoe” (model' adaptivno-landshaftnoj sistemy zemledelija na period 2001–2005 gg.)* (The system of irrigated farming of OPKh “Oroshaemoe” (model of adaptive-landscape farming system for the period 2001–2005), Volgograd, VNIIOZ, 2000, 110 p.
12. Mamin V.F., Melikhova N.P., Zinchenko E.V., *Sevooboroty na oroshaemyh zemlyah* (Crop rotations for irrigated lands), *Zemledelie*, 2010, No. 1, pp. 5–6.
13. Melikhov V.V., Zibarov A.A., Melikhova N.P., Vronskaya L.V., *Faktory upravleniya plodorodiem pochvy v sisteme oroshaemyh sevooborotov Nizhnego Povolzh'ya* (Factors of soil fertility management in the system of irrigated crop rotation of th Lower Volga Region), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*, 2018, No. 4(52), pp. 96–103, DOI: [10.32786/2071-9485-2018-04-12](https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-12).

14. Melikhova N.P., Zibarov A.A., Melikhov K.M., Zinchenko E.V., Optimizaciya vodnogo rezhima kul'tur oroshaemyh sevooborotov – vazhnyj faktor povysheniya ih produktivnosti i plodorodiya pochvy (Optimization of the water regime of crops of irrigated crop rotations is an important factor in increasing their productivity and soil fertility), *Oroshaemoe zemledelie*, 2018, No. 4, pp. 56–59.

15. *Nauchnye osnovy predotvrasheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshavtnom zemledelii: V.1. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrasheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy* (Scientific bases of prevention of soil (land) degradation of agricultural lands in Russia and formation of systems for reproduction of their fertility in adaptive-landscape farming: Vol. 1. Theoretical and methodological bases of prevention of soil (land) degradation of agricultural lands), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2013, 756 p.

16. Kruzhilin I.P. (Ed.), *Oroshaemoe zemledelie v agrolandshaftakh stepey* (Irrigated farming in agrolandscapes of steppes), Volgograd: VNIIOZ, 1994, 208 p.

17. *Oroshaemoe zemledelie v Povolzh'e* (Irrigated farming in the Volga region), *Trudy VNIIOZ*, Iss. 1, Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1972. 316 p.

18. *Oroshaemoe zemledelie – osnova ustoychivogo i dostatochnogo proizvodstva prodovol'stviya* (Irrigated farming – the basis of sustainable and sufficient food production), Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of the All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd: Izd-vo VNIIOZ, 2023, 434 p.

19. Kruzhilin I.P. (Ed.), *Problemy vodosberegayushego orosheniya i melioratsiya pochv* (Problems of water-saving irrigation and soil reclamation), Volgograd: VNIIOZ, 1994, 134 p.

20. *Rol' melioratsii zemel' v realizatsii gosudarstvennoy nauchno-tekhnicheskoy politiki v interesakh ustoychivogo razvitiya sel'skogo khozyaystva* (The role of land reclamation in the implementation of the state scientific and technical policy in the interests of sustainable agricultural development), Proc. of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd: VNIIOZ, 2017, 528 p.

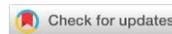
21. Rukhovich D.I., Rukhovich A.D., Rukhovich D.D., Simakova M.S., Kulyanitsa A.L., Koroleva P.V., Application of the Spectral Neighborhood of Soil Line Technique to Analyze the Intensity of Soil Use in 1985–2014 (by the

- Example of Three Districts of Tula Oblast), *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51(3), pp. 345–358, DOI: [10.1134/S1064229318030110](https://doi.org/10.1134/S1064229318030110).
22. Rukhovich D.I., Simakova M.S., Bryzzhev A.V., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Chernousenko G.I., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V., Kulyanitsa A.L., The influence of soil salinization on land use changes in Azov district of Rostov oblast, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50(3), pp. 276–295, DOI: [10.1134/S1064229317010136](https://doi.org/10.1134/S1064229317010136).
23. Rukhovich D.I., Simakova M.S., Kulyanitsa A.L., Bryzzhev A.V., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V., Impact of shelterbelts on the fragmentation of erosional networks and local soil waterlogging, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47(11), pp. 1086–1099, DOI: [10.1134/S106422931411009X](https://doi.org/10.1134/S106422931411009X).
24. Rukhovich D.I., Simakova M.S., Bryzzhev A.V., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Chernousenko G.I., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V., Kulyanitsa A.L., Methodology for comparing soil maps of different dates with the aim to reveal and describe changes in the soil cover (by the example of soil salinization monitoring), *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49(2), pp. 145–162, DOI: [10.1134/S1064229316020095](https://doi.org/10.1134/S1064229316020095).
25. Rukhovich D.I., Simakova M.S., Bryzzhev A.V., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Kulyanitsa A.L., Rukhovich S.V., Retrospective analysis of changes in land uses on vertic soils of closed mesodepressions on the Azov plain, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(10), pp. 1050–1075, DOI: [10.1134/S1064229315100099](https://doi.org/10.1134/S1064229315100099).
26. Temnyshova V.A., Denisova E.V., Landscape zoning of Volgograd region, *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal "Kontsept"*, 2014, Vol. 20, pp. 2066–2079, URL: <http://e-koncept.ru/2014/54677.htm>.
27. *Tekhnologicheskie karty po vozdeleyvaniyu polevykh kul'tur na oroshaemykh zemlyakh* (Technological maps on cultivation of field crops on irrigated lands), Volgograd: tipografiya izd-va "Volgogradskaya Pravda", 1975, 82 p.
28. Tikhonova M.K., Bolotin D.A., Tegesov D.S., Monitoring vodnykh nagruzok v oroshaemykh agrolandshaftakh (Monitoring of water loads in irrigated agrolandscapes), *Oroshaemoe zemledelie*, 2014, No. 4, pp. 9–10.
29. Chamurliev O.G., Melikhova N.P., Zinchenko E.V., *Minimizatsiya sposobov osnovnoy obrabotki pochvy pod soyu na oroshaemykh zemlyakh Nizhnego Povolzh'ya* (Minimisation of basic tillage methods for soybean on irrigated lands of the Lower Volga region), Volgograd: Volgogradskiy GAU, 2013, 101 p.
30. *Ekologicheskie trebovaniya k orosheniyu pochv Rossii* (Ecological requirements for soil irrigation in Russia), B.A. Zimivets, N.B. Khitrov (Eds), Moscow: Pochvennyy in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1996, 72 p.

31. Abdelsadek E., Elbeih S., Negm A., Coastal and landuse changes of Burullus Lake, Egypt: A comparison using Landsat and Sentinel-2 satellite images, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2022, Vol. 25, pp. 815–829, DOI: [10.1016/j.ejrs.2022.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.07.006).
32. Aslam R.W., Shu H., Tariq A., Naz I., Ahmad M.N., Quddoos A., Javid K., Mustafa F., Aeman H., Monitoring landuse change in Uchhali and Khabeki wetland lakes, Pakistan using remote sensing data, *Gondwana Research*, 2024, Vol. 129, pp. 252–267, DOI: [10.1016/j.gr.2023.12.015](https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.12.015).
33. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 234 p.
34. Kaliraj S., Chandrasekar N., Ramachandran K.K., Srinivas Y., Saravanan S., Coastal landuse and land cover change and transformations of Kanyakumari coast, India using remote sensing and GIS, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2017, Vol. 20, pp. 169–185, DOI: [10.1016/j.ejrs.2017.04.003](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.003).
35. Kundu S., Khare D., Mondal A., Landuse change impact on sub-watersheds prioritization by analytical hierarchy process (AHP), *Ecological Informatics*, 2017, Vol. 42, pp. 100–113, DOI: [10.1016/j.ecoinf.2017.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.10.007).
36. Nkiruka E.M., Chinedu A.D., Smart U.N., Landuse, landcover change dynamics and flooding in the lower Niger basin Onitsha, South Eastern Nigeria, *Land Use Policy*, 2023, Vol. 131, Paper 106748, pp. 1–14, DOI: [10.1016/j.landusepol.2023.106748](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106748).
37. Salhi A., Benabdelouahab S., Bouayad El O., Benabdelouahab T., Larifi I., El Mousaoui M., Acharrat N., Himi M., Ponsati A.S., Impacts and social implications of landuse-environment conflicts in a typical Mediterranean watershed, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 764, Paper 142853, pp. 1–16, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142853](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142853).
38. Soil survey investigations for irrigation, FAO Soils Bulletin No. 42, Rome, 1979.
39. Yao H., Characterizing landuse changes in 1990–2010 in the coastal zone of Nantong, Jiangsu province, China, *Ocean & Coastal Management*, 2013, Vol. 71, pp. 108–115, DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2012.09.007](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.09.007).

УДК 631.43

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-281-321



Ссылки для цитирования:

Клюева В.В. Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 281-321. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-281-321

Cite this article as:

Klyueva V.V., The rheometry approach in modern soil studies: a review, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 281-321, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-281-321

Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор)

© 2024 г. В. В. Клюева

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

<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vyklyueva@gmail.com.

Поступила в редакцию 22.12.2023, после доработки 13.03.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Цифровая почвенная реометрия – это активно развивающееся относительно новое перспективное направление, занимающее на данный момент небольшую долю в почвенных и агрофизических исследованиях. В работе представлен обзор применения реометрического подхода при изучении механического поведения почв в отечественных и зарубежных исследованиях. Описаны основные теоретические положения методов осцилляционной амплитудной развертки (oscillatory amplitude sweep test) и осцилляционного теста с контролируемой деформацией (oscillatory test with controlled strain, resilience test) в приложении к почвенной структуре как объекту исследований. В статье дана характеристика количественных деформационных и прочностных показателей (модуль накопления G' , диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, кривая напряжения сдвига τ , максимальное напряжение сдвига τ_{\max} , индекс восстановления структуры R и др.), описывающих механические свойства почв на микроуровне структурной организации, получаемых упомянутыми методами. Отдельно представлены технические моменты подготовки почвы к реометрическим исследованиям: влияние структуры

и влажности образцов, температуры и нормальной силы, задаваемых в протоколе исследования на реометре, на проведение испытания и получаемые данные. В статье рассмотрены направления исследований в рамках описываемого подхода, сформировавшиеся более чем за 20 лет применения реометрии в почвенных исследованиях и кратко представлены результаты работ различных авторов. На основе проведенного анализа исследовательских работ охарактеризованы направления дальнейшего развития реометрического подхода в почвенных исследованиях.

Ключевые слова: реометр; почвенная структура; механические свойства почв; деформационные и прочностные показатели почв; амплитудная развертка; тест на тиксотропию.

The rheometry approach in modern soil studies: a review

© 2024 V. V. Klyueva

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vvklyueva@gmail.com.*

Received 22.12.2023, Revised 13.03.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: Digital soil rheometry is a relatively new and rapidly developing research direction that currently occupies a small niche in soil and agrophysics studies. This paper presents a review of studies based on the rheometry approach as part of soil mechanics research in different countries. The fundamental principles and equations of oscillatory amplitude sweep tests and oscillatory tests with controlled strain (resilience test) are described, with a focus on soil structure as the main object of the study. Key deformation and strength parameters (storage and loss moduli (G' and G''), the linear viscoelasticity range (LVE-range), shear stress (τ), structural recovery index (R), etc.) describing the mechanical behavior of the soil at the microstructural level are discussed. This paper also highlights the influence of soil preparation: soil structure, water content, temperature, and the normal force applied during tests as parts of the research protocol – on the obtained results. Furthermore, this review examines research trends within the rheometry approach that have emerged over the past two decades of its application to soil studies. Based on the analysis of existing studies, potential directions for the further development of rheometry in soil research are proposed.

Keywords: digital modular compact rheometer; soil structure; soil mechanical behavior; deformation and strength soil parameters; amplitude sweep test; thixotropy (resilience) test.

ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства почвы, или набор показателей, описывающих ее деформационные и прочностные свойства под действием внешних нагрузок, относятся к одной из важных почвенных функций в экосистеме – опорной (Physical stability and support function) (Andrews et al., 2004; Rabot et al., 2018). Характеристика механической устойчивости почв важна в решении широкого ряда научных и практических вопросов: оценках противоэрозионной устойчивости почв, риска развития или наличия необратимых деформаций в почве и деградации почвенных свойств, проходимости сельскохозяйственной техники, ограничивающих и оптимальных условий обработки почвы, роста и развития семян и корневых систем растений и т. д. (Encyclopedia of agrophysics, 2011; Horn et al., 2019; Rabot et al., 2018). Одной из характеристик механических свойств (параметров) почв является мультимасштабность их проявления. На каждом следующем уровне организации почвенного покрова, от молекулярно-ионного до горизонтного (Воронин, 1984), почвенная система усложняется, приобретает новые свойства, и, как следствие, одни показатели могут характеризовать только меру вероятности агрегации частиц, например, в случае размера и формы частиц, дзета-потенциала системы, тогда как другие – непосредственно прочность (устойчивость) почвенной структуры (напряжение сдвига, угол внутреннего трения, сцепление, предкомпрессионное напряжение и т. д.) (Horn et al., 2019).

К настоящему моменту существует большое количество подходов и современных развивающихся концепций к определению структуры почвы (Качинский, 1965; Воронин, 1984; Шеин, 2005; Encyclopedia of agrophysics, 2011; Lal, 1991; Rabot et al., 2018; Vogel H.J. et al., 2021). В данной работе под структурой почвы будем понимать пространственное расположение твердых частиц и пор в масштабах до почвенного горизонта, представленное агрегатами с присущей им иерархичностью строения (Yudina, Kuzyakov, 2023). Объемность и многокомпонентность понятия

“структура почвы” определяют необходимость следующего дополнения: структура почвы характеризуется тремя основными группами параметров: морфометрическими и геометрическими, энергетическими и химическими. К первой группе относятся размер, форма, ориентация, количественное соотношение структурных единиц почвы. В группу энергетических показателей входят механическая устойчивость и водоустойчивость агрегатов, параметры, описывающие реологическое поведение, устойчивость к процессам инфильтрации, набуханию-усадке, увлажнению-высыханию, замерзанию-оттаиванию. К последней группе химических параметров относятся элементный и химический состав твердых частиц почвы.

В данной работе при характеристике показателей механической устойчивости структуры почвы на разных масштабных уровнях будут использоваться понятия микроструктура и мезоструктура почвы. Данное разделение включает в себя не только различные уровни организации почвы, но и технические особенности и возможности методов, применяющихся в исследованиях. То есть к микроуровню структуры почвы относятся уровни элементарных почвенных частиц и микроагрегатов при изучаемом объеме почвенных образцов до 10 см^3 , к мезоуровню – агрегатный и частично горизонтный масштабные уровни при объеме образца до $100\text{--}300 \text{ см}^3$ (по Holthusen et al., 2012a).

Для изучения показателей механического поведения почвы в разных масштабах существует ряд различных подходов, имеющих долгую историю применения (напр., методики ГОСТов) (ГОСТ 12248.1-2020, 2020; ГОСТ 12248.3-2020, 2020; ГОСТ 12248.4-2020, 2020), но в настоящее время появляются методы, только раскрывающие свои возможности в вопросах изучения почвы как объекта. Одним из таких методов является цифровая реометрия, изучающая устойчивость микроструктуры почвы и позволяющая получить обширный ряд количественных прочностных и деформационных показателей.

РЕОМЕТРИЯ В РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОЧВ

Реология как научная дисциплина представляет собой направление на пересечении физики и физической химии и изуча-

ет процессы деформации и течения материалов (Mezger, 2014).

Реологические исследования почв берут свое начало в реологических исследованиях грунтов, при этом вместе они являются частью большого научного направления – механики почв и грунтов (Вялов, 1978). Основные концепции и законы (уравнения, модели, представления), охватывающие реологическое поведение почв и грунтов, описаны в ряде фундаментальных отечественных и зарубежных работ (Манучаров и др., 2013; Keedweel, 1984; Mezger, 2014; Mitchell, Soga, 2005; Suklje, 1969; Tanner, 2000; Terzaghi et al., 1996; Vyalov, 1984).

Исследованиями реологического поведения и механики мерзлых и глинистых грунтов в СССР занимались Цытович (Цытович, 1940), Вялов (Вялов, 1978), Волярович (Волярович, Лазовская, 1966); Маслов (Маслов, 1968), Месчан (Месчан, 1974), Ребиндер (Ребиндер, 1979), Осипов (Осипов и др., 1989) и другие.

Развитие направления исследований реологического поведения почв в отечественной науке началось благодаря работам Аbruковой Л.П., Аbruковой В.В., Манучарова А.С. и других. В этих работах исследовались реологические кривые почв, описывался вид структурных связей между почвенными частицами (Аbruкова, 1970; Манучаров, 1983; Манучаров, Аbruкова, 1983) с применением вискозиметров Воляровича и Реотеста-2, а также конического пластометра Ребиндера (Клюева, 2019). Проявление таких явлений как тиксотропия (Аbruкова, 1970; Аbruкова, Манучаров, 1986), реопексия (Аbruкова, 1976; Аbruкова, Манучаров, 1985), дилатансия (Аbruкова, 1980) в различных типах почв обсуждалось в ряде исследований.

Современные представления о реометрическом подходе как о технической базе реологических исследований

В настоящее время для определения реологических свойств грунтов и почв: упругости, пластичности, вязкости, текучести, прочности – используются две группы приборов: вискозиметры и реометры (Mezger, 2014). Вискозиметры (современные и более старые модели, как, например, РВ-8) представляют собой приборы для определения вязкости и текучести жидкообразных тел, имеют

более простую конструкцию и низкую стоимость по сравнению с реометрами. Реометры являются более современными приборами, их функционал включает функционал вискозиметров и дополнен возможностью изучения деформационных характеристик твердых тел (т. е. реометр является вискозиметром, но не наоборот). Помимо вышеперечисленных фактов, реометры имеют возможность регуляции нормальной силы и температуры при проведении испытаний.

Согласно определению, реометрия в широком значении – это изучение реологических параметров веществ и материалов и получение количественных данных в рамках реологических исследований (Mezger, 2014). В настоящий момент в термин “реометрия” в научных статьях и практических руководствах вкладывается более узкое значение: использование определенных измерительных систем, инструментов и методов испытаний, то есть подразумевается применение именно ротационных и колебательных цифровых реометров как самостоятельного методического подхода с отделением его от вискозиметрии – подхода, использующего вискозиметры. Для определения вязких свойств материалов проводятся ротационные испытания (rotational tests), для оценки вязкоупругих свойств – испытания на ползучесть (creep tests), испытания на релаксацию (relaxation tests) и колебательные (осцилляционные) испытания (oscillatory tests) (Mezger, 2014; Шрамм, 2003). Технический прогресс и конкуренция на рынке промышленного и лабораторного оборудования привели к появлению широкого ряда цифровых высокоточных реометров разных производителей (напр., фирм Anton Paar (Австрия), Thermo Fisher Scientific (Германия), Brookfield Ametek (США) и т. д.). Существующие в настоящий момент реометры продолжают увеличивать точность, масштаб и объем планируемых исследований благодаря постоянному улучшению своих технических характеристик и возможности дополнительной комплектации специальными аксессуарами и функциями (напр., динамический механический анализ, реология растяжения, реооптика и т. д.), что приводит к появлению поколений (линеек) приборов, адаптированных под задачи различного уровня сложности (напр., <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302->

[502/?sku=241353](#)).

Развитие реометрии в почвенных исследованиях

Базовыми областями применения реометрии являются химическая и нефтехимическая, пищевая промышленности, а также промышленность строительных материалов (Mezger, 2014).

Широкое применение современной реометрической техники для изучения почв было начато в начале 2000-х годов с исследовательской работы Ghezzehei и Or (Ghezzehei, Or, 2001). В данном исследовании изучалось реологическое поведение почв и глин с использованием ротационного реометра с измерительной системой параллельных пластин при постоянной и осцилляционной нагрузке, имитирующей деформации в почве, вызываемые капиллярными силами, нагрузкой вышележащих почвенных горизонтов или проходом сельскохозяйственной техники, соответственно.

Отметим, что блок исследований в области почвенной реометрии был изначально связан с изучением реологического поведения отдельных типов почв (напр., Хайдапова и др., 2016; Холопов и др., 2018; Markgraf et al., 2006; Pertile et al., 2016). В последние годы направление расширилось и продолжает развиваться благодаря методическим работам, а также комплексным или сопряженным с другими подходами и методами исследованиям (Horn et al., 2019; Hosseinpour-Ashenaabad et al., 2022). Выделяются научные группы исследователей Германии, Бразилии и России, работающие в области почвенной реометрии.

Основные теоретические положения реологических исследований почв с использованием реометрического подхода были подробно описаны в ряде работ (Baumgarten, Horn, 2013; Markgraf et al., 2006). Более детальный обзор методических особенностей реометрии представлен в следующих главах данной статьи.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В ПОЧВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Показатели механической устойчивости почвенной структуры

Общие положения

Теоретические положения реометрии базируются на физических законах. Введем в кратком виде некоторые понятия и определения. Деформация – это изменение относительного положения частиц тела, связанное с их перемещением, но без разрыва сплошности. Деформация называется упругой (обратимой: elastic, reversible), если она исчезает при удалении вызывающей ее нагрузки, и пластической (необратимой: plastic, irreversible), если после снятия нагрузки, она не исчезает. При постоянной нагрузке идеально упругое тело деформируется немедленно и остается деформированным до тех пор, пока прилагается нагрузка. После ее снятия возникшая ранее деформация сразу и полностью исчезает, т. е. после цикла нагрузки идеально упругий материал полностью возвращается в исходное состояние. Упругость как свойство сохраняется у реальных тел до определенного момента или предела нагрузки – предела упругости. После его достижения в теле начинают проявляться остаточные или пластические изменения формы (деформации), которые не исчезают с течением времени при удалении нагрузки. Если после области упругого поведения реальное тело разрушается, то считается, что тело обладает хрупким разрушением, если же тело проявляет признаки текучести, то в данном случае можно говорить о пластическом разрушении. Пластическими телами называются тела с выраженными остаточными деформациями или пластичностью (Теория и методы физики почв, 2007; Шрамм, 2003; Das, 2008; Mezger, 2014).

Методы в реометрическом подходе

Одними из самых распространенных методов для оценки микромеханического поведения почв в реометрическом подходе на настоящий момент являются осцилляционный тест амплитудной развертки (amplitude sweep tests) (Horn et al., 2019) и испытания на тиксотропию (resilience (thixotropy) tests) (Batistão et al., 2020).

1. Осцилляционная амплитудная развертка (oscillatory amplitude sweep test–AST).

Данный метод предполагает внешнюю нагрузку в виде осцилляционного сдвига на почвенный образец, находящийся между параллельными плато (рис. 1).

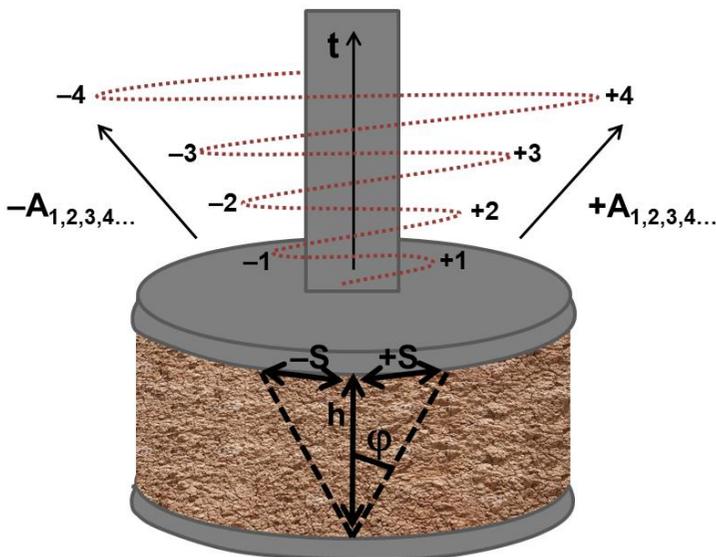


Рис. 1. Схематическое изображение осцилляционного амплитудного теста: верхнее и нижнее плато обозначены серым, почва – коричневым цветом. Верхнее плато движется с увеличивающейся амплитудой колебаний A в осцилляционном режиме (попеременно в левую и правую стороны, $+1$ и -1 и т. д. – равные положительные и отрицательные амплитуды), вызывая соответствующие отклонения $\pm s$ образца с углом отклонения $\pm\phi$ в зазоре h (по Mezger, 2014; Pértile et al., 2018).

Fig. 1. Scheme of the oscillatory amplitude sweep test: the upper and lower plates are indicated in gray, the soil is indicated in brown. The upper plate is rotated with an increasing oscillatory amplitude A (alternately to the left and right sides, $+1$ and -1 , etc. are equal positive and negative amplitudes), causing corresponding deflection distances $\pm s$ of the sample with a deflection angles $\pm\phi$ in the gap h (adapted from Mezger, 2014; Pértile et al., 2018).

Необходимо отметить, что точное определение реологических параметров возможно только при определенных условиях сдвига: однородной деформации образца и наличия сцепления его поверхностей с нижним и верхним плато без эффектов “проскальзывания”. Поэтому очень важны пробоподготовка образца и тщательный подбор измерительной системы для определенного объекта исследования. В случае почвенных образцов первое касается соблюдения аккуратности при просеивании и (или) растирании, то есть гомогенизации образца, а также при подготовке насыпного образца с задаваемой плотностью, а второе – применения шероховатой измерительной системы с засечками (рис. 1) (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014).

На рисунке 1 показан принцип AST метода. Верхнее плато работает в осцилляционном режиме испытания, что приводит к увеличивающемуся положительному и отрицательному отклонению почвенного образца относительно положения в нулевой момент времени в зазоре между верхним и нижним плато реометра. Поведение идеально упругих тел (или поведение тел в области упругих деформаций) при деформации сдвига традиционно объясняется законом Гука: деформация (угол сдвига) пропорциональна касательному напряжению, приложенному к телу:

$$\tau(t) = G^* * \gamma(t),$$

где γ – деформация сдвига, G^* – комплексный модуль сдвига при осцилляционном сдвиге, τ – напряжение сдвига.

Закон Ньютона характеризует поведение идеально вязких тел: касательное напряжение, возникающее между соседними слоями при течении жидкости пропорционально поперечному градиенту скорости (скорости сдвига):

$$\tau(t) = \eta^* * \dot{\gamma}(t),$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации сдвига (dv/dh), η^* – комплексная динамическая вязкость, τ – напряжение сдвига.

Описанные выше модели поведения относятся к поведению идеальных тел. Почва как природный объект обладает признаками как упругого, так и вязкого поведения, характеризуемого в общем

как вязкоупругое. Моделями, описывающими подобное поведение, являются, в частности, модели Максвелла и Кельвина–Войта.

Одним из широко распространенных протоколов АСТ теста является режим с установленными значениями деформации сдвига γ (controlled shear deformation). В данном случае напряжение сдвига τ и комплексный модуль сдвига G^* – это расчетные показатели первой очереди, вычисляемые из значений угла сдвига δ и крутящего момента.

Поскольку для идеально упругих тел комплексный модуль сдвига $G^* = \tau(t)/\gamma(t)$ является постоянной величиной, кривая напряжения сдвига $\tau(t)$ всегда находится “в фазе” с кривой деформации $\gamma(t)$, т. е. обе синусоидальные кривые регистрируются реометром без задержки между заданным значением и реальным откликом образца в виде синусоид. Эти кривые переходят через нулевые значения в одинаковые моменты времени (между данными кривыми нет фазового сдвига ($\delta = 0^\circ$)). При этом вид кривой – синусоида или косинусоида – для кривых напряжения сдвига, деформации и скорости деформации связан с особенностями движения верхнего плато и отклика образца в осцилляционном режиме (Mezger, 2014).

Для идеально вязких тел комплексная вязкость $\eta^* = \tau(t)/\dot{\gamma}(t)$ является константой, и кривая напряжения сдвига $\tau(t)$ всегда находится “в фазе” с кривой скорости деформации $\dot{\gamma}(t)$, эти косинусоидальные кривые регистрируются реометром без задержки между заданными и реальными значениями. Для идеально вязкого поведения характерна задержка между косинусоидальной кривой напряжения сдвига τ и синусоидальной кривой деформации γ при угле фазового сдвига $\delta = 90^\circ$.

Рисунок 2 отображает результирующую синусоидальную кривую поведения (напряжение сдвига $\tau(t)$) реального вязкоупругого тела $\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega t + \delta)$, где ω – угловая частота. В данном случае фазовый угол сдвига δ описывается значениями от 0 до 90° (рис. 2) (детали метода можно найти в Клюева, 2019; Хайдапова и др., 2016; Baumgarten, Horn, 2013; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

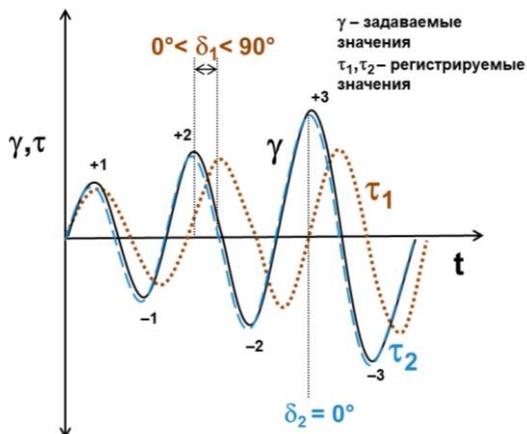


Рис. 2. Схематическое изображение поведения различных тел в осцилляционном амплитудном тесте (по Mezger, 2014; Pértile et al., 2018). Вязкоупругое тело (почва): угол сдвига δ_1 между задаваемой кривой γ (черный цвет) и результирующей кривой τ_1 (коричневый цвет) равен $0^\circ < \delta_1 < 90^\circ$; идеально упругое тело (модель): регистрируемая кривая τ_2 (голубой цвет), угол сдвига $\delta_2 = 0^\circ$.

Fig. 2. Scheme of the behavior of various bodies in the oscillatory amplitude sweep test (adapted from Mezger, 2014; Pértile et al., 2018). Viscoelastic body (soil): the shift angle δ_1 between the given curve γ (black color) and the resulting curve τ_1 (brown color) is $0^\circ < \delta_1 < 90^\circ$; ideally elastic body (model): resulting curve τ_2 (light blue color), shift angle $\delta_2 = 0^\circ$.

Следует подробно рассмотреть физическое значение модулей накопления G' и потерь G'' , являющихся расчетными показателями второй очереди при расшифровке реометрических данных.

Упругий компонент вязкоупругого поведения характеризуется значениями *модуля накопления* G' . Данная составляющая представляет собой энергию, сохраненную в объекте во время осцилляционного теста, которая после прекращения нагрузки служит для восстановления почвенной структуры.

Аналогичным образом вязкий компонент вязкоупругого поведения реальных тел характеризуется значениями *модуля потерь*

G'' . Он представляет собой рассеянную (перешедшую в тепло), то есть потерянную на процессы перестроения элементов структуры энергию деформации. Благодаря рассеянию части энергии деформации происходит сдвиг в структуре почвенного образца.

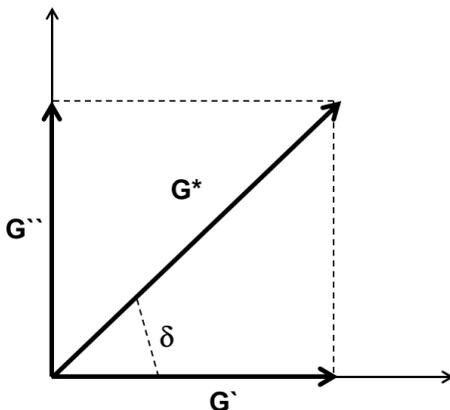


Рис. 3. Графическое представление комплексного модуля сдвига G^* и его составляющих: модулей накопления G' и потерь G'' (по Mezger, 2014).

Fig. 3. Vector diagram of the complex shear modulus G^* , storage modulus G' and loss modulus G'' (according to Mezger, 2014).

На рисунке 3 представлено геометрическое соотношение компонентов вязкоупругого поведения: упругого компонента как модуля накопления G' ($G' = G^* \cdot \cos\delta = (\tau/\gamma) \cdot \cos\delta$) и модуля потерь G'' как вязкого компонента ($G'' = G^* \cdot \sin\delta = (\tau/\gamma) \cdot \sin\delta$).

Также иногда модуль накопления G' называют реальной частью, а модуль потерь – мнимой частью комплексного модуля сдвига G^* .

Стоит отметить, что во избежание путаницы в употреблении терминов, вернее использовать понятия “модули накопления и потерь”, а не “модули упругости и вязкости”, так как обе величины G' и G'' представляют собой части комплексного модуля сдви-

га G^* (модуля упругости второго рода) (Клюева, 2019; Mezger, 2014).

Поведение почвенной микроструктуры в осцилляционном амплитудном тесте делится на несколько фаз. На рисунке 4 представлены кривые модулей накопления и потерь, напряжения сдвига и характеризующие их области показатели. В графическом представлении результатов оси X и Y приводятся в логарифмическом формате, по причине того, что данный способ дает возможность детально анализировать области кривых с небольшими значениями деформации γ .

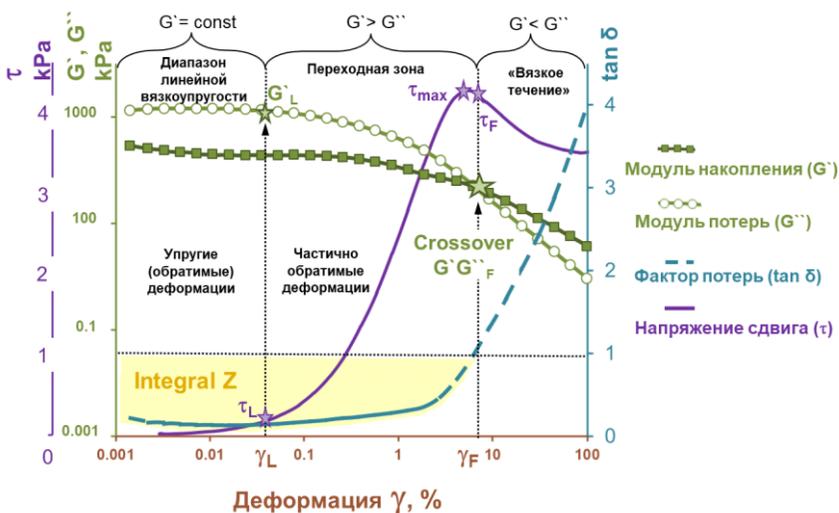


Рис. 4. Типичное представление результатов осцилляционного амплитудного теста для почвы: кривые модулей накопления G' и потерь G'' , напряжения сдвига τ , коэффициента потерь $\tan \delta$ и интегральная зона Z (оси x и y представлены в логарифмических шкалах), (по материалам Клюева, Хайдапова, 2020; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

Fig. 4. Results of the oscillatory amplitude test of the soil: curves of storage modulus G' and loss modulus G'' , shear stress τ , loss factor $\tan \delta$, and Integral Z (x and y axes are in logarithmic scales) (according to Klyueva, Khaidapova, 2020; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

Область 1 (рис. 4) – *диапазон линейной вязкоупругости или зона упругих деформаций (linear viscoelastic range, LVE-range)* – это область деформаций образца с практически параллельным ходом кривых модулей накопления G' и потерь G'' , ограничиваемая точкой текучести γ_L (yield point). Модуль накопления в данном диапазоне значительно больше модуля потерь. В пределах диапазона деформаций, не превышающих линейной вязкоупругости, электростатические силы между почвенными частицами служат движущей силой для их возвращения в начальное положение после снятия нагрузки, поэтому структура почвы не нарушается (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Holthusen et al., 2019; Mezger, 2014).

Диапазон линейной вязкоупругости может быть описан несколькими показателями: координатами точки текучести (значением деформации γ_L и модуля накопления G'_L) и напряжением сдвига τ_L на кривой напряжения сдвига, соответствующим точке текучести. Другими словами, описанные выше показатели характеризуют расстояние обратимого о смещения частиц в объеме почвы в измерении, величину упругости (жесткости) контактов между почвенными частицами и меру поведения образца (сдвиговую устойчивость) при упругих деформациях, соответственно.

Область 2 (yield/flow transition range) – это диапазон пластических (необратимых) деформаций от точки текучести до пересечения модулей накопления и потерь в точке Crossover (flow point). В данной области почвенная структура накапливает пластические деформации, но еще не наблюдается окончательного разрушения связей между почвенными частицами. Поведение почвы можно охарактеризовать как вязкоупругое в области 2.

Отдельно отметим разницу в характеризующих кривую модуля накопления G' точках yield point (максимальная величина упругой деформации) и flow point (Crossover): эти термины соответствуют понятиям “точка (предел) текучести” и “точка (вязкого) течения” в русском языке.

Область 3 (range of microstructural breakdown) – это область “вязкого течения” (вязкого поведения) при деформациях, превышающих таковые в точке Crossover (пересечения модулей накопления и потерь). В данной области практически полностью

разрушены структурные связи между частицами, ориентация частиц внутри системы завершена.

Количественно протяженность области пластических деформаций и вязкого течения описываются координатами точки Crossover (значением деформации γ_F и модулей накопления и потерь $G'G''_F$), также напряжением сдвига τ_F кривой напряжения сдвига, соответствующего точке начала вязкого течения. Данные параметры характеризуют суммарный интервал упругих и пластических деформаций, меру упругого и вязкого поведения и сдвиговую устойчивость почвы в точке начала вязкого течения, соответственно (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014).

Коэффициент потерь (затухания) рассчитывается как отношение потерянной и запасенной энергии деформации: $\tan\delta = G''/G'$. Он показывает соотношение вязкой и упругой частей вязкоупругого деформационного поведения. В точке пересечения кривых модулей накопления и потерь вязкая и упругая составляющая вязкоупругого поведения становятся количественно равными, т. е. $G' = G''$, при этом $\tan\delta = 1$ или $\delta = 45^\circ$.

Интегральная зона (Integral Z) характеризует совокупно диапазон линейной вязкоупругости и область пластических деформаций и физически представляет собой площадь фигуры над кривой $\tan\delta$, ограничиваемую сверху прямой $\tan\delta = 1$ (рис. 4).

Значения величины напряжения сдвига в характерных точках его кривой τ_F , τ_L , τ_{\max} (рис. 4) описывают поведение структуры под действием осцилляционного сдвига. Хрупкость – способность структуры разрушаться без проявления значимого количества пластических или остаточных деформаций, т. е. это свойство обратнo пластичности. В рамках осцилляционного теста полуколичественно оценить проявление хрупкости и пластичности возможно с помощью отношения значений напряжений сдвига, соответствующих точкам Crossover и концу диапазона упругой деформации (LVE-range), т. е. τ_F/τ_L (также в литературе: *flow transition index или показатель перехода*). Чем ближе значение данного показателя к единице, тем больше проявление хрупкого поведения структуры почв под действием внешней осцилляционной нагрузки (Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014). Ход кривой τ описывает поведение образца при сдвиге: хрупкое разрушение отмечается

при наличии выраженного максимума значений напряжения сдвига (с возможным частичным или полным восстановлением структуры после) либо пластическое разрушение при выходе значений кривой на плато (Holthusen et al., 2017).

Важной точкой кривой напряжения сдвига является *максимальное напряжение сдвига* τ_{max} , соответствующее максимальной сдвиговой устойчивости (прочности) микроструктуры почвы.

2. Осцилляционный тест с контролируемой деформацией (oscillatory test with controlled strain) для изучения тиксотропных свойств почв.

Тиксотропное поведение почвенной структуры означает снижение ее прочности во время сдвиговой нагрузки и более или менее быстрое, но полное или частичное структурное восстановление в последующий период (rest period). При этом цикл нарушения и восстановления структуры (оцениваемый значениями вязкости, модуля накопления, напряжения сдвига) является обратимым процессом.

Деформационное поведение почвенной структуры может считаться тиксотропным только при обязательном изучении полного цикла поведения: и уменьшения, и последующего восстановления прочности (нарушения и восстановления структуры), а также задании постоянной сдвиговой деформации в каждом из интервалов испытаний (Mezger, 2014).

Для подобных измерений и оценки потенциальной восстанавливаемости почвенной микроструктуры в дизайне эксперимента задаются три интервала (рис. 5):

Контрольный интервал 1. Эта область t_0-t_1 является диапазоном низких значений сдвига или деформации. Задачей установления данного интервала в эксперименте является достижение постоянного значения базового реологического параметра как некоторого референсного значения. Данное значение будет использоваться для сравнения со значениями реологического параметра, полученными в Интервале 3 измерений, описывающего степень восстановления структуры. Деформация в данном интервале задается меньше значения деформации, ограничивающего диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, определяемого в осцилляционном методе амплитудной развертки AST ($\gamma_0 < \gamma_L$).

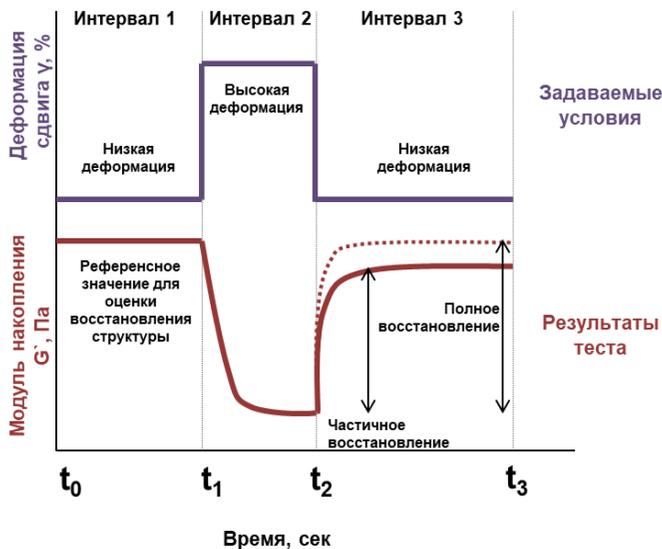


Рис. 5. Схематичное изображение эксперимента по изучению тиксотропных свойств почвы: задаваемые условия с тремя интервалами деформации сдвига γ (фиолетовая кривая); результаты теста на примере модуля накопления G' для оценки восстановления структуры (%) образца (красный цвет) (по Mezger, 2014; Batistão et al., 2020).

Fig. 5. Scheme of an experiment to study the soil thixotropic properties: preset three intervals of shear deformation γ (purple curve); test results by the example of the storage modulus G' to estimate the recovery (%) of the sample structure (red color) (adapted from Mezger, 2014; Batistão et al., 2020).

Интервал 2 – высокие значения сдвига или деформации образца. Данный интервал, охватывающий область поведения t_1 – t_2 , используется для моделирования интенсивных воздействий на почвенный образец и нарушения его структуры. Задаваемая деформация сдвига здесь должна соответствовать значению: $\gamma_0 < \gamma_1$. При этом степень восстановления структуры почвенного образца будет уменьшаться в ряду $\gamma_1 = \tau_{\max} > \gamma_1 = \tau_F$ (деформация при неполном разрушении структурных связей, т. е. ниже или равная предельному значению сдвиговой устойчивости микроструктуры

к осцилляционному воздействию в первом случае и напряжению сдвига в точке Crossover – во втором).

Интервал 3 – восстановление почвенной структуры в диапазоне условий t_2 – t_3 . В данном интервале повторно задаются условия Интервала 1, т. е. деформация Интервала 1 ($\gamma_2 = \gamma_0$).

Показателем, оценивающим восстановление микроструктуры почвы, является *индекс восстановления R (%)* или отношение модуля накопления в каждом временном промежутке Интервала 3 к среднему значению модуля накопления в интервале 1:

$$R(\%) = \frac{G_{t_2+i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{t_1} G_i} * 100,$$

где G – модуль накопления (Па), t_1 – t_2 – длительность диапазона высокой деформации (Batistão et al., 2020; Mezger, 2014).

Реометрические показатели и традиционные физико-механические параметры почвы

Под пластичностью грунта и почвы понимается способность деформироваться без разрыва своей сплошности и сохранять приобретенную форму после удаления внешней нагрузки, т. е. способность проявлять в основном остаточные (пластические) деформации (Сергеев и др., 1971; Трофимов и др., 2005). Пластичность как свойство проявляется в почве в определенном диапазоне содержания влаги: между влажностями, соответствующими переходу из полутвердой консистенции в пластичную (нижний *предел пластичности (plastic limit, PP)*) и из пластичной в текучую (верхний предел пластичности или *предел текучести (liquid limit, LL)*).

Широко используемые методы определения пределов пластичности и текучести (пределов Аттерберга) (ГОСТ 5180-2015; ISO 17892-12:2018) относятся к косвенным методам характеристики пластичности почв, то есть они позволяют получить только диапазон влажности, в котором почва проявляет пластичность.

Прямые же методы изучения пластичности напрямую оценивают наличие и величину пластических деформаций, присущих почве в различных условиях эксперимента (Сергеев и др., 1971). К последним методам, в частности, относятся и реометрические ме-

тоды, применяющиеся при условии поддержания постоянной влажности почвенных образцов во время теста. Реометрический метод осцилляционной амплитудной развертки, к примеру, позволяет количественно оценить изменение области пластических деформаций (деформации γ_L (диапазон LVE-range) и γ_F (точка Crossover) – выше) для разных внешних нагрузок, но одинаковой влажности нескольких групп сравниваемых почвенных образцов.

Подытоживая, можно сказать, что пределы пластичности и текучести по Аттербергу и реометрические показатели диапазона линейного вязкоупругого поведения LVE-range и точки вязкого течения (Crossover) характеризуют изменение механического поведения почвы при разных условиях: ее влажности в первом случае и увеличивающейся внешней нагрузки (нормальной силы и сдвига) во втором случае, соответственно. В работе Pértile с соавт. (Pértile et al., 2016) была предпринята попытка исследования пластичности почв как с помощью косвенных, так и прямых методов исследований: корреляционного анализа взаимосвязи между пределами текучести, пластичности и индексом пластичности и реометрическими показателями в осцилляционной амплитудной развертке.

Подготовка почвенных образцов для реометрических исследований

В рамках данной статьи для более полной характеристики реометрического направления в почвенных исследованиях отдельное внимание стоит уделить также методической стороне подхода: вопросам подготовки образцов и техническим деталям протокола исследования, так как они оказывают большое влияние на адекватность получаемых данных и возможность их последующей интерпретации, сравнения и использования (Holthusen et al., 2019; Horn et al., 2019; Markgraf, Horn, Peth, 2006; Mezger, 2014). Кратко опишем основные пункты: параметры почвенного образца (вид структурных связей и влажность) и задаваемые прибором параметры (внешняя нагрузка и температура).

Вид структурных связей. Различные типы почвенных образцов могут быть использованы в реометрических исследовани-

ях: образцы с нарушенной (просеянные) и с естественной структурой (монолиты) (Хитров, Хайдапова, 2019; Holthusen et al., 2019). При исследовании почвы с нарушенной структурой (т. е. почвенных суспензий или паст) в дизайне эксперимента большинства работ применяется растирание резиновым пестиком и используются сита ≤ 2 мм для просеивания (напр., <0.25 мм – Хайдапова и др., 2016; <0.5 мм – Holthusen et al., 2020a; <1 мм – Ключева, Хайдапова, 2017; <2 мм – Holthusen et al., 2020b). Преимуществом такого подхода является относительная простота манипуляций при подготовке почвы для анализа. Однако недостатком данного способа подготовки можно назвать необходимость ручного задания плотности образца в специальном кольце или цилиндре перед его насыщением (напр., Pertile et al., 2018). В этом случае при интерпретации получаемых величин реологических показателей речь идет о приблизительной оценке реологического поведения почвенного горизонта в пределах исследуемого объема почвенного образца относительно измерительного плато реометра. При анализе почвенного образца с естественной структурой получаемые результаты более приближены к реальному поведению почвы в полевых условиях. Однако отбор монолитного образца, равномерность и время насыщения, а также аккуратность при вырезании итогового образца под размеры измерительного плато реометра могут вызывать сложности на различных этапах эксперимента (Ключева, 2019).

Влажность образца. Во многих исследовательских работах показано, что влажность почвы играет первостепенную роль в изменении ее реологического поведения (Czibulya et al., 2010; Das, 2013; Encyclopedia of agrophysics, 2011; Ghezzehei, Or, 2001; Markgraf et al., 2006). Итоговая влажность (потенциал почвенной влаги) образцов определяются задачами исследования и обеспечиваются использованием тензиостатических установок (Pertile et al., 2016) или капиллярным насыщением дистиллированной водой в течение 24, 48 часов и т. д. (Холопов и др., 2018).

Температура. Исследования реологических параметров почвенных образцов ведутся при постоянных температурах (20 °C согласно протоколу по Markgraf et al., 2006), поддержание которых обеспечивается работой элементов Пельтье реометра.

Внешняя нагрузка во время теста. Нормальная сила F_n воздействия верхнего плато реометра на почвенный образец во время его сжатия для достижения зазора h (толщины) напрямую влияет на значения реологических показателей: при увеличении нормальной силы и соответствующего ей сжимающего давления σ_N наблюдается (не)линейное увеличение значений диапазона линейной вязкоупругости LVE-range (модуля накопления G'_L и деформации γ_L), максимального напряжения сдвига τ_{max} и интегральной зоны I_z (Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Holthusen et al., 2020). В исследованиях было показано, что оптимальной силой воздействия верхнего плато на почвенный образец являются значения 10–12 Н при диаметре плато 25 мм (Markgraf et al., 2012; Markgraf et al., 2006; Pértile et al., 2016).

СОВРЕМЕННЫЕ РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Почвенная реометрия как направление, изучающее устойчивость почвенной микроструктуры, начало развиваться в России и за рубежом с выходом поисковой работы Ghezzehei и Or (Ghezzehei, Or, 2001), посвященной изучению реологического поведения ряда глин и почв. По прошествии более чем двух десятилетий можно выделить несколько направлений актуальных реометрических исследований.

Первое направление связано с изучением роли различных агрегирующих и диспергирующих факторов (например, вещественного состава: содержания органического и неорганического углерода, солей и т. д., минералогического и гранулометрического состава) в изменении устойчивости микроструктуры почв. Далее кратко приведем некоторые выявленные в исследованиях примеры влияния указанных факторов. Так, было показано значительное влияние содержания органического и неорганического углерода на увеличение областей упругих и необратимых деформаций, максимального напряжения сдвига (Хайдапова и др., 2016; Markgraf et al., 2012; Batistao et al., 2020). При этом отмечается, что содержание органического вещества является одним из главных химиче-

ских свойств почв, влияющих на устойчивость их структуры (Markgraf et al., 2012). Однако в частных случаях, например, в почвах с большим содержанием соединений алюминия и железа (оксосолях) гидроксиды железа и алюминия могут оказывать большее влияние на увеличение устойчивости почвенной структуры, чем органическое вещество (Markgraf, Horn, 2007). Кальций и натрий в составе почвенного поглощающего комплекса имеют агрегирующий и диспергирующий эффект, соответственно, что было показано на примере увеличения и снижения значений деформации диапазона упругого поведения (Markgraf et al., 2006; Markgraf, Horn, 2006). В нескольких работах показано, что такие факторы, как преобладание илистой фракции, по сравнению с пылевой (<0.002 и 0.002–0.05 мм, соответственно), в составе гранулометрических фракций почвы, а также значимое содержание смектита в минералогическом составе, приводят к увеличению диапазонов упругого и пластичного поведения (Holthusen et al., 2017; Markgraf, Horn, 2006; Markgraf et al., 2006).

Изучение роли биологического фактора в устойчивости почв выделяется как отдельное, на настоящий момент небольшое, направление исследований с применением реометрии. Так, экссудаты грибов и растений могут изменять вязкость почвенных суспензий в модельных экспериментах, что приводит к изменению величин сцепления между почвенными частицами и агрегатами (Barré, Hallett, 2009; Naveed et al., 2017; Tarchitzky, Chen, 2002).

Другим направлением исследований является изучение влияния сельскохозяйственной деятельности человека на устойчивость почвенной микроструктуры, например, при использовании удобрений и при разных типах землепользования. Так, в полевом опыте Ротамстедской станции были сравнены варианты с многолетним внесением навоза и нитратных удобрений и выявлена большая устойчивость микроструктуры почвы в первом случае, что, по мнению авторов, связано с накоплением органического углерода (Markgraf et al., 2010). Применение же калийных удобрений на почвах имеет неоднозначный эффект на изменение диапазона линейной вязкоупругости и пластичного поведения, по результатам реометрических исследований (Holthusen et al., 2012a,b), и зависит от физико-химических свойств и минералогического

состава отдельной почвы. Тип землепользования оказывает влияние на параметры устойчивости почвенной структуры, но опосредованно, через совокупность изменения сразу нескольких химических и физических свойств почвы, например, плотности сложения, т. е. увеличения числа контактов между почвенными частицами, содержания органического вещества и т. д. В данном случае требуется выявление взаимосвязанных факторов и большая детальность при интерпретации результатов (Baumgarten et al., 2013; Markgraf et al., 2012).

Следующим отдельным направлением являются исследовательские работы по изучению прочностных и деформационных характеристик отдельных специфичных почвенных объектов для характеристики их физико-механических свойств. Например, были изучены тиксотропные почвы северо-востока России: выявлено, что ведущими факторами, оказывающими влияние на их реологическое поведение, являются содержание органического углерода и органо-минеральных веществ, а также илистой фракции. Указанная совокупность факторов проявляется в цементации почвенных частиц и формировании прочных межчастичных контактов (Хайдапова и др., 2014, Холопов и др., 2018). В работе Baumgarten с соавт. (Baumgarten, Dörner, Horn, 2013) были исследованы андосоли (Andosols) северного Чили: комплексно изучалось влияние минералогического состава и сельскохозяйственной нагрузки (выпаса скота) на сдвиговое поведение (кривая напряжения сдвига τ) и интегральную зону (Integral Z) почв. В качестве специфичных и редких объектов изучались почвы terra preta в Бразилии: их деформационные характеристики и тиксотропное поведение (Batistão et al., 2020). В исследовании антарктических почв (Batista et al., 2022) были воссозданы типичные условия циклов промерзания и оттаивания для данных почв и получены предварительные результаты влияния частоты промерзания на реологические параметры.

Оригинальное исследование с применением реометрии было проведено на почвах Бразилии (Sobucki et al., 2022). В ходе него изучалась возможность использования реометрических показателей в качестве количественных индикаторов проявления макропризнака – связности структуры (cohesiveness), являющейся важ-

ным диагностическим признаком, проявляющейся в полевых условиях и влияющей на возможность обработки почвы сельскохозяйственной техникой.

Отдельное методическое направление исследований – работы, изучающие влияние разных технических аспектов на результаты реометрических исследований. Так, в ряде работ (Клюева, Хайдапова, 2017; Клюева, Хайдапова, 2020; Хитров, Хайдапова, 2019; Holthusen et al., 2012b; Holthusen et al., 2019) сравнивалось реологическое поведение почв с нарушенной и ненарушенной структурой (пасты и микромонолитные образцы). На данный момент большинство исследовательских работ, использующих осцилляционный метод амплитудной развертки, проводится по протоколу, предложенному Markgraf с соавторами (Markgraf et al., 2006). В работе Holthusen с соавт. (Holthusen et al., 2020b) впервые в рамках реометрического подхода изучалось влияние различных частот осцилляционных колебаний на изменение реологических параметров почв на примере оксисолой Бразилии по сравнению с типичной частотой протокола (0.5 Гц). В ряде работ (Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Holthusen et al., 2020) исследовано влияние силы воздействия верхнего плато (нормальной силы F_n), контролирующей степень предварительного сжатия почвы для достижения заданного зазора между плато (т. е. толщины образца, в большинстве работ равной 4 мм) и влекущей за собой изменение значений реологических показателей почвы (см. выше).

Закономерным развитием описанных выше реометрических направлений и отдельных исследований из области, находящейся на экстенсивном этапе накопления новой информации и данных по различным почвенным объектам, является ее переход на интенсивный этап, т.е. поиск возможностей использования возможностей данного подхода для решения различных задач. На данный момент среди таких практических направлений отчетливо выделяются следующие: изучение структуры почв, процессов структурообразования и комплексная оценка механических свойств почв.

Например, впервые была предложена (Baumgarten, Horn, 2013) классификация устойчивости почвенной микроструктуры, основанная на пяти численных классах значений комплексного показателя Integral Z, описывающего суммарно области упругих и

пластических деформаций в методе осцилляционной амплитудной развертки.

Как было отмечено выше, реологические показатели, оцениваемые в том числе с помощью реометрического подхода, зависят одновременно от широкого ряда факторов: физических и химических свойств почв. В связи с этим в исследовательских работах последних лет начался поиск способов обобщающей оценки влияния разных факторов на сдвиговые и деформационные показатели микроструктуры почвы. Так, на большом массиве реометрических данных был применен подход педотрансферных функций для количественной оценки устойчивости почвенной микроструктуры на примере показателя Integral Z (microstructural stiffness) при имеющемся блоке данных по содержанию органического и неорганического углерода, железа, натрия, кальция и проч. для различных текстурных групп почв устья р. Эльбы (Stoppe, Horn, 2018).

Однако слабой стороной описанных выше исследований интегральной зоны почв, не позволяющей полноценно применить предложенные авторами подходы, является тот факт, что в работах анализировался массив данных ограниченного числа почв (на территории Великобритании, Испании, Германии, Чили).

Другим направлением возможных практических приложений реометрических исследований является их использование при комплексной оценке механических свойств почв различными методами и на нескольких структурных уровнях. Сама необходимость такой многоуровневой оценки в будущих исследованиях механических свойств почв неоднократно была аргументирована рядом авторов (Ajayi, Horn, 2017; Ajayi, Holthusen, Horn, 2016; Horn et al., 2019). Так, на примере почвенных паст с различной влажностью впервые проведено сравнение реометрического метода и метода сферического индентирования при оценке механических свойств почв на микроуровне (Hosseinpour-Ashenaabad et al., 2022).

Стоит отдельно отметить предложенную концепцию многоуровневой оценки деформационных и прочностных характеристик почв набором методов, охватывающих возможности изучения агрегации частиц и устойчивости структуры почв на усложняющихся уровнях организации (коллоидном – элементарных

почвенных частиц – агрегатном) и соответствующий ряд количественных и качественных параметров (Baumgarten, Horn, 2013; Horn et al., 2019). В рамках данной концепции среди прочего была показана взаимосвязь максимальной сдвиговой устойчивости τ_{\max} , как прочности микроструктуры почвы, определенной реометрически, с показателем сжимаемости почвы C , полученным в методе циклических компрессионных нагрузок (т. е. микро- и мезоуровень почвенной структуры, соответственно) (Holthusen et al., 2012a).

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Цифровая почвенная реометрия – это активно развивающееся относительно новое направление, занимающее на данный момент небольшую долю в общем числе почвенных и агрофизических исследований. Современные реометры позволяют с большой производительностью изучать широкий ряд количественных деформационных и прочностных показателей, описывающих микроуровень структуры почвы. В настоящее время реометрический подход планомерно переходит от этапа накопления информации при изучении реологических свойств почв к поиску возможностей использования получаемых данных для решения различных научных и практических задач.

Основываясь на имеющихся исследовательских работах в рамках современных тенденций развития научных исследований можно выделить несколько очевидных направлений дальнейшего развития реометрического подхода в почвенных исследованиях (безусловно, предложенные авторами ниже направления не являются исчерпывающими).

“Наполнение” подхода экспериментальными данными.

Это направление, являющееся основой для развития всех остальных, может быть охарактеризовано несколькими пунктами. Во-первых, вследствие небольшого абсолютного количества исследовательских работ в области реометрии остается насущным вопрос получения экспериментальных данных для разных типов ранее неисследованных почв. Во-вторых, существующее многообразие

внешней нагрузки на почву антропогенного и естественного характера делает необходимым воспроизведение данных условий в лабораторных экспериментах при исследовании их влияния на параметры структурной устойчивости почв. Технические возможности современного оборудования позволяют находить оптимальные параметры реометрического эксперимента (напр., диапазоны воздействующей нормальной силы и частоты осцилляции, время воздействия и т. д.), моделирующие частные ситуации. В-третьих, актуальной задачей остается определение основных физических, химических и биологических факторов, влияющих на устойчивость структуры разных почв в отдельных случаях, в том числе при сельскохозяйственном воздействии.

Совместные исследования. Различные методы изучения почвенной структуры (компьютерная микротомография, сканирующая электронная микроскопия и т. д.) позволят совместно с реометрией получить новые и (или) дополнительные количественные и качественные (в том числе визуальные) данные о связи формы, свойств поверхности почвенных частиц различной природы и показателей порового пространства с прочностными параметрами микроструктуры почв.

Комплексное изучение устойчивости почв на разных масштабных уровнях ее структурной организации. В настоящий момент требуется больше экспериментальных данных и их аналитики для изучения связи между традиционными показателями прочности почв и грунтов (таких как предкомпрессионное напряжение, сцепление и т. д., характеризующих мезоуровень структуры) и новыми показателями (прочность микроструктуры почвы τ_{\max} , интегральная зона Integral Z и т. д., характеризующих микроуровень структуры). Если для первых зачастую имеются разработанные нормативные документы и классификации, то для вторых работа в этом направлении только начинается. Соответствующие указанным параметрам методы, безусловно, могут быть по отдельности использованы в исследовании механических свойств, однако совмещение нескольких подходов позволит более детально изучить деформации в почвах.

Рассчитываем, что будущие реометрические исследования позволят внести существенный вклад в понимание отдельных ас-

пектов механической устойчивости почв на микромасштабе как важной составляющей опорной функции почв, оценить роль химических, физических и биологических микропроцессов в мезо- и макропроцессах, лежащих в основе прочности почвенной структуры, и стать реометрическому подходу полезным инструментом в экологическом мониторинге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрукова В.В., Манучаров А.С.* Некоторые особенности деформации почв при реологических исследованиях // Почвоведение. 1985. № 6. С. 89–96.
2. *Абрукова В.В., Манучаров А.С.* Реологическая характеристика тундровой поверхностно-глеевой почвы // Почвоведение. 1986. № 9. С. 44–52.
3. *Абрукова Л.П.* Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение. 1970. № 3. С. 104–114.
4. *Абрукова Л.П.* Реопексия при реологических исследованиях почв // Почвоведение. 1976. № 5. С. 121–126.
5. *Абрукова Л.П.* Изучение тиксотропных свойств почв с применением ротационного вискозиметра РВ-8 // Почвоведение. 1980. № 8. С. 83–91.
6. *Волярович М.П., Лазовская Н.В.* Ротационные вискозиметры для исследования реологических свойств дисперсных систем и высокомолекулярных соединений (Обзор) // Коллоидный журнал. 1966. Т. 28. № 2. С. 198–213.
7. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
8. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
9. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
10. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 33 с.
11. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
12. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с.
13. *Качинский Н.А.* Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. 321 с.

14. *Клюева В.В.* Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного: Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2019. 142 с.
15. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 21–35. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).
16. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 108–148. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-108-148](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148).
17. *Манучаров А.С., Харитонова Г.В., Шеин Е.В.* Реология в почвоведении. М.: Университетская книга, 2013. 80 с.
18. *Манучаров А.С.* К использованию реологических исследований в почвоведении // Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. 1983. № 3. С. 36–40.
19. *Манучаров А.С., Аbruкова В.В.* Структурно-механические свойства дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1983. № 4. С. 64–73.
20. *Маслов Н.Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Высш.школа, 1968. 631 с.
21. *Месчан С.Р.* Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения (с учетом временных эффектов). М.: Недра, 1974. 192 с.
22. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
23. *Рибиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. 384 с.
24. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И., Трофимов В.Т.* Грунтоведение. Издание третье, переработанное и дополненное. М.: Издательство Московского университета, 1971. 595 с.
25. Теория и методы физики почв: коллективная монография /под ред. *Е.В.Шейна, Л.О. Карпачевского*. М.: Гриф и К., 2007. 616 с.
26. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р.С.* Грунтоведение. Москва: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
27. *Хайдапова Д.Д., Холопов, Ю.В., Забоева, И.В., Лаптева, Е.М.* Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв европейского северо-востока //

Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2014. № 1. С. 20–25.

28. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шейн Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>.

29. *Хитров Н.Б., Хайдапова Д.Д.* Вязкоупругое поведение вертикального солонча Каменной Степи // Почвоведение. 2019. № 7. С. 843–858. DOI: [10.1134/S0032180X19070050](https://doi.org/10.1134/S0032180X19070050).

30. *Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лантева Е.М.* Реологические свойства северо-таежных автоморфных и полугидроморфных криогеоморфических почв Европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 4. С. 439–450. DOI: [10.7868/s0032180x18040056](https://doi.org/10.7868/s0032180x18040056).

31. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. Ленинград, Москва: Стройиздат, Наркомстрой, 1940. 388 с.

32. *Шейн Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.

33. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии / Пер. с англ. И.А. Лавыгина / под ред. В.Г. Куличихина. М.: КолосС, 2003. 312 с.

34. *Ajayi A. E., Holthusen D., Horn R.* Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils // Soil & Tillage Research. 2016. Vol. 155. P. 166–175.

35. *Ajayi A.E., Horn R.* Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage // Pedosphere. 2017. Vol. 27. P. 236–247.

36. *Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A.* The Soil Management Assessment Framework // Soil Science Society of America Journal. 2004. Vol. 68. No. 6. P. 1945–1962. DOI: [10.2136/sssaj2004.1945](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945).

37. Anton Paar GmbH. Modular Compact Rheometers. Products, 2023. URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302-502/?sku=241353>.

38. *Barré P., Hallett P.D.* Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy // European Journal of Soil Science. 2009. Vol. 60. P. 525–538. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x).

39. *Batista R.F., Reichert J.M., Holthusen D., Batistão A.C., Daher M., Schünemann A.L., Filho E.I.F., Schaefer C. E.G.R., Francelino M.R.* Freeze-thaw cycles affecting rheological properties of Antarctic soils // Geoderma. 2022. Vol. 428. DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116220](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116220).

40. *Batistão A.C., Holthusen D., Reichert J. M., dos Santos L.A.C., Campos M.C.C.* Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia,

- Brazil // *Geoderma*. 2020. Vol. 363. P. 114130. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114130](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130).
41. *Baumgarten W., Dörner J., Horn R.* Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile // *Soil & Tillage Research*. 2013. Vol. 129. P. 48–60. DOI: [10.1016/j.still.2013.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.007).
42. *Baumgarten W., Horn R.* Assessing soil degradation by using a scale-spanning soil mechanical approach: A review. In: *Advances in GeoEcology – Soil Degradation*. Catena Verlag, 2013. P. 3–61.
43. *Czibulya Z., Tombacz E., Szegi T., Micheli E., Zsolnay A.* Standard state of soil dispersion // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 48. P. 594–601.
44. *Das B.M.* *Advanced Soil Mechanics*. CRC Press, 2008. 594 p.
45. *Encyclopedia of agrophysics. J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec (Eds)*. Dordrecht: Springer, 2011. 1028 p.
46. *Ghezzehei T.A., Or D.* Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses // *Soil Science Society of America Journal*. 2001. Vol. 65. P. 624–637. DOI: [10.2136/sssaj2001.653624x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x).
47. *Holthusen D., Batistão A.C., Reichert J.M.* (2020a) Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content // *Rheological Acta*. 2020. Vol. 59. No. 8. P. 545–563. DOI: [10.1007/s00397-020-01219-3](https://doi.org/10.1007/s00397-020-01219-3).
48. *Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R.* Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012a. Vol. 175. No. 1. P. 4–13. DOI: [10.1002/jpln.201100075](https://doi.org/10.1002/jpln.201100075).
49. *Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R.* Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012b. Vol. 175. P. 14–23. DOI: [10.1002/jpln.201100076](https://doi.org/10.1002/jpln.201100076).
50. *Holthusen D., Pértile P., Awe G.O., Reichert J.M.* Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical Oxisols with varying clay content // *Soil Tillage Research*. 2020b. Vol. 203. P. 104677. DOI: [10.1016/j.still.2020.104677](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104677).
51. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R.* Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses // *Geoderma*. 2017. Vol. 295. P. 129–141. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.034).
52. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R.* Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions // *Soil*

- Tillage Research. 2019. Vol. 191. P. 282–293. DOI: [10.1016/j.still.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.014).
53. *Holthusen D., Peth S., Horn R., Kühn T.* Flow and deformation behavior at the microscale of soils from several long-term potassium fertilization trials in Germany // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2012. Vol. 175. P. 535–547. DOI: [10.1002/jpln.201100073](https://doi.org/10.1002/jpln.201100073).
54. *Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H.* Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? // Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 195. P. 104388. DOI: [10.1016/j.still.2019.104388](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388).
55. *Hosseinpour-Ashenaabad R., Keller T., Larsbo M., Hallett P.D.* Dual-platform micromechanical characterization of soils: Oscillation shear rheometry and spherical indentation // Soil Tillage Research. 2022. Vol. 223. P. 105467. DOI: [10.1016/j.still.2022.105467](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105467).
56. ISO 17892-12:2018. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of liquid and plastic limits.
57. *Keedwell M.J.* Rheology and Soil Mechanics. London, New York: MacMillan, 1984. 323 p.
58. *Lal R.* Soil Structure and Sustainability // Journal of Sustainable Agriculture. 1991. Iss. 4. P. 67–92. DOI: [10.1300/J064v01n04_06](https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06).
59. *Markgraf W., Horn R.* Rheological-stiffness analysis of K⁺-treated and CaCO₃-rich soils // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2006. Vol. 169. P. 411–419. DOI: [10.1002/jpln.200521934](https://doi.org/10.1002/jpln.200521934).
60. *Markgraf W., Horn R.* Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils // Soil Science Society of America Journal. 2007. Vol. 71. P. 851–859. DOI: [10.2136/sssaj2006.0231](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0231).
61. *Markgraf W., Horn R., Peth S.* An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Tillage Research. 2006. Vol. 91. P. 1–14. DOI: [10.1016/j.still.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007).
62. *Markgraf W., Moreno F., Horn R.* Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques // Vadose Zone Journal. 2012. Vol. 11. P. 1–11. DOI: [10.2136/vzj2011.0061](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0061).
63. *Markgraf W., Watts C., Whalley R., Horn R.* Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils // Extended Abstracts – 21st Australian Clay Minerals Conference. Brisbane. 2010. P. 121–124.
64. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R.* Influence of organic matter on rheological properties of soil // Applied Clay Science. 2012. Vol. 64. P. 25–33. DOI: [10.1016/j.clay.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009).

65. *Mezger T.G.* The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers. 4th edition. Hanover: Vincentz Network, 2014.
66. *Mitchell J.K., Soga K.* Fundamentals of soil behavior. 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 577 p.
67. *Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebnick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D.* Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time // Eurasian Journal of Soil Science. 2017. Vol. 68. P. 806–816. DOI: [10.1111/ejss.12487](https://doi.org/10.1111/ejss.12487).
68. *Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M.* Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities // Scientia Agricola. 2018. Vol. 75. No. 2. P. 154–162. DOI: [10.1590/1678-992X-2016-0267](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267).
69. *Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A.* Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2016. Vol. 40. P. 2–14. DOI: [10.1590/18069657rbc20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150286).
70. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.-J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
71. *Sobucki V., Holthusen D., Batistão A.C., Mota J. C. A., Reichert J. M.* Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification // Geoderma Regional. 2022. Vol. 30. P. e00553. DOI: [10.1016/j.geodrs.2022.e00553](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00553).
72. *Stoppe N., Horn R.* Microstructural strength of tidal soils - A rheometric approach to develop pedotransfer functions // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2018. Vol. 66. P. 87–96. DOI: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031).
73. *Suklje L.* Rheological aspects of soil mechanics. London: Wiley Interscience, 1969. 590 p.
74. *Tanner R.I.* Engineering rheology. Oxford University Press: New York, 2000. 559 p.
75. *Tarchitzky J., Chen, Y.* Polysaccharides and pH effects on sodium montmorillonite: flocculation, dispersion, and rheological properties // Soil Science. 2002. Vol. 167. P. 791–801.
76. *Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G.* Soil Mechanics in Engineering Practice. New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996. 417 p.
77. *Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Weller U., Baveye P.C.* A holistic perspective on soil architecture

is needed as a key to soil functions // *European Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 73. P. 1–14. DOI: [10.1111/ejss.13152](https://doi.org/10.1111/ejss.13152).

78. Vyalov S.S. *Rheological fundamentals of soil mechanics. Development in geotechnical engineering*. Elsevier: Amsterdam, 1986. 560 p.

79. Yudina A., Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores // *Geoderma*. 2023. Vol. 434. DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116478](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478).

REFERENCES

1. Abrukova V.V., Manucharov A.S., Nekotorye osobennosti deformatsii pochv pri reologicheskikh issledovaniyakh (Some characteristics of soil deformation in rheological studies), *Pochvovedenie*, 1985, No. 6, pp. 89–96.
2. Abrukova V.V., Manucharov A.S., Reologicheskaya kharakteristika tundrovoi poverkhnostno-gleevoi pochvy (Rheological characteristics of tundra surface gleyic soil), *Pochvovedenie*, 1986, No. 9, pp. 44–52.
3. Abrukova L.P., Kinetika protsessov tiksotropnogo strukturoobrazovaniya v pochvennykh suspenziyakh (Kinetics of thixotropic structure formation processes in soil suspensions), *Pochvovedenie*, 1970, No. 3, pp. 104–114.
4. Abrukova L.P., Reopeksiya pri reologicheskikh issledovaniyakh pochv 9 Rheopexy in rheological studies of soils), *Pochvovedenie*, 1976, No. 5, pp. 121–126.
5. Abrukova L.P., Izuchenie tiksotropnykh svoystv pochv s primeneniem rotatsionnogo viskozimetra RV-8 (Study of thixotropic properties of soils with a rotational viscometer RV-8), *Pochvovedenie*, 1980, No. 8, pp. 83–91.
6. Volarovich M.P., Lazovskaya N.V., Rotatsionnye viskozimetry dlya issledovaniya reologicheskikh svoystv dispersnykh sistem i vysokomolekulyarnykh soedinenii (Obzor) (Rotational viscometers for studying the rheological properties of dispersed systems and high-molecular compounds (Review)), *Kolloidnyi zhurnal*, 1966, Vol. 28, No. 2, pp. 198–213.
7. Voronin A.D., *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv* (Structural-functional hydrophysics of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1984, 204 p.
8. Vyalov S.S., *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* (Rheological concepts of soil mechanics), Moscow: Vysshya shkola, 1978, 447 p.
9. *GOST 12248.1-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti metodom odnoploskostnogo sreza* (Soils. Determination of strength parameters by shear strength testing), Moscow: Standartinform, 2020, 20 p.
10. *GOST 12248.3-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruemosti metodom trekhnosnogo szhatiya* (Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing), Moscow: Standartinform, 2020, 33 p.

11. GOST 12248.4-2020. *Grunty. Opredelenie kharakteristik deformiruемости методом kompressionnogo szhatiya* (Soils. Determination of deformation parameters by compression testing), Moscow: Standartinform, 2020, 19 p.
12. GOST 5180-2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* (Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics), Moscow: Standartinform, 2019, 24 p.
13. Kachinskii N.A., *Fizika pochvy* (Soil physics), Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 321 p.
14. Klyueva V.V., *Reologicheskie svoistva pochv i ikh svyaz' s fizicheskimi i khimicheskimi svoistvami na primere dernovo-podzolistoi pochvy i chernozema tipichnogo: Dis. ... kand. biol.nauk* (Rheological properties of soddy-podzolic soils and typical chernozems and their relationships with physical and chemical properties, Cand. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2019, 142 p.
15. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 89, pp. 21–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).
16. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, V. 103, pp. 108–148, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-108-148](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148).
17. Manucharov A.S., Kharitonova G.V., Shein E.V., *Reologiya v pochvovedenii* (Rheology in soil science), Moscow: Universitetskaya kniga, 2013, 80 p.
18. Manucharov A.S., K ispol'zovaniyu reologicheskikh issledovaniy v pochvovedenii (Using of rheological studies in soil science), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Pochvovedenie*, 1983, No. 3, pp. 36–40.
19. Manucharov A.S., Abrukova V.V., Strukturno-mekhanicheskie svoistva dernovo-podzolistoi pochvy (Structural and mechanical properties of a soddy-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 1983, No.4, pp. 64–73.
20. Maslov N.N., *Osnovy mekhaniki gruntov i inzhenernoi geologii* (Fundamentals of soil mechanics and engineering geology), Moscow: Vyssh.shkola, 1968, 631 p.
21. Meschyan S.R., *Mekhanicheskie svoistva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniya (s uchedom vremennykh effektov)* (Mechanical properties of soils and laboratory methods for their determination (taking into account temporary effects)), Moscow: Nedra, 1974, 192 p.
22. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rummyantseva N.A., *Mikrostruktura glinistykh porod* (Microstructure of clayey rocks), Moscow: Nedra, 1989, 211 p.

23. Rebinder P.A., *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannnye Trudy* (Surface phenomena in disperse systems. Physico-chemical mechanics. Selected studies), Moscow: Nauka, 1979, 384 p.
24. Sergeev E.M., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Osipov V.I., Trofimov V.T., *Gruntovedenie* (Soil Science), Izдание tret'e, pererabatatnoe i dopolnennoe, Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta., 1971, 595 p.
25. Shein E.V., Karpachevskii L.O. (Eds), *Teoriya i metody fiziki pochv: kollektivnaya monografiya* (Theory and methods of soil physics: collective monograph), Moscow: Grif i K., 2007, 616 p.
26. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskii E.A., Golodkovskaya G.A., Vasil'chuk Yu. K., Ziangirov R.S, *Gruntovedenie* (Soil Science), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 1024 p.
27. Khaidapova D.D., Kholopov, Yu.V., Zaboeva, I.V., Lapteva, E.M., Reologicheskie osobennosti koagulyatsionnoi struktury severotaezhnykh torfyanisto-podzolisto-gleevatykh pochv evropeiskogo severo-vostoka (Rheological features of the coagulation structure of northern taiga peaty-podzolic-gleyic soils of the European Northeast), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2014, No. 1, pp. 20–25.
28. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii (Rheological properties of typical chernozems (Kursk oblast) under different land uses), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963, DOI: [10.7868/S0032180X16080049](https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049).
29. Khitrov N.B., Khaidapova D.D., Vyazkouprugoe povedenie vertikovogo solontsa KamЕННОй Stepi (Viscoelastic Behavior of Vertic Solonetz in the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7, pp. 843–858, DOI: [10.1134/S0032180X19070050](https://doi.org/10.1134/S0032180X19070050).
30. Kholopov Yu.V., Khaidapova D.D., Lapteva E.M., Reologicheskie svoystva severo-taezhnykh avtomorfnykh i polugidromorfnykh kriometamorficheskikh pochv Evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Respublika Komi) (Rheological properties of northern taiga automorphic and semi-hydromorphic cryometamorphic soils of the European north-east of Russia (Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 4, pp. 439–450, DOI: [10.7868/s0032180x18040056](https://doi.org/10.7868/s0032180x18040056).
31. Tsyrovich N.A., *Mekhanika gruntov* (Soil mechanics), Leningrad, Moscow: Stroiizdat, Narkomstroï, 1940, 388 p.
32. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005, 432 p.

33. Shramm G., *Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii* (Basics of practical rheology and rheometry), V.G. Kulichikhin (Ed.), Moscow: KolosS, 2003, 312 p.
34. Ajayi A.E., Holthusen D., Horn R., Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils, *Soil Tillage Research*, 2016, Vol. 155, pp. 166–175.
35. Ajayi A.E., Horn R., Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage, *Pedosphere*, 2017, Vol. 27, pp. 236–247.
36. Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A., The Soil Management Assessment Framework, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, Vol. 68, No. 6, pp. 1945–1962, DOI: [10.2136/sssaj2004.1945](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945).
37. Anton Paar GmbH. Modular Compact Rheometers. Products, 2023, URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302-502/?sku=241353>.
38. Barré P., Hallett P.D., Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy, *European Journal of Soil Science*, 2009, Vol. 60, pp. 525–538, DOI: [10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x).
39. Batista R.F., Reichert J. M., Holthusen D., Batistão A.C., Daher M., Schünemann A.L., Filho E.I.F., Schaefer C.E.G.R., Francelino M.R., Freeze–thaw cycles affecting rheological properties of Antarctic soils, *Geoderma*, 2022, Vol. 428, DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116220](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116220).
40. Batistão A.C., Holthusen D., Reichert J. M., dos Santos L.A.C., Campos M.C.C., Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil, *Geoderma*, 2020, Vol. 363, pp. 114130, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114130](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130).
41. Baumgarten W., Dörner J., Horn R., Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile, *Soil & Tillage Research*, 2013, Vol. 129, pp. 48–60, DOI: [10.1016/j.still.2013.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.007).
42. Baumgarten W., Horn R. Assessing soil degradation by using a scale-spanning soil mechanical approach: A review, In: *Advances in GeoEcology – Soil Degradation*, Catena Verlag, 2013, pp. 3–61.
43. Czubulya Z., Tombacz E., Szegi T., Micheli E., Zsolnay A., Standard state of soil dispersion, *Applied Clay Science*, 2010, Vol. 48, pp. 594–601.
44. Das B.M., *Advanced Soil Mechanics*, CRC Press, 2008, 594 p.
45. *Encyclopedia of agrophysics*, J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec (Eds), Dordrecht: Springer, 2011, 1028 p.
46. Ghezzehei T.A., Or D., Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses, *Soil Science Society of America Journal*, 2001, Vol. 65, pp. 624–637, DOI: [10.2136/sssaj2001.653624x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x).

47. Holthusen D., Batistão A.C., Reichert J.M., Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content, *Rheological Acta*, 2020, Vol. 59, No. 8, pp. 545–563, DOI: [10.1007/s00397-020-01219-3](https://doi.org/10.1007/s00397-020-01219-3).
48. Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R., Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012a, Vol. 175, No. 1, pp. 4–13, DOI: [10.1002/jpln.201100075](https://doi.org/10.1002/jpln.201100075).
49. Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R., Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012b, Vol. 175, pp. 14–23, DOI: [10.1002/jpln.201100076](https://doi.org/10.1002/jpln.201100076).
50. Holthusen D., Pértile P., Awe G.O., Reichert J.M., Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical Oxisols with varying clay content, *Soil Tillage Research*, 2020, Vol. 203, pp. 104677, DOI: [10.1016/j.still.2020.104677](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104677).
51. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses, *Geoderma*, 2017, Vol. 295, pp. 129–141, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.034).
52. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions, *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 191, pp. 282–293, DOI: [10.1016/j.still.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.014).
53. Holthusen D., Peth S., Horn R., Kühn T., Flow and deformation behavior at the microscale of soils from several long-term potassium fertilization trials in Germany, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, Vol. 175, pp. 535–547, DOI: [10.1002/jpln.201100073](https://doi.org/10.1002/jpln.201100073).
54. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H., Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil & Tillage Research*, 2019, Vol. 195, pp. 104388, DOI: [10.1016/j.still.2019.104388](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388).
55. Hosseinpour-Ashenaabad R., Keller T., Larsbo M., Hallett P.D., Dual-platform micromechanical characterization of soils: Oscillation shear rheometry and spherical indentation, *Soil Tillage Research*, 2022, Vol. 223, pp. 105467, DOI: [10.1016/j.still.2022.105467](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105467).
56. *ISO 17892-12:2018 (eng). Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of liquid and plastic limits.*

57. Keedwell M.J., *Rheology and Soil Mechanics*, London, New York: MacMillan, 1984, 323 p.
58. Lal R., Soil Structure and Sustainability, *Journal of Sustainable Agriculture*, 1991, Iss. 4, pp. 67–92, DOI: [10.1300/J064v01n04_06](https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06).
59. Markgraf W., Horn R., Rheological-stiffness analysis of K+-treated and CaCO₃-rich soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169, pp. 411–419, DOI: [10.1002/jpln.200521934](https://doi.org/10.1002/jpln.200521934).
60. Markgraf W., Horn R., Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2007, Vol. 71, pp. 851–859, DOI: [10.2136/sssaj2006.0231](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0231).
61. Markgraf W., Horn R., Peth S., An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils, *Soil Tillage Research*, 2006, Vol. 91, pp. 1–14, DOI: [10.1016/j.still.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007).
62. Markgraf W., Moreno F., Horn R., Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques, *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11, pp. 1–11, DOI: [10.2136/vzj2011.0061](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0061).
63. Markgraf W., Watts C., Whalley R., Horn R., Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils, *Extended Abstracts – 21st Australian Clay Minerals Conference*, Brisbane, 2010, pp. 121–124.
64. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R., Influence of organic matter on rheological properties of soil, *Applied Clay Science*, 2012, Vol. 64, pp. 25–33, DOI: [10.1016/j.clay.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009).
65. Mezger T.G., *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz Network, 2014.
66. Mitchell J.K., Soga K., *Fundamentals of soil behavior*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, 577 p.
67. Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebnick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D., Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time, *Eurasian Journal of Soil Science*, 2017, Vol. 68(6), pp. 806–816, DOI: [10.1111/ejss.12487](https://doi.org/10.1111/ejss.12487).
68. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M., Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities, *Scientia Agricola*, 2018, Vol. 75, No. 2, pp. 154–162, DOI: [10.1590/1678-992X-2016-0267](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267).
69. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A., Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils,

- Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2016, Vol. 40, pp. 2–14, DOI: [10.1590/18069657rbc20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150286).
70. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.-J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
71. Sobucki V., Holthusen D., Batistão A.C., Mota J.C.A., Reichert J.M., Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification, *Geoderma Regional*, 2022, Vol. 30, pp. e00553, DOI: [10.1016/j.geodrs.2022.e00553](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00553).
72. Stoppe N., Horn R., Microstructural strength of tidal soils - A rheometric approach to develop pedotransfer functions, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, Vol. 66, pp. 87–96, DOI: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031).
73. Suklje L., *Rheological aspects of soil mechanics*, London: Wiley Interscience, 1969, 590 p.
74. Tanner R.I., *Engineering rheology*, Oxford University Press: New York, 2000, 559 p.
75. Tarchitzky J., Chen Y., Polysaccharides and pH effects on sodium montmorillonite: flocculation, dispersion, and rheological properties, *Soil Science*, 2002, Vol. 167, pp. 791–801.
76. Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996, 417 p.
77. Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Weller U., Baveye P.C., A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions, *European Journal of Soil Science*, 2021, Vol. 73, pp. 1–14, DOI: [10.1111/ejss.13152](https://doi.org/10.1111/ejss.13152).
78. Vyalov S.S., *Rheological fundamentals of soil mechanics*, Development in geotechnical engineering, Elsevier: Amsterdam, 1986, 560 p.
79. Yudina A., Kuzyakov Y., Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116478](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478).

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 121

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 25.12.2024 г.
Подписано в печать 25.12.2024 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 19 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