

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 118

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 118

**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

Загрязнение и пригодность почв для выращивания экологически чистой сельскохозяйственной продукции в РФ <i>Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Духанин Ю.А.</i>	5
Обновление почвенной карты горных районов Узбекистана <i>Гафурова Л.А., Савин И.Ю., Джалилова Г.Т.</i>	21
Подзолисто-буроземные почвы Дальнего Востока на Почвенной карте РФ масштаба 1 : 2.5 млн и их корреляция с таксонами Классификации почв России <i>Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.</i>	48
Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования <i>Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М.</i>	79
Теплопроводность городских почв и субстратов почвенных конструкций: методические аспекты и математическое моделирование <i>Кокорева А.А., Кожунов А.В., Бутылкина М.А., Дымова И.В., Степаненко В.М., Иванова А.Е.</i>	128
Удельная поверхность и микроструктура поверхности твердой фазы почвенных субстратов разного генезиса <i>Широян М.М., Умарова А.Б., Федотова А.В., Бутылкина М.А.</i>	167
Эколого-хозяйственная оценка состояния кормовых угодий бореальных речных пойм в нефтедобывающем регионе (на примере поймы реки Колвы, Усинский район, Республика Коми) <i>Аветов Н.А., Коптелов А.Г., Лозбенеv Н.И., Соловьев Д.А., Шишконокова Е.А.</i>	188
Влияние крупных лесных пожаров 2021 года на растительность и почвы на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии <i>Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Оконешникова М.В., Филиппов Н.В.</i>	231
Технико-технологическое обеспечение вовлечения в оборот залежных земель <i>Митин С.Г., Сысоев Г.В., Старостин И.А., Ещин А.В.</i>	276
Пирогенная трансформация фосфатного состояния мерзлотных лесных почв Центральной и Южной Якутии	

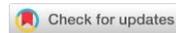
Захарова О.Г., Чевычелов А.П.309

CONTENTS

Contamination and suitability of soils for growing bio products in Russia <i>Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Dukhanin Yu.A.</i>	5
Updating of soil map of mountaneous regions of Uzbekistan <i>Gafurova L.A., Savin I.Yu., Djalilova G.T.</i>	21
Podzolic-brown soils of the Far East on the Soil map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, and their correlation with soils in the Russian soil classification <i>Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V.</i>	48
Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use <i>Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udal'tsov S.N., Semenov V.M.</i>	79
Thermal conductivity of urban and artificial soils: methodological aspects and mathematical modeling <i>Kokoreva A.A., Kozhunov A.V., Butylkina M.A., Dymova I.V., Stepanenko V.M., Ivanova A.E.</i>	128
Specific surface area and microstructure of the surface of soil solid substrates of different genesis <i>Shiroyan M.M., Umarova A.B., Fedotova A.A., Butylkina M.A.</i>	167
Ecological and agricultural assessment of the state of forage lands of boreal river floodplains in the oil-producing region (case study in the floodplain of the Kolva River, Usinsky district, Komi Republic) <i>Avetov N.A., Koptelov A.G., Lozbenev N.I., Solovyov D.A., Shishkonakova E.A.</i>	188
The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia <i>Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Okoneshnikova M.V., Filippov N.V.</i>	231
Technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture <i>Mitin S.G., Sysoev G.V., Starostin I.A., Eshchin A.V.</i>	276
Pyrogenic transformation of the phosphate state of permafrost forest soils of Central and Southern Yakutia <i>Zakharova O.G., Chevychelov A.P.</i>	309

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-5-20



Ссылки для цитирования:

Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Духанин Ю.А. Загрязнение и пригодность почв для выращивания экологически чистой сельскохозяйственной продукции в РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 5-20. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-5-20

Cite this article as:

Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Dukhanin Yu.A., Contamination and suitability of soils for growing bio products in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 5-20, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-5-20

Загрязнение и пригодность почв для выращивания экологически чистой сельскохозяйственной продукции в РФ

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

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

*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

Поступила в редакцию 10.11.2023, принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Определена площадь зон влияния выбросов промышленных предприятий, разлива нефти и нефтепродуктов, выбросов автотранспорта, радиоактивных веществ, а также применения пестицидов и минеральных удобрений на землях сельскохозяйственного назначения Российской Федерации. Доля рассматриваемой территории от площади сельхозугодий страны составляет менее 3%. Почвы, находящиеся в зоне влияния выбросов, относятся к потенциально загрязненным и должны быть включены в программу мониторинга состояния земель сельскохозяйственного назначения. Почвы, находящиеся вне зоны влияния выбросов загрязняющих веществ, являются незагрязненными. Регулярный мониторинг загрязнения этих почв проводиться не должен, что позволит снизить расходы на выполнение обследований их состояния, включая отбор образцов, подготовку и анализ проб. Территории вне зоны влияния составляют

более 97% фонда земель сельскохозяйственного назначения РФ и представлены незагрязненными почвами. Эти почвы являются пригодными для производства экологически чистой продукции. Организация экологически чистого производства сельскохозяйственной продукции в РФ должна осуществляться вне выделенных зон потенциального загрязнения. Ввиду отсутствия загрязнения переход на выращивание экологически чистой продукции на почвах вне зоны влияния источников загрязнения должен осуществляться заявительным способом. При этом экологически чистое производство должно отвечать требованиям технологий выращивания и нормам качества продукции.

Ключевые слова: качество почв; поступление загрязнителей в почву; зона влияния выбросов; токсиканты.

Contamination and suitability of soils for growing bio products in Russia

© 2024 A. L. Ivanov, V. S. Stolbovoy*, A. M. Grebennikov,
Yu. A. Dukhanin

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

Received 10.11.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: The area of impact zones of industrial contamination, oil and oil products spills, motor vehicle emissions, radioactive substances, as well as pesticides and mineral fertilizers application on agricultural lands of the Russian Federation is calculated. The share of the territory under consideration in the total area of agricultural lands of the country does not exceed 3%. Soils in the zone of contamination influence are considered to be potentially polluted and should be included in the monitoring program of agricultural land. Soils outside the zone of influence of pollutant dissemination are uncontaminated. Regular monitoring of contamination of these soils should not be carried out, which will reduce the costs of monitoring. More than 97% of the Russian agricultural land is represented by uncontaminated soils and is suitable for the production of bio products. Regular monitoring of contamination of these soils should not be conducted, which will reduce the cost of the survey, including sample collection, preparation and analysis. In view of the lack of soil contamination, the transition to the cultivation of bio products should be based on declarative approach. In this case, bio production

should meet the requirements of special cultivation technologies and the product quality standards.

Keywords: soil quality; ingestion of pollutants into the soil; contamination impact zone; toxicants.

ВВЕДЕНИЕ

Экологически чистая продукция¹ сельского хозяйства является важнейшим фактором, определяющим здоровье и качество жизни населения (Минеев, Ремпе, 1990). Возможность производства экологически чистой продукции во многом лимитируется загрязнением почв. Отсутствие загрязнения выступает одним из индикаторов здоровых почв, для которых содержание загрязнителей не должно превышать допустимые нормы. Под здоровьем почв часто понимается их качество, т. е. “способность почвы выполнять функции, необходимые для ее использования” (Реестр индикаторов качества почв, 2021). В сельском хозяйстве качество почвы определяется ее плодородием, выраженным в баллах бонитета и/или нормативной урожайностью зерновых культур (ГОСТ Р 70229-2022). Согласно ГОСТ Р 70229-2022 для определения качества почв, содержание загрязняющих веществ, включая и радиоактивные вещества, в количествах, превышающих допустимые нормы, препятствует использованию почв в земледелии.

В настоящее время проблема загрязнения почв вышла на передний план в связи с возрастающей востребованностью экологически чистой продукции в развитых странах, таких как США, Австралия, Англия, страны Европейского Союза и др. При этом необходимо отметить, что критические уровни содержания загрязняющих веществ в почвах для разных стран неодинаковы, что связано с различиями геохимических фонов, а также технологий выращивания сельскохозяйственной продукции. Эти особенности отмечаются и для почв РФ. Вместе с тем обнаруживается, что величины нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК)

¹ Продукты, произведенные в соответствии с экологическими стандартами, которые исключают вредное воздействие на них на всех этапах “от фермы к прилавку”. В наименование таких продуктов в разных странах принято добавлять приставку: “эко”, “био”, “органик”.

загрязняющих веществ почв, принятых в России, в десятки и сотни раз меньше стандартов в странах, перечисленных выше, и в некоторых азиатских странах (Никитина и др., 2013). Показано, что почвы средней степени загрязнения тяжелыми металлами по нормативам РФ относятся к незагрязненным, пригодным для производства детского питания по нормативу, принятому в Нидерландах (Stolbovoi, McCallum, 2002). Очевидно, что излишне низкие значения принятых в РФ норм ПДК могут сдерживать продвижение отечественной экологически чистой продукции на международные рынки. Иными словами, гармонизация отечественных норм ПДК с таковыми других стран становится одной из актуальнейших научно-практических задач, решение которой откроет преимущество незагрязненных (чистых) сельскохозяйственных земель нашей страны.

Тенденция развития спроса на экологически чистую продукцию отмечается и в РФ, что формирует запрос на оценку загрязнения сельскохозяйственных почв страны. Необходимо отметить, что, несмотря на длительный период определения загрязняющих веществ в почвах, до настоящего времени какие-либо обоснованные оценки степени загрязнения сельскохозяйственных почв РФ отсутствуют. Одной из причин сложившейся ситуации может быть территориально ограниченная инвентаризация загрязнения почв.

К наиболее распространенным загрязнителям почв относят тяжелые металлы, мышьяк, бенз(а)пирен, нефтепродукты, пестициды, минеральные удобрения и радиоактивные вещества. Наиболее значимыми источниками поступления химических токсикантов в почву в основном являются крупные промышленные предприятия (металлургической, химической и добывающей промышленности), средства химизации, применяемые в сельском хозяйстве (пестициды, ретарданты, удобрения и др.), и автотранспорт (выхлопные газы, поступающие в окружающую среду при сжигании горюче-смазочных материалов (ГСМ), токсичные вещества, образующиеся при износе автомобильных шин) (Аветян и др., 2023).

В России ежегодно потери нефти составляют около 3 млн т или 1.2% от ее добычи (Бурлака, 2008). Главные потенциальные

источники загрязнения природной среды нефтью и нефтепродуктами – это нефтепромыслы, нефтепроводы, нефтеперерабатывающие предприятия, нефтехранилища, наземный и водный транспорт, перевозящий нефтепродукты (Трофимов, Розанова, 2002; Пиковский и др., 2003). Нефтеперерабатывающие предприятия и нефтехранилища являются локальными источниками, загрязняющими почвы главным образом через атмосферу и сточные воды. Единовременные выбросы на почву при этом относительно невелики, но их постоянное выпадение создает вокруг значительный ареал устойчивого загрязнения (Временные методические рекомендации..., 1984).

В почвенном покрове нефтедобывающих районов выделяются следующие основные типы нарушений почв: нефтезагрязненные (замазученные), техногенно засоленные, скрытнозамазученные, почвы смешанного типа загрязнения и перерытые (Гилязов и др., 2009). Почвы считаются загрязненными нефтепродуктами, если концентрация их достигает уровня, при котором:

- отмечается угнетение или деградация растительного покрова;
- снижается продуктивность сельскохозяйственных земель;
- нарушается природное равновесие в почвенном биоценозе;
- происходит вытеснение одним или двумя бурно произрастающими видами растительности остальных видов, ингибируется деятельность микроорганизмов, исчезают виды альгофлоры, мезофауны;
- происходит вымывание нефти из почв в подземные или поверхностные воды;
- изменяются водно-физические свойства и структура почв (Временные методические рекомендации..., 1984; Пиковский и др., 2003; Другов, Родин, 2000).

Почвы обладают способностью самоочищения от нефти и нефтепродуктов. Так, 60-сантиметровый слой почвы практически полностью может очиститься через 6 лет после слабого загрязнения, через 11 лет после среднего и через 16 лет после сильного загрязнения (Фарахова, 2009).

Источником радиационного загрязнения являются аварийные ситуации на АЭС и других предприятиях, работающих с ра-

диоактивными веществами (Аветян и др., 2023).

Целью настоящей работы является оценка доли потенциально загрязненных почв в фонде земель сельскохозяйственного назначения и пригодности почв РФ для производства экологически чистой продукции.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы опубликованные данные источников загрязнения почв РФ. Оценка степени загрязнения выполнена согласно принятым нормативно-правовым документам по охране окружающей среды. В тех случаях, когда загрязнение почв происходило вне зависимости от их принадлежности к категории земель, доля загрязненных сельскохозяйственных почв вычислялась как произведение загрязненной площади и доли площади сельскохозяйственных угодий в РФ. Расчет проводился по формуле:

$$D_{i \text{ с-х. п.}} = S_i * D_{\text{с-х. уг.}} / S_{\text{с-х. уг.}}, \text{ где}$$

$D_{i \text{ с-х. п.}}$ – доля сельскохозяйственных почв, подвергнутая загрязнению i -ым веществом ($i = 1-4$ и соответствует перечисленным видам загрязнения);

S_i – площадь загрязненная i -ым веществом (рассчитана по формуле $S_i = \text{Sum} (S_{i,j})$, где Sum – символ суммы; $S_{i,j}$ – площадь j -го участка с i -ым видом загрязнения);

$$D_{\text{с-х. уг.}} = S_{\text{с-х. уг.}} / S_{\text{РФ}}, \text{ где}$$

$D_{\text{с-х. уг.}}$ – доля сельскохозяйственных угодий. $S_{\text{РФ}}$ – площадь почвенного фонда РФ.

Доля площади сельскохозяйственных угодий, загрязненных пестицидами, рассчитывалась по формуле:

$$D_{\text{п}} = S_{\text{п}} / S_{\text{с-х. уг.}}, \text{ где}$$

$D_{\text{п}}$ – доля площади сельскохозяйственных угодий, загрязненных пестицидами;

$S_{\text{п}}$ – площадь сельскохозяйственных угодий, загрязненных пести-

цидами;

$S_{с-х. ут.}$ – общая площадь сельскохозяйственных угодий РФ.

Исследование базируется на данных о площадях почвенного фонда сельскохозяйственных земель РФ, которые составляют разность площади земельного фонда (данные площади земельного фонда РФ) и площади непочвенных образований (внутренние воды, выходы плотных пород, пески и др.). Величина почвенного фонда сельскохозяйственных земель РФ принята равной 211.6 млн га, что составляет около 13% от площади почвенного фонда страны (Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России...”, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно опубликованным данным (Аветян и др., 2023), перечень промышленных предприятий, относящихся к *особо опасным загрязнителям* на территории РФ, включает 5–10 объектов с зоной влияния, составляющей ареал диаметром 30–50 км, к *опасным* – 20–25 объектов с зоной влияния 10–30 км в диаметре. *Умеренно опасных* источников загрязнения, имеющих зону влияния диаметром 5–10 км, насчитывается около 50. Объектов *локального* химического загрязнения, имеющих зону влияния диаметром менее 5 км, насчитывается около 100.

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 в целях обеспечения безопасности населения вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека, устанавливается специальная территория с особым режимом использования, называемая санитарно-защитной зоной (СЗЗ). Размер СЗЗ обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения (химического, биологического, физического) на атмосферный воздух до значений, установленных гигиеническими нормативами. В зависимости от класса опасности предприятий размер СЗЗ устанавливается от 50 до 1 000 м. В соответствии с Земельным кодексом Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ внутренняя граница СЗЗ должна ограничивать земли промышленности, а сельскохозяйственные угодья, подверженные загрязняющему воздействию предприятия, могут располагаться только за

пределами СЗЗ.

Исходя из максимальных размеров зон загрязняющего влияния предприятий в зависимости от опасности (площадь между границами предприятий и внешней границей СЗЗ), а также с учетом их наибольшего количества и максимального размера СЗЗ (1 000 м) было определено, что суммарная площадь СЗЗ составила 338.74 тыс. га. Поскольку в СЗЗ могли входить земли практически всех категорий, площадь почв сельхозугодий в СЗЗ устанавливалась по их доле в общей площади земельного фонда РФ и оказалась равной 44.04 тыс. га или 0.02% от общей площади почв сельхозугодий в РФ (табл. 1).

Нефтезагрязненные участки занимают в России достаточно большие территории. Суммарная площадь загрязненных нефтью и нефтепродуктами земель в Российской Федерации составляет более 70 тыс. га (Булавинцева, Мазуркин, 2011).

Таблица 1. Доля площади сельхозугодий, загрязненная различными источниками

Table 1. Proportion of farmland area contaminated by various sources

№ п/п	Источники загрязнения	Доля площади сельхозугодий, %
1	Выбросы промышленных предприятий	0.02
2	Нефть и нефтепродукты	<0.01
3	Пестициды	1.65
4	Радиоактивные вещества	0.35
5	Выбросы автотранспорта	0.91
	Итого	2.94

Отсюда получаем, что площадь нефтезагрязненных почв сельскохозяйственных угодий можно оценить величиной, равной 9 100 га или <0.01% от общей площади почв сельхозугодий в РФ (табл. 1).

Загрязнение сельскохозяйственных почв остаточными количествами пестицидов связано с применением хлорорганических препаратов и отдельных классов гербицидов, остаточные количе-

ства которых, вследствие их высокой устойчивости к деструкции, сохраняются длительное время в почве, где широко использовались с нарушением рекомендаций по их применению.

Такие хлорорганические пестициды (ХОП), как ДДТ и ГХЦГ в течение нескольких десятилетий занимали одно из первых мест по масштабам использования в сельском хозяйстве России. ХОП устойчивы к высокой температуре, солнечной радиации, действию сильных кислот и щелочей. Они характеризуются прочностью химических связей, слабой растворимостью в воде. Эти свойства определяют длительное сохранение препаратов в окружающей среде (период полураспада в почве 10–15 лет), способны циркулировать в природе и распространяться на большие расстояния, активно накапливаться в трофических цепях (Мельников и др., 1977).

Препараты на основе ДДТ давно не применяются на территории России, но, несмотря на это, загрязнение данным препаратом встречается наиболее часто, по сравнению с другими пестицидами. На территории РФ отмечены также случаи превышения нормативов содержания в почве ГХЦГ, 2,4-Д, далапона, симазина, ГХБ, ПХБ. Среднее значение площади, загрязненной остаточными количествами пестицидов, по состоянию на 2020 г. составляла 1.65% (Состояние загрязнения пестицидами..., 2021), что соответствует загрязнению почв сельхозугодий остаточными количествами пестицидов, устойчивых к разложению (табл. 1).

Радиоактивное загрязнение почв может быть связано с авариями на объектах атомной отрасли (АЭС, ядерных полигонах, предприятиях по переработке радиоактивных материалов, созданию ядерного оружия и т. д.), с утечкой радиоактивных отходов в окружающую среду, с использованием радиоактивных изотопов в различных отраслях народного хозяйства.

Основными источниками радиоактивного загрязнения почв на территории РФ оказались выбросы в результате аварии на Чернобыльской АЭС, произошедшей в 1986 г., и на комбинате “Маяк”, случившейся в конце 50-х годов XX в. (Аветян и др., 2023).

Наиболее загрязненной выбросами ЧАЭС оказалась Брянская область, почвенный покров которой в значительной мере пострадал от выбросов цезия и стронция. Существенную долю ради-

ации получили также территории Орловской, Липецкой, Тульской, Калужской и Рязанской областей. Кроме того, северо-западные регионы страны в той или иной степени оказались затронутыми радиоактивным облаком, что обусловило попадание радиоактивных элементов в почвы Ленинградской области.

При аварии на комбинате “Маяк” в зоне радиационного загрязнения оказалась территория нескольких предприятий этого комбината, военный городок, пожарная часть и далее территория с населением 270 000 человек в 217 населенных пунктах трех областей: Челябинской, Свердловской и Тюменской. При этом 90% радиационных загрязнений выпали на территории химкомбината “Маяк”, а остальная часть рассеялась на прилегающих территориях.

В настоящее время радиационная нагрузка на население на территориях, прилегающих к Восточно-Уральскому радиоактивному следу, и на самом комбинате не превышает допустимых норм (<https://msk1.ru/text/world/2023/06/20/72414083/>), тогда как радиоактивное загрязнение от выбросов ЧАЭС за тридцать с лишним лет значительно уменьшилось, но по-прежнему сохраняет опасность для компонентов экосистем на территории 60 000 км² (<https://historyclothing.ru/kakie-brand/kakie-goroda-popali-pod-chernobylskoe-oblako.html>). Отсюда, при расчете площади сельхозугодий, загрязненных радионуклидами, следует принимать во внимание лишь площадь, загрязненную выбросами ЧАЭС. Загрязненная площади почв сельхозугодий в этом случае составила 780 000 га, что соответствовало 0.35% от общей площади почв сельхозугодий в РФ (табл. 1).

Для оценки площади загрязнения почв сельхозугодий автомобильным транспортом использовались справочные данные по длине сети автомобильных дорог с твердым покрытием и оформленных грунтовых дорог (<https://ru.wikipedia.org/wiki/>), составившей 1 553 663 км. Загрязненными считаются почвы сельхозугодий, расположенные в 100-метровой полосе, примыкающей к автодороге (Аветян и др., 2023). Отсюда площадь сельхозугодий, загрязненных выбросами автотранспорта равна 2 019 762 га или 0.91% от общей площади почв сельхозугодий в РФ (табл. 1).

Таким образом, согласно проведенной оценке, максималь-

ная площадь загрязненных почв сельхозугодий составляет 2.94% от общей площади почв сельхозугодий в РФ. Отсюда следует, что остальная часть площади почв сельскохозяйственных земель, около 97%, должна относиться к полностью пригодной для выращивания экологически чистой продукции сельскохозяйственного производства.

Необходимо отметить, что фактическая площадь загрязненных почв может быть значительно меньше за счет того, что одна и та же территория может быть загрязнена несколькими видами загрязнений, т. е. может проявляться повторный учет загрязнения.

Наиболее значительна площадь загрязнения сельскохозяйственных почв пестицидами (56% от общей площади загрязненных почв). Можно предполагать, что столь большая площадь загрязнения связана с широким применением в прошлом пестицидов, устойчивых к разложению в почвах. Подавляющее большинство пестицидов, применяемых в настоящее время, разлагается до безопасного уровня в почве в течение одного вегетационного периода. Так, например, согласно нашим неопубликованным данным, на одном из участков, расположенных в долине реки Подкумок недалеко от Кисловодска, в почвах было установлено пятикратное превышение предельно-допустимой нормы ДДТ, что, по всей видимости, было связано с применением этого препарата в яблоневом саду, располагавшемся на этом участке в 60-х годах XX в.

Следующим по значимости источником загрязнения почв является автотранспорт, доля которого в общей площади загрязнения почв сельхозугодий составляет 31%. Сократить площадь загрязнения автомобильным транспортом можно, если применять ГСМ с пониженным уровнем концентрации токсикантов и более устойчивые к износу автомобильные шины, содержащие меньшие количества загрязняющих веществ.

Относительно значимым источником загрязнения являются радионуклиды. Их доля в общем загрязнении почв РФ равна 12%, что является следствием аварии на ЧАЭС.

На долю последних двух источников загрязнения (загрязнения выбросами промышленных предприятий, нефтью и нефтепродуктами) в сумме приходится менее 1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доля площади почв сельскохозяйственных угодий, потенциально подверженная загрязнению выбросами промышленных предприятий, автотранспорта и радиоактивными веществами, разливами нефти и нефтепродуктов, а также вследствие применения пестицидов, не превышает 3% от общей площади почв сельскохозяйственных угодий страны. Выявлено, что наиболее значительная площадь загрязнения почв сельскохозяйственных угодий связана с загрязнением пестицидами (1.65%). Далее в ряду по мере уменьшения доли загрязнения располагались почвы, загрязненные в результате выбросов автотранспорта (0.91%), радиоактивными веществами (0.35%), выбросами промышленных предприятий (0.02%) и разливами нефти и нефтепродуктов (<0.01%).

Расчеты показывают, что более 97% почв земель сельскохозяйственного назначения РФ находятся вне зоны влияния выбросов загрязняющих веществ и являются пригодными для производства экологически чистой продукции. Ввиду отсутствия загрязнения почв переход на выращивание экологически чистой продукции в РФ должен осуществляться заявительным способом. При этом экологически чистое производство должно отвечать требованиям технологий выращивания и нормам качества продукции.

Важным практическим следствием отсутствия загрязнения почв сельскохозяйственных угодий РФ выступает локализация мониторинга состояния почв в зоне потенциального загрязнения. Регулярный мониторинг вне зоны загрязнения сельскохозяйственных почв проводиться не должен, что снизит расходы на выполнение обследований их состояния, включая отбор, подготовку и анализ проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветян С.А., Савицкая Н.В., Савин И.Ю., Шишконокова Е.А.* Картографическая интерпретация химического и радиационного загрязнения почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 114. С. 29–65. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-29-65](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-29-65).
2. *Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М.* Динамика аварий по площади загрязнения на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО «АК

“Транснефть” // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 3. С. 27–29.

3. *Бурлака И.В.* Эффективность рекультивации нефтезагрязненных земель в Среднем Поволжье: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2008. 16 с.

4. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв / под ред. *С.Г. Малахова*. М.: Московское отделение гидрометиздата, 1984.

5. *Гилязов М.Ю., Янтаров А.Х., Гайсин И.А.* Нефтезагрязненные почвы Республики Татарстан и приемы их рекультивации. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 244 с.

6. ГОСТ Р 70229-2022. ПОЧВЫ. Показатели качества почв. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78427/>.

7. *Другов Ю.С., Родин А.А.* Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. СПб., 2000. 250 с.

8. Ежегодник “Состояние загрязнения пестицидами объектов природной среды Российской Федерации в 2020 г.” Обнинск: ФГБУ «НПО “Тайфун”», 2021. 88 с.

9. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 24.06.2023).

10. Какие города входят в Чернобыльскую зону. URL: <https://historyclothing.ru/kakie-brand/kakie-goroda-popali-pod-chernobylskoe-oblako.html> (дата обращения: 03.11. 2023 г.)

11. *Краснов А.* Репортаж из города Озерска и с НПО “Маяк”. 2023. URL: <https://msk1.ru/text/world/2023/06/20/72414083/>.

12. *Мельников Н.Н., Волков А.И., Короткова О.А.* Пестициды и окружающая среда. М.: Химия, 1977. 240 с.

13. *Минеев В.Г., Ремпе Е.Х.* Агрохимия, биология и экология почвы. М.: Росагропромиздат, 1990. 206 с.

14. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий загрязнения 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.

15. *Никитина А.В., Жаткина Т.С., Курбатова А.И.* Некоторые аспекты нормирования загрязняющих веществ в почве // Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 5. С. 84–88.

16. *Ликовский Ю.И. и др.* Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.

17. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий. Р33 Российской Федерации. Версия 1.0. Иваново: ПресСто, 2021. 260 с. DOI: [10.51961/9785604637401](https://doi.org/10.51961/9785604637401).
18. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03.
19. Список стран по длине сети автомобильных дорог. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
20. Трофимов С.Я., Розанова М.С. Изменение свойств почв под влиянием нефтяного загрязнения // Дegrадация и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. С. 359–373.
21. Фарахова И.З. Агрохимические свойства и приемы рекультивации нефтезагрязненных серых лесных почв Предкамья Республики Татарстан: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04. Казань, 2009. 25 с.
22. Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia, IIASA & RAS. CD-ROM. Laxenburg, 2002. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/soil.htm.

REFERENCES

1. Avetyan S.A., Savitskaya N.V., Savin I.Yu., Shishkonakova E.A., Cartographic interpretation of chemical and radiation contamination of Russian soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 114, pp. 29–65, DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-29-65](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-29-65).
2. Bulavintseva A.D., Mazurkin P.M., Dynamics of accidents by area of pollution on the linear part of the main oil pipelines of JSC “AK Transneft”, *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, 2011, No. 3, pp. 27–29.
3. Burlaka I.V., *Effektivnost' rekul'tivacii neftezagryaznennykh zemel' v Srednem Povolzh'e: Aytoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Efficiency of oil-polluted lands reclamation in the Middle Volga region, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Saratov, 2008, 16 p.
4. Malakhov S.G. (Ed.), *Vremennyye metodicheskiye rekomendacii po kontrol'yu zagryazneniya pochv* (Temporary methodical recommendations on soil pollution control), Moscow: Moskovskoe otdelenie gidrometizdata, 1984.
5. Gilyazov M.Yu., Yapparov A.H., Gaisin I.A., *Neftezagryaznennyye pochvy Respubliki Tatarstan i priemy ih rekul'tivacii* (Oil polluted soils of the Republic of Tatarstan and methods of their reclamation), Kazan: Center of innovative technologies, 2009, 244 p.
6. GOST P 70229-2022. SOILS. Soil quality indicators. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78427/>.

7. Drugov Yu.S., Rodin A.A., *Ekologicheskie analizy pri razlivah nefi i nefteproduktov* (Ecological analyses at oil and oil products spills), St. Petersburg, 2000, 250 p.
8. Yearbook “State of pesticide pollution of natural environmental objects of the Russian Federation in 2020”, Obninsk: FGBU “NPO Typhoon”, 2021, 88 p.
9. *Land Code of the Russian Federation* of 25.10.2001 N 136-FZ (ed. 24.06.2023).
10. *Kakie goroda vkhodjat v Chernobyl'skuju zonu* (Which cities are included in the Chernobyl zone), URL: <https://historyclothing.ru/kakie-brand/kakie-goroda-popali-pod-chernobylskoe-oblako.html>.
11. Krasnov A., *Reportazh iz goroda Ozerska i s NPO “Majak”* (Reporting from the city of Ozersk and the Scientific and Production Association “Mayak”), 2023, URL: <https://msk1.ru/text/world/2023/06/20/72414083/>.
12. Melnikov N.N., Volkov A.I., Korotkova O.A., *Pesticidy i okruzhajushhaja sreda* (Pesticides and Environment), Moscow: Khimiya, 1977, 240 p.
13. Mineev V.G., Rempe E.H., *Agrokhimija, biologija i jekologija pochvy* (Agrochemistry, biology and ecology of soil), Moscow: Rosagropromizdat, 1990, 206 p.
14. A.I. Bedritsky (Ed.), National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: assessment of risks and ecological and economic consequences of land pollution. Adaptive systems and technologies of rational nature management (Agriculture and Forestry)”, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, GEOS, 2018, 286 p.
15. Nikitina A.V., Zhatkina T.S., Kurbatova A.I., *Nekotorye aspekty normirovanija zagryznajushhih veshhestv v pochve* (Some aspects of rationing of pollutants in soil), *Vestnik RUDN*, series *Ecology and Life Safety*, 2013, No. 5, pp. 84–88.
16. Pikovsky Y.I. et al., Problem of diagnostics and rationing of soil pollution by oil and oil products, *Pochvovedenije*, 2003, No. 9, pp. 1132–1140.
17. Register of indicators of quality of soils of agricultural lands of the Russian Federation. R33 Version 1.0, Ivanovo: PresSto, 2021, 260 p., DOI: [10.51961/9785604637401](https://doi.org/10.51961/9785604637401).
18. Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, facilities and other objects. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1.1200-03.
19. List of countries by length of motorway network. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
20. Trofimov S.Y., Rozanova M.S., Changes in soil properties under the influence of oil pollution, In: *Degradation and protection of soils.*, Moscow: Izd-vo MSU, 2002, pp. 359–373.

21. Farakhova I.Z., *Agrohimicheskie svoystva i priemy rekul'tivacii neftezagryznennyh seryh lesnyh pochv Predkam'ja Respubliki Tatarstan: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Agrochemical properties and methods of recultivation of oil polluted gray forest soils of Predkamyje of the Republic of Tatarstan, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis, 06.01.04), Kazan', 2009, 25 p.

22. Stolbovoi V., McCallum I., *Land Resources of Russia*, IIASA & RAS, CD-ROM, Laxenburg, 2002, URL:

http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/soil.htm.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-21-47



Ссылки для цитирования:

Гафурова Л.А., Савин И.Ю., Джалилова Г.Т. Обновление почвенной карты горных районов Узбекистана // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 21-47. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-21-47

Cite this article as:

Gafurova L.A., Savin I.Yu., Djalilova G.T., Updating of soil map of mountaneous regions of Uzbekistan, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 21-47, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-21-47

Благодарность:

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

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of realization of the most important innovative project of state importance “Development of a system of ground and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system of accounting data on the fluxes of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6).

Обновление почвенной карты горных районов Узбекистана

© 2024 г. Л. А. Гафурова^{1*}, И. Ю. Савин^{2,3**},
Г. Т. Джалилова¹

¹Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Узбекистан,
100174, Ташкент,

* <https://orcid.org/0000-0002-9760-3718>.

²ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
^{**}<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12.

Поступила в редакцию 21.06.2023, после доработки 11.07.2023,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Одно из последних обновлений сведений о почвенном покрове горных регионов Узбекистана содержится в “Атласе почвенного покрова Республики Узбекистан”, изданном в 2010 г. В нем приведены почвенные карты регионов страны в масштабах от 1 : 350 000 до 1 : 2 500 000 и дана краткая характеристика почв. Атлас был составлен на основе традиционных методов картографирования почв. В результате его контурная часть, традиционно для карт подобного масштаба, достаточно схематична. Цель исследований – обновление контурной части почвенных карт горных территорий Узбекистана, содержащихся в этом Атласе, на основе анализа их изображения на спутниковых данных Landsat 8. Обновлялась контурная часть карты на территории с абсолютной высотой местности более 900 м. Обновления контуров карты проводились на основе методов интерактивного косвенного дешифрирования, при котором границы контуров уточнялись в ГИС с использованием в качестве подложки цветowych композитов спутниковых данных, полученных в оптимальные сроки съемки. Корректировка карты, выделение горных территорий, и подсчет площадей были выполнены с использованием пакета прикладных программ ГИС ILWIS v.3.3. Около 18% всех выделов почвенной карты были разделены на несколько составляющих. У 37% выделов границы изменились существенно (площадь выдела – более чем на 30% при изменении длины границы в среднем на 15–38%). У 45% выделов границы изменились не столь значительно (площадь выдела – не более чем на 30% при изменении длины границы не более чем на 20%). Не установлено ни одного случая слияния почвенно-картографических выделов. В результате контурная часть скорректированной карты, в сравнении с исходной картой, стала значительно детальней и с большей изрезанностью границ. На обновленной карте показан естественный почвенный покров без учета антропогенного изменения почв. Но использованный подход к обновлению карты может включать в себя и дополнение карты этой информацией в том числе, так как она может быть получена путем дешифрирования по тем же спутниковым данным, которые были использованы для обновления.

Ключевые слова: косвенное дешифрирование почв; горные почвы; Узбекистан; Landsat 8; почвенная карта.

Updating of soil map of mountainous regions of Uzbekistan

© 2024 L. A. Gafurova^{1*}, I. Yu. Savin^{2,3**}, G. T. Djalilova¹

¹National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,
100174 Tashkent, the Republic of Uzbekistan,
^{*}<https://orcid.org/0000-0002-9760-3718>.

²Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
^{**}<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

³Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

Received 21.06.2023, Revised 11.07.2023, Accepted 07.02.2024

Abstract: One of the latest updates on the soil cover of the mountain regions of Uzbekistan is contained in the “Atlas of the Soil Cover of the Republic of Uzbekistan”, published in 2010. It contains soil maps of the regions of the country at the scales of 1 : 350 000 to 1 : 2 500 000 and provides brief characteristics of the soils. The Atlas was compiled on the basis of traditional methods of soil mapping. As a result, its contour part is typical of maps of the mentioned scales and rather schematic. The aim of the research was to update the contour part of the soil maps of mountain territories of Uzbekistan, contained in this Atlas, by means of the analysis of Landsat 8 satellite data. The contour part of the map was updated for the territory with absolute terrain altitude exceeding 900 m. Updating of the map contours was based on the methods of interactive indirect interpretation, when the boundaries of the contours were specified in the GIS using as a substrate the color composites of satellite data obtained at the optimal time of survey. Map correction, mountainous area delineation, and area counting were performed using the GIS ILWIS v.3.3 software package. About 18% of all soil mapping units were divided into several subunits. For 37% of the soil mapping units the boundaries changed significantly (the area of the units changed – by more than 30% with an average change in the length of the boundary of 15–38%). For 45% of soil mapping units the boundaries had changed less significantly (the area of the units had changed by no more than 30% and the boundary length had changed by no more than 20%). No cases of merging of soil mapping

units were recorded. As a result, the contour part of the corrected map, compared to the original one, became much more detailed with more indented boundaries. The updated map shows the natural soil cover, excluding the anthropogenically changed soils. But the approach used for updating the original soil map may be also applied to expand the information on anthropogenical load as well. Moreover, this information can be obtained by interpretation of the same satellite data that were used for the map updating.

Keywords: indirect soil interpretation; mountain soils; Uzbekistan; Landsat 8; soil map.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенная карта аккумулирует знания почвоведов о географии почв того или иного региона. Без нее невозможно решение большей части задач практического почвоведения (Савин, 2020). Традиционный процесс составления почвенных карт трудоемок и затратен по времени. Он требует большого количества полевых работ и лабораторных исследований почвенных образцов. С внедрением в процесс почвенного картографирования спутниковых данных появилась возможность оперативного и низкозатратного обновления почвенных карт. При этом обновление может быть проведено на разных уровнях детальности по мере накопления новых данных и знаний о географии почв. Самым низкозатратным и оперативным может быть обновление контурной части почвенной карты без существенного изменения содержательной части почвенно-картографических выделов. При наличии достаточного количества новых данных могут быть сделаны попытки обновления и содержательной части карты. В основном такое обновление проводится для районов, значительно освоенных в сельскохозяйственном отношении, для которых, как правило, регулярно собирается новая информация о состоянии почв, и в советское время регулярно проводилось пересоставление почвенных карт (Савин и др., 2019).

Почвенный покров Республики Узбекистан исследуется уже давно (Панкова и др., 2022) и поэтому изучен достаточно полно. Но в основном это касается почв сельскохозяйственных земель. Почвенный покров горных территорий страны изучен в гораздо меньшей степени. Так, с 1980 г. под руководством Х.Х. Абдуллае-

ва изучались почвы горных образований Чаткала (Назаров, 1987), под руководством Л. Турсунова изучались почвы горных регионов Туркестана (на примере Зааминского “Народного парка” и Зааминского заповедника) (Турсунов и др., 2009). Изучению горных почв республики также были посвящены работы А. Турабаева (2011), М. Фахрутдиновой (2014), Г. Джалиловой (2018), Алибоевой (2022) и других исследователей.

Одно из последних обновлений сведений о почвенном покрове горных регионов Узбекистана содержится в “Атласе почвенного покрова Республики Узбекистан”, изданном в 2010 г. (Атлас..., 2010). В нем приведены почвенные карты регионов страны в масштабах от 1 : 350 000 до 1 : 2 500 000 и дана краткая характеристика почв. Атлас был составлен на основе традиционных методов картографирования почв. В результате его контурная часть, традиционно для карт подобного масштаба, достаточно схематична.

Цель исследований состояла в обновлении контурной части почвенных карт горных территорий Узбекистана, содержащихся в этом Атласе, на основе анализа их изображения на спутниковых данных Landsat OLI 8.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований выступет почвенный покров горных территорий Республики Узбекистан. К горным были отнесены все территории с абсолютной высотой более 900 м над уровнем моря. Выделение горных территорий было проведено с использованием цифровой модели местности SRTM, полученной по данным радарной спутниковой съемки в 2000 г., которая содержит информацию об абсолютной высоте земной поверхности с пространственным разрешением 90 м на местности и декларируемой погрешностью ± 14 м (Reuter et al., 2007).

Максимальные отметки абсолютной высоты горных вершин составляют около 4 000 м. Чаткальский и Кураминский хребты в пределах Узбекистана сложены интрузивными и эффузивными породами. Интрузивы представлены преимущественно гранитами, гранодиоритами и диоритами, а эффузивы – разнообразными порфирами, порфиритами и их туфами.

Осадочные породы палеозоя представлены небольшими разорванными и сильно измятыми свитами известняков, реже сланцев и песчаников.

Очень большие площади в предгорьях и низкогорьях страны занимают морские верхнемеловые и палеогеновые отложения. Эти отложения представлены в нижней части песчаниками и конгломератами, а в верхней – палеогеновыми известняками (Mirkhaydarova, Sodikova, 2020). Отложения эти в контакте с подгорными равнинами сильно размыты и прикрыты толщей кирпично-красных континентальных неогеновых песчаников и конгломератов. Эти породы занимают большие площади в предгорьях и слагают верхние размытые террасы Ангрена и Чирчика. Сверху эти отложения покрыты четвертичными конгломератами, а в области предгорий и низкогорий – галечниками и лёссами (Juliev et al., 2023).

Широко развиты процессы эрозии и солифлюкции, которые формируют делювиальные и пролювиальные отложения в нижних частях склонов гор и в горных долинах. Все это предопределяет широкий спектр почвообразующих пород, представленных на территории исследований: от элювия коренных пород различного состава до неогеновых глинистых и суглинистых отложений и до делювиальных отложений четвертичного возраста (Nabieva, 2008; Раупова, Абдуллаев, 2018).

Специфика почвообразующих пород и хорошая выраженность высотной изменчивости климата приводит к преобладанию на территории исследований естественной растительности (Gafurova, Ergasheva, 2020).

В предгорьях и низкогорьях преобладают растительные ассоциации с участием различных видов многолетников: фломис, кузиния, ферула, катран, эремурус. Местами встречаются заросли фисташников и миндаля. Растительность низкогорий и среднегорий представлена эфирномасличными и дубильными растениями: шалфеем, зизифорой, чабрецом, душицей, зверобоем, ревенем, горцем, щавелем. Горные леса сохранились на труднодоступных небольших участках, где распространены арчовники: древовидный можжевельник, зарафшанская и полушаровидная арча. Среди лиственных деревьев в низкогорный районах произрастают турке-

станский клен, алыча, яблоня, боярышник, фисташники и миндаль. В районах с повышенной влажностью можно встретить орех грецкий, березу, тополь, иву, тутовник, магалебскую вишню. В предгорьях Гиссарского хребта встречаются субтропические деревья: сумах, гранат, инжир, хурма. Высокогорные пояса заняты в основном субальпийскими и альпийскими лугами и степями, но встречаются также и туркестанская арча, жимолость, шиповник. На заснеженных горных вершинах, среди каменистых образований растительность скудная. Она представлена небольшими участками низкотравных ковровых альпийских лугов из первоцветов, остролодки, горечавки, лютиков, различных луков, мытников, лапчатки (Gafurova et al., 2020).

Все это обуславливает большое разнообразие почв, которые сформировались в описанных выше условиях. Согласно Почвенной карте Узбекистана (Атлас..., 2010) на территориях гор страны преобладают следующие почвы:

- Светло-бурые лугово-степные высокогорные почвы.
- Светло-бурые лугово-степные высокогорные почвы в сочетании с болотно-луговыми и торфяно-болотными почвами.
- Светло-бурые лугово-степные и примитивные и дельты выноса коллювия светлые.
- Бурые горно-лесные почвы.
- Коричневые почвы (в том числе карбонатные, слабокарбонатные, выщелоченные, глубоковыщелоченные, типичные).
- Галечники и песчано-галечниковые отложения.
- Выходы коренных пород, осыпи.
- Ледники, снежники и примитивные горные.

Все перечисленные выше почвы в той или иной мере каменистые, щебнистые и разные по мощности мелкоземистой толщи.

Территория исследований (горы) мало освоена в сельскохозяйственном отношении. Лишь в нижней части горных массивов на территорию исследований местами заходят пахотные угодья. Преобладает естественная растительность, тип и состояние которой тесно связано с особенностями климата, почв и почвообразу-

ющих пород (Ташкузиев, Шадиева, 2020). Это открывает широкие возможности для использования изображения растительности на спутниковых данных в качестве индикатора почв и почвенного покрова территории исследований.

Метод косвенного дешифрирования почв по характеру изображения естественной растительности широко использовался в практике визуального дешифрирования в 80–90-е годы прошлого века (Андроников, 1979). И в настоящее время многие алгоритмы автоматизированного распознавания почв на территориях, покрытых растительностью, основаны именно на индикационной роли растительности (Савин и др., 2019). Известно, что автоматизированное дешифрирование почв по характеру изображения растительности более оперативно и технологично, в сравнении с визуальным или интерактивным дешифрированием, но оно также имеет целый набор недостатков, которые до сих пор так и не были устранены. Основным из них является то, что незначительные нарушения естественной растительности человеком (вырубки) или природными факторами (пожары, ветровалы) не приводят к кардинальной смене почвенного покрова, но на спутниковых данных изображение подобных объектов сильно отличается от естественной растительности и часто интерпретируется автоматизированными алгоритмами как иные почвы, что приводит к ошибкам дешифрирования и картографирования. Подобные недостатки легко элиминируются экспертом-дешифровщиком при визуальном дешифрировании. Поэтому при дешифрировании неоднородностей естественной растительности на сравнительно небольших территориях визуальные методы до сих пор часто дают более адекватные результаты, чем полностью автоматизированные подходы.

В наших исследованиях мы опирались на визуальное экспертное дешифрирование. В качестве основы для дешифрирования использовались композитные изображения, полученные со спутника Landsat OLI 8 в разные сроки съемки и с разными наборами каналов съемки, выбранными для создания композитов. Всего было проанализировано 32 композитных изображения за период 2018–2022 гг. Данные имеют пространственное разрешение 30 м и доступны в 9 каналах съемки видимого и инфракрасного диапазонов. Для анализа использовались каналы с 1-го по 7-ой (с

синего до ближнего инфракрасного).

Оптимальная дата съемки и набор каналов съемки для создания композита определялись индивидуально для разных участков территории исследований с учетом типа преобладающей растительности и ее фенологического состояния.

Использованная процедура обновления карты представлена в обобщенном виде на рисунке 1.

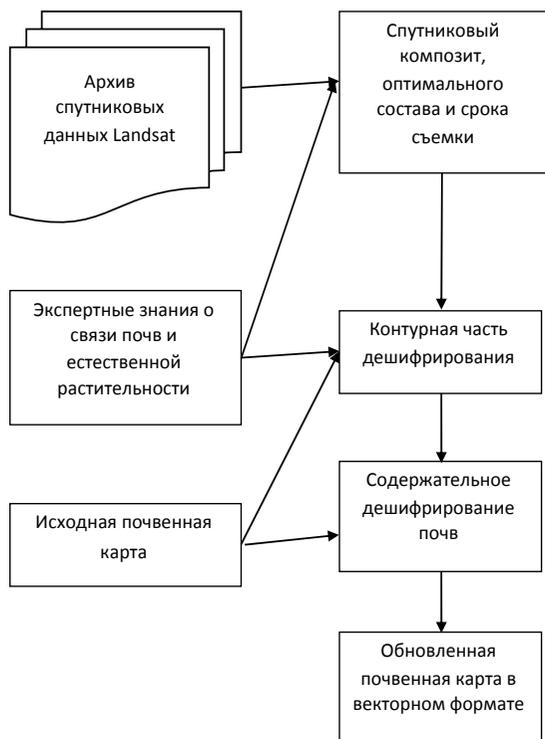


Рис. 1. Последовательность обновления почвенной карты.

Fig. 1. Flowchart of the soil map updating.

В основе данного подхода лежит попытка коррекции (уточнения) границ существующей почвенной карты. Эксперт, зная

особенности почвенно-ландшафтных связей на территории исследований, сопоставляет расположение контура на исходной почвенной карте с характером изображения земной поверхности на спутниковом композите и уточняет его границу путем визуального дешифрирования на экране монитора в ГИС. При необходимости контур почв, существующий на исходной карте, мог делиться на части с учетом его изображения или детализироваться.

Содержательная часть контура в большинстве случаев сохранялась такой же, как и на исходной карте, но при необходимости могла быть скорректирована с учетом изображения подобных почв в других контурах карты.

Таким образом, основной акцент был сделан на корректировке (уточнении) границ почвенно-картографических выделов исходной почвенной карты.

Непосредственно корректировка карты, выделение горных территорий и подсчет площадей были выполнены с использованием пакета прикладных программ ГИС ILWIS v.3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 показаны горные территории в Республике Узбекистан. Их площадь в Узбекистане, согласно полученным данным, составляет 36 247.24 тыс. км², или 8.07% от площади всей территории республики.

Все участки гор сосредоточены на востоке страны в 9 провинциях (табл. 1).

Всего на исходной почвенной карте горных территорий Республики Узбекистан (Атлас..., 2010) показано 237 почвенно-картографических выделов. Практически у всех из них в результате дешифрирования границы были уточнены. Но уточнение произошло в разной степени. Так, около 18% всех выделов в результате уточнения границ были разделены на несколько подвыделов. У 37% выделов границы изменились существенно (площадь выдела изменилась более чем на 30% при изменении длины границы в среднем на 15–38%). У 45% выделов границы изменились не столь значительно (площадь выдела изменилась не более чем на 30% при изменении длины границы не более чем на 20%). Не установ-

лено ни одного случая слияния почвенно-картографических выделов.

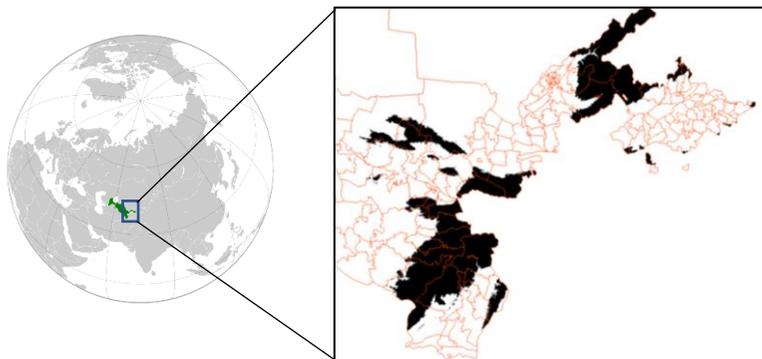


Рис. 2. Горные районы в восточной части Узбекистана (черный цвет, оранжевые линии – административные границы страны).

Fig. 2. Mountaneous regions of eastern part of Uzbekistan (black color, orange lines – administrative boundaries).

Таблица 1. Площадь горных регионов в провинциях Узбекистана
Table 1. Mountaneous regions acreage in the provinces of Uzbekistan

Провинция	Площадь горных регионов, км ²	Процент от площади провинции
Андижан	104.88	2.41
Джизак	4 639.42	21.18
Кашкадарья	8 191.01	31.42
Навои	1 105.42	3.34
Наманган	2 806.33	37.47
Самарканд	3 081.71	18.58
Сурхандарья	7 971.07	40.67
Ташкент	8 011.73	52.13
Фергана	335.68	4.94

В результате контурная часть скорректированной карты, в сравнении с исходной картой, стала значительно детальнее с большей изрезанностью границ (рис. 3). Большая детальность границ обусловлена высоким пространственным разрешением спутниковых данных и точным отображением на них растительного покрова и особенностей рельефа территории исследований (Djalilova et al., 2021).

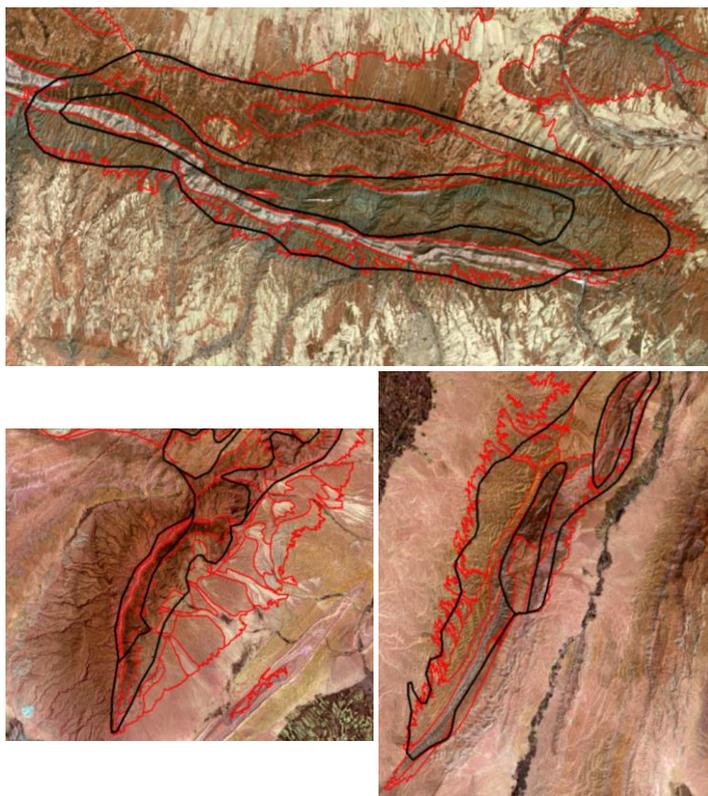


Рис. 3. Примеры результатов дешифрирования границ почвенно-картографических выделов (черный цвет – выделы исходной почвенной карты, красные линии – уточненные границы выделов).

Fig. 3. Examples of detection of boundaries of soil mapping units (black lines – units of original soil map, red lines – corrected soil mapping units).

В последнее время основной акцент при использовании спутниковых данных для картографирования почв делается на внедрении автоматизированных методов дешифрирования (Симакова, 2014; Savin et al., 2019), или на использовании этой информации в качестве одного из входных типов данных в технологиях цифрового картографирования почв (Цифровая..., 2012).

Но использование в нашем случае методов визуального интерактивного дешифрирования оказалось вполне оправданным. В первую очередь это связано с тем, что территория исследований не слишком велика, что предопределило сравнительно небольшое время, затраченное на контурное дешифрирование. Кроме того, разработка надежных алгоритмов автоматизированного детектирования того или иного типа растительности по снимкам оказалась сложной задачей из-за антропогенного влияния на растительность региона (вырубки, пожары, наличие участков вторичной растительности и др.), а также из-за влияния затененности изображения растительности на склонах гор разной пространственной ориентации и крутизны (Симакова, 2014).

Анализ полученных данных показал, что выделение горных регионов по отметке абсолютной высоты 900 м не является точным. В результате в список почв горных регионов Узбекистана попали и почвы, которые, судя по их названию и описанию (Атлас..., 2010), не относятся к горным. Таких случаев оказалось немного (всего 6), но это является свидетельством неопределенности понятия “горные регионы”. Использование дополнительно, например, такого критерия как крутизна склонов, приведет к изменению внешней границы выделов горных массивов, что, в свою очередь, выразится и в изменении площадей горных почв на территории страны.

Обновленная почвенная карта горных регионов Узбекистана в уменьшенном виде представлена на рисунке 4, а содержание атрибутивной части базы данных представлено – в таблице 2. Всего карта содержит 760 почвенно-картографических выделов 99 типов, что в 3.2 раза больше, чем было на исходной бумажной почвенной карте.

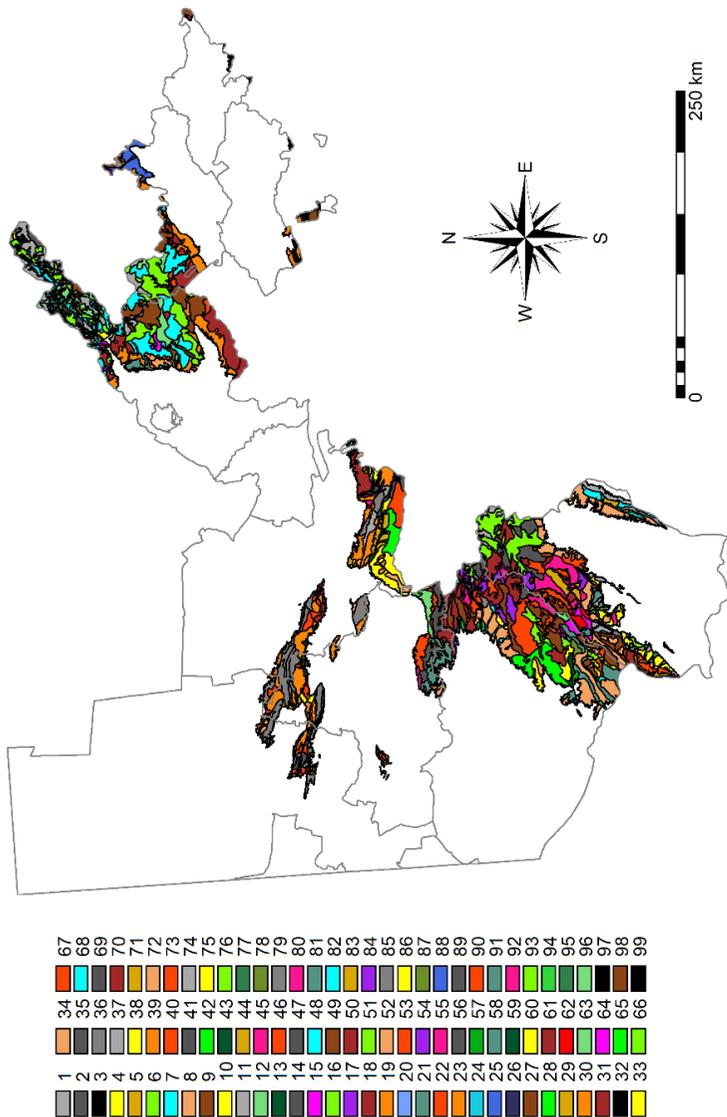


Рис. 4. Визуализация обновленной почвенной карты горных регионов Республики Узбекистан (легенда см. табл. 2).

Fig. 4. Visualisation of the updated soil map of the mountainous regions of the Republic of Uzbekistan (look at table 2 for legend).

Таблица 2. Атрибутивная база данных
Table 2. Attributive data base

Номер выдела на карте	Название преобладающей почвы	Грансостав	Эродированность	Наличие подстилки	Каменистость и щебнистость	Название сопутствующей почвы	Грансостав сопутствующей почвы	Эродированность сопутствующей почвы	Наличие подстилки у сопутствующей почвы	Каменистость и щебнистость сопутствующей почвы
1	31	99	1	6	7	99	99	99	99	99
2	31	99	1	6	7	99	99	99	99	99
3	30	99	1	6	7	99	99	99	99	99
4	3	2	1	6	7	99	99	99	99	99
5	30	99	1	6	7	99	99	99	99	99
6	2	2	1	1	4	99	99	99	99	99
7	9	5	12	1	4	99	99	99	99	99
8	12	2	6	2	6	99	99	99	99	99
9	10	8	12	6	4	99	99	99	99	99
10	4	2	6	6	6	99	99	99	99	99
11	30	99	1	6	7	99	99	99	99	99
12	3	2	1	6	7	9	5	12	1	4
13	3	2	1	6	7	4	2	6	6	6
14	3	2	1	6	7	30	99	99	1	4
15	9	5	12	1	4	12	2	6	2	6
16	16	2	10	6	6	99	99	99	99	99
17	14	2	6	2	4	99	99	99	99	99
18	11	8	7	6	5	99	99	99	99	99
19	15	2	10	6	7	99	99	99	99	99
20	17	2	10	4	6	99	99	99	99	99
21	17	2	2	4	6	99	99	99	99	99
22	9	5	12	1	4	10	8	12	6	4
23	11	8	7	6	5	15	2	10	6	1
24	26	8	1	4	7	99	99	99	99	99

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Номер выдела на карте	Название преобладающей почвы	Грансостав	Эродированность	Наличие подстилки	Каменность и щебнистость	Название сопутствующей почвы	Грансостав сопутствующей почвы	Эродированность сопутствующей почвы	Наличие подстилки у сопутствующей почвы	Каменность и щебнистость сопутствующей почвы
25	25	3	1	4	7	99	99	99	99	99
26	29	99	1	6	7	99	99	99	99	99
27	3	2	1	6	7	30	99	99	1	4
28	23	5	3	6	7	99	99	99	99	99
29	21	8	10	6	7	99	99	99	99	99
30	15	99	10	6	5	99	99	99	99	99
31	18	99	10	6	5	99	99	99	99	99
32	30	99	1	6	7	99	99	99	99	99
33	21	3	5	6	7	99	99	99	99	99
34	16	10	10	6	2	99	99	99	99	99
35	1	9	8	6	4	31	99	99	1	4
36	7	99	10	1	4	99	99	99	99	99
37	9	6	3	6	2	99	99	99	99	99
38	8	6	3	6	1	99	99	99	99	99
39	9	6	3	6	2	7	99	10	1	4
40	9	6	3	6	2	1	9	8	1	4
41	7	99	10	1	4	30	99	99	1	4
42	1	9	8	6	4	9	6	3	6	2
43	19	99	6	6	5	99	99	99	99	99
44	15	99	10	6	5	17	2	3	3	1
45	21	10	8	6	2	99	99	99	99	99
46	7	99	10	1	4	15	99	10	6	5
47	2	9	1	6	5	99	99	99	99	99
48	28	3	1	6	6	99	99	99	99	99

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Номер выдела на карте	Название преобладающей почвы	Грансостав	Эродированность	Наличие подстилки	Каменистость и щебнистость	Название сопутствующей почвы	Грансостав сопутствующей почвы	Эродированность сопутствующей почвы	Наличие подстилки у сопутствующей почвы	Каменистость и щебнистость сопутствующей почвы
49	8	5	11	1	4	99	99	99	99	99
50	8	5	10	6	1	99	99	99	99	99
51	1	9	8	6	4	99	99	99	99	99
52	15	3	10	6	3	99	99	99	99	99
53	9	6	12	6	5	99	99	99	99	99
54	9	6	12	6	5	2	9	99	1	1
55	9	6	12	6	5	8	5	11	1	4
56	1	9	1	6	7	9	5	12	6	5
57	22	8	3	6	2	99	99	99	99	99
58	15	3	10	6	4	99	99	99	99	99
59	21	8	5	6	2	99	99	99	99	99
60	16	8	4	6	2	99	99	99	99	99
61	8	5	11	1	4	15	3	10	6	3
62	8	5	11	1	4	8	5	10	6	1
63	13	5	6	2	2	99	99	99	99	99
64	8	5	10	6	1	13	5	6	2	2
65	15	3	10	6	3	16	4	4	6	2
66	16	4	4	6	2	15	3	10	6	3
67	16	8	10	6	2	99	99	99	99	99
68	8	5	11	1	4	16	4	4	6	2
69	1	9	10	1	4	99	99	99	99	99
70	5	1	12	1	3	99	99	99	99	99
71	6	99	10	6	4	99	99	99	99	99
72	16	8	9	6	4	99	99	99	99	99

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Номер выдела на карте	Название преобладающей почвы	Грансостав	Эродированность	Наличие подстилки	Каменность и щебнистость	Название сопутствующей почвы	Грансостав сопутствующей почвы	Эродированность сопутствующей почвы	Наличие подстилки у сопутствующей почвы	Каменность и щебнистость сопутствующей почвы
73	6	99	9	6	4	16	4	9	6	4
74	18	99	10	1	5	99	99	99	99	99
75	18	6	10	6	4	99	99	99	99	99
76	18	6	12	6	4	24	99	10	1	5
77	18	99	10	1	5	27	11	99	6	1
78	22	10	1	4	7	99	99	99	99	99
79	18	6	12	6	4	18	99	10	1	5
80	24	99	10	1	5	99	99	99	99	99
81	21	2	8	6	4	99	99	99	99	99
82	15	99	10	6	5	99	99	99	99	99
83	5	1	12	1	3	6	99	10	6	4
84	16	8	9	6	4	5	1	12	1	3
85	8	5	10	6	1	15	3	10	6	3
86	15	3	10	6	3	18	4	10	6	1
87	15	3	10	6	3	22	4	3	6	2
88	18	4	10	6	7	99	99	99	99	99
89	8	99	9	1	4	99	99	99	99	99
90	15	99	9	6	5	99	99	99	99	99
91	15	99	10	6	5	22	4	8	4	1
92	18	99	9	1	5	99	99	99	99	99
93	20	8	8	4	2	99	99	99	99	99
94	22	5	2	6	7	99	99	99	99	99
95	23	8	6	4	7	99	99	99	99	99
96	22	8	8	2	7	22	5	2	6	1

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Номер выдела на карте	Название преобладающей почвы	Грансостав	Эродированность	Наличие подстилки	Каменность и щебнистость	Название сопутствующей почвы	Грансостав сопутствующей почвы	Эродированность сопутствующей почвы	Наличие подстилки у сопутствующей почвы	Каменность и щебнистость сопутствующей почвы
97	23	8	1	5	7	99	99	99	99	99
98	15	7	12	6	7	99	99	99	99	99
99	30	99	1	6	7	99	99	99	99	99

Использованное кодирование названий почв и их свойств приведено ниже:

Код почвы	Названия почв
1	Светло-бурые лугово-степные высокогорные почвы
2	Светло-бурые лугово-степные высокогорные почвы в сочетании с болотно-луговыми и торфяно-болотными почвами
3	Светло-бурые лугово-степные и примитивные и дельты выноса коллювия светлые
4	Бурые горно-лесные почвы
5	Коричневые почвы
6	Коричневые слабокарбонатные и выщелоченные почвы
7	Коричневые слабокарбонатные и типичные почвы
8	Коричневые слабокарбонатные почвы
9	Коричневые типичные почвы

Код почвы	Названия почв
10	Коричневые глубоковыщелоченные почвы
11	Коричневые карбонатные и слабовыщелоченные почвы
12	Богарные коричневые почвы
13	Богарные коричневые слабокарбонатные почвы
14	Условно-орошаемые коричневые почвы
15	Темные сероземы
16	Богарные темные сероземы
17	Новоорошаемые темные сероземы
18	Типичные сероземы
19	Типичные сероземы с участками сероземно-луговых и луговых почв
20	Типичные сероземы, местами сероземно-луговые
21	Богарные типичные сероземы
22	Новоорошаемые типичные сероземы
23	Старорошаемые типичные сероземы
24	Светлые сероземы
25	Новоорошаемые луговые аллювиальные почвы
26	Старорошаемые луговые аллювиальные почвы
27	Новоорошаемые луговые сазовые почвы
28	Старорошаемые луговые сазовые почвы
29	Галечники и песчано-галечниковые отложения
30	Выходы коренных пород, осыпи
31	Ледники, снежники и примитивные горные
99	Нет почвы

Код грансостава	Класс грансостава
1	глинистые и суглинистые
2	тяжелосуглинистые
3	тяжело- и среднесуглинистые
4	среднесуглинистые
5	средне- и тяжелосуглинистые
6	средне- и тяжелосуглинистые, глинистые
7	среднесуглинистые, реже щебневато-суглинистые
8	суглинистые
9	дресвяно-щебневато-суглинистые
10	средне- и легкосуглинистые
11	легко- и среднесуглинистые
99	нет данных

Код эродированности	Класс эродированности
1	несмытые
2	несмытые и слабосмытые
3	слабосмытые
4	слабосмытые и несмытые
5	слабосмытые, местами несмытые и намытые
6	слабо- и среднесмытые
7	слабо- и среднесмытые, местами сильносмытые
8	среднесмытые
9	средне- и слабосмытые
10	средне- и сильносмытые
11	сильносмытые
12	различной степени смытости
12	эродированные
99	нет данных

Код наличия подстилаяния	Класс присутствия подстилаяния
1	местами выходы коренных пород и осыпи
2	с 0.6–0.7 м подстилаются обломками коренных пород
2	местами с 0.5–1 м подстилаются обломками коренных пород
3	с 1.2–1.4 м подстилаяние щебнем
4	в пределах 1 м вскрываются галечники
4	с 0.3–0.9 м подстилаются галечником
4	с 0.5–1 м подстилаются галечником
5	с 1–2 м подстилаются галечником
6	нет подстилаяния
99	нет данных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе спутниковых снимков Landsat проведено обновление границ почвенно-картографических выделов почвенной карты горных регионов Республики Узбекистан. Список почв, отображенных на карте, был сохранен таким же, как на оригинальной бумажной карте. Обновленный вариант представлен в виде векторного слоя ГИС с атрибутивной базой данных.

На карте показан естественный почвенный покров, без учета антропогенного изменения почв. Но использованный подход к обновлению карты может включать в себя и дополнение карты этой информацией в том числе, так как она может быть получена путем дешифрирования по тем же спутниковым данным, которые были использованы для обновления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алибоева М.А., Жаббаров З.А., Фахрутдинова М.Ф. Влияние природных факторов на химические свойства горных почв (на примере почв Чаткальского государственного биосферного заповедника) //

Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 1. С. 10–15. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1252>.

2. Андроников В.Л. Аэрокосмические методы изучения почв. М.: Колос, 1979. 280 с.

3. Атлас почвенного покрова Республики Узбекистан. Ташкент, 2010. 44 с.

4. Джалилова Г.Т. Геоинформационный анализ эрозионных процессов в среднегорьях и низкогорьях Узбекистана (на примере почв Чаткальского и Туркестанского хребтов): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Ташкент, 2018. 53 с.

5. Назаров А.С. Почвы западных отрогов Чаткальского хребта (на примере почв Чаткальского горно-лесного государственного заповедника): Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Ташкент, 1987. 21 с.

6. Панкова Е.И., Ямнова И.А., Назарова Л.Ф., Соловьев Д.А., Исаев В.А. О работах Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 167–192. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-167-192](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-167-192).

7. Раупова Н.Б., Абдуллаев С.А. Горно-коричневые карбонатные почвы Западного Тянь-Шаня, их агрохимические свойства и гумусное состояние // Бюллетень науки и практики. 2018. № 2. С. 153–161.

8. Савин И.Ю. Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).

9. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я. Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.

10. Симакова М.С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. Вып. 74. С. 3–19. DOI: [10.19047/0136-1694-2014-74-3-19](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-3-19).

11. Ташкузиев М.М., Шадиева Н.И. Состав гумуса, гумусное состояние почв вертикальной зональности бассейна реки Санзар и изменение его под влиянием противоэрозионных процессов // Почвоведение и агрохимия. 2020. № 3. С. 25–33.

12. Турабаев А. Описание некоторых природных факторов, сохраняющих разнообразие горных коричневых почв (на примере Чаткальских и Нураатинских гор): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ташкент, 2011. 27 с.

13. Турсунов Л., Ханазаров А., Фахрутдинова М., Камилова Д. Горные почвы Узбекистана. Ташкент: “Турон-Икбол”, 2009. 232 с.

14. *Фахрутдинова М.Ф.* Фракционный и групповой состав горно-коричневые выщелоченные почвы // Вестник НуУЗ. 2014. № 3/2. С. 79–82.
15. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / ред. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Сорокина Н.П., Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Коношкова М.В.* М.: Почвенный институт, 2012. 333 с.
16. *Gafurova L.A., Ergasheva O.X.* Bioindication in ecological assessment of eroded soils in mountain areas // Journal of Critical Reviews. 2020. No. 7(2). P. 288–291. DOI: [10.31838/jcr.07.02.53](https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.53).
17. *Gafurova L.A., Djalilova G.T., Ergasheva O.X., Kadirova D.A.* Measures on erosion-preventive forest melioration in mountain areas of Uzbekistan // Journal of Critical Reviews. 2020. No. 7(2). P. 283–287. DOI: [10.31838/jcr.07.02.52](https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.52).
18. *Djalilova G., Mamatkulova F., Mamatkulova Z., Igamberdiyeva D., Eshquvatov Q.* Long-term monitoring of the vegetation cover of mountain territories in the GIS for soil and landscape study of territories // E3S Web Conf. 2021. Vol. 264. Article Number 01004. DOI: [10.1051/e3sconf/202126401004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401004).
19. *Juliev M., Ng W., Mondal I., Ergasheva O., Saidova M.* Surface displacement detection using object-based image analysis, Tashkent region, Uzbekistan // E3S Web Conf. 2023. Vol. 386. Article Number 04010. DOI: [10.1051/e3sconf/202338604010](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338604010).
20. *Mirkhaydarova G.S., Sodikova G.S.* Agrochemical properties of eroded mountain soils and ways to restore these properties // ISJ Theoretical & Applied Science. 2020. Vol. 06(86). P. 33–38. DOI: [10.15863/TAS.2020.06.86.6](https://doi.org/10.15863/TAS.2020.06.86.6).
21. *Nabieva G.M.* Soils of the western spurs of the Chatkal ridge and their enzymatic activity. Tashkent: NUU, 2008. 132 p.
22. *Reuter H.I., Nelson A., Jarvis A.* An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data // International Journal of Geographic Information Science. 2007. Vol. 21(9). P. 983–1008.
23. *Savin I.Y., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Y.* Modern trends and problems of soil mapping // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 5. P. 471–480.

REFERENCES

1. *Aliboeva M.A., Zhabbarov Z.A., Fahrutdinova M.F.*, Vliyanie prirodnih faktorov na himicheskie svoystva gornyh pochv (na primere pochv Chatkal'skogo gosudarstvennogo biosfernogo zapovednika) (Influence of natural factors on the chemical properties of mountain soils (on the example of

- soils Chatkal State Biosphere Reserve)), *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 2022, No. 1. pp. 10–15, URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1252>.
2. Andronikov V.L., *Ajerokosmicheskie metody izuchenija pochv* (Aerospace methods of studying soils), Moscow: Kolos, 1979, 280 p.
 3. Atlas pochvennogo pokrova Respubliki. Uzbekistan (Atlas of soil cover of the Republic of Uzbekistan), Tashkent, 2010, 44 p.
 4. Dzhaliilova G.T., *Geoinformacionnyj analiz jerozionnyh processov v srednegor'jah i nizkogor'jah Uzbekistana (na primere pochv Chatkal'skogo i Turkestanskogo hrebtov): Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Geoinformational analysis of erosion processes in the middle and low mountains of Uzbekistan (on the example of soils of Chatkal and Turkestan ranges), Extended abstract of Dr.biol. sci. thesis), Tashkent, 2018, 53 p.
 5. Nazarov A.S., *Pochvy zapadnyh otrogov Chatkal'skogo hrebta (na primere pochv Chatkal'skogo gorno-lesnogo gosudarstvennogo zapovednika): Avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk*, (Soils of the western spurs of the Chatkal Range (on the example of soils of the Chatkal Mountain Forest State Reserve), Extended abstract of cand. agric. sci. thesis) Tashkent, 1987, 21 p.
 6. Pankova E.I., Jamnova I.A., Nazarova L.F., Solov'ev D.A., Isaev V.A., On the works of the Dokuchaev Soil Science Institute in Uzbekistan, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 167–192, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-167-192](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-167-192).
 7. Raupova N.B., Abdullaev S.A., Gorno-korichnevye karbonatnye pochvy Zapadnogo Tjan'-Shanja, ih agrohimicheskie svoystva i gumusnoe sostojanie (Mountain brown carbonate soils of the Western Tien Shan, their agrochemical properties and humus state), *Bjulleten' nauki i praktiki*, 2018, No. 2, pp. 153–161.
 8. 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).
 9. Savin I.Yu., Stolbovoj V.S., Ivanov A.L., Prudnikova E.Yu., Zhogolev A.V., Voronin A.Ya., *Tehnologii sostavlenija i obnovlenija pochvennyh kart* (Technologies for compiling and updating soil maps), Moscow: Pero, 2019, 328 p.
 10. Simakova M.S., From visual aerial photo interpretation and field soil survey to automated decoding and soil mapping by satellite imagery, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, Vol. 74, pp. 3–19. DOI: [10.19047/0136-1694-2014-74-3-19](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-3-19).
 11. Tashkuziev M.M., Shadieva N.I., Sostav gumusa, gumusnoe sostojanie pochv vertikal'noj zonal'nosti bassejna reki Sanzar i izmenenie ego pod vlijaniem protivojerozionnyh processov (Humus composition, humus state of soils of vertical zonality of the Sanzar River basin and its change under the

influence of anti-erosion processes), *Pochvovedenie i agrohimiya*, 2020, No. 3, pp. 25–33.

12. Turabaev A., *Opisanie nekotorykh prirodnykh faktorov, sohranjajushhih raznoobrazie gornyh korichnevyykh pochv (na primere Chatkal'skih i Nuratinskih gor): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Description of some natural factors preserving the diversity of mountain brown soils (on the example of Chatkal and Nurata mountains), Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Tashkent, 2011, 27 p.

13. Tursunov L., Hanazarov A., Fahrutdinova M., Kamilova D., *Gornyye pochvy Uzbekistana* (Mountain soils of Uzbekistan), Tashkent: “Turon-Ikbol”, 2009, 232 p.

14. Fahrutdinova M.F., Frakcionnyj i gruppovoj sostav gorno-korichnevyeh vyshhelochennyykh pochv (), *Vestnik NuUZ*, 2014, No. 3/2, pp. 79–82.

15. Ivanov A.L., Savin I.Ju., Sorokina N.P., Samsonova V.P., Meshalkina Ju.L., Konjushkova M.V. (Eds), *Cifrovaja pochvennaja kartografija: teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil cartography: theoretical and experimental studies), Moscow: Pochvennyj institut, 2012, 333 p.

16. Gafurova L.A., Ergasheva O.X., Bioindication in ecological assessment of eroded soils in mountain areas, *Journal of Critical Reviews*, 2020, Vol. 7(2), pp. 288–291, DOI: [10.31838/jcr.07.02.53](https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.53).

17. Gafurova L.A., Djalilova G.T., Ergasheva O.X., Kadirova D.A., Measures on erosion-preventive forest melioration in mountain areas of Uzbekistan, *Journal of Critical Reviews*, 2020, Vol. 7(2), pp. 283–287, DOI: [10.31838/jcr.07.02.52](https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.52).

18. Djalilova G., Mamatkulova F., Mamatkulova Z., Igamberdiyeva D., Eshquvatov Q., Long-term monitoring of the vegetation cover of mountain territories in the GIS for soil and landscape study of territories, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 264, Article Number 01004, DOI: [10.1051/e3sconf/202126401004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401004).

19. Juliev M., Ng W., Mondal I., Ergasheva O., Saidova M., Surface displacement detection using object-based image analysis, Tashkent region, Uzbekistan, *E3S Web Conf.*, 2023, Vol. 386, Article Number 04010, DOI: [10.1051/e3sconf/202338604010](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338604010).

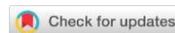
20. Mirkhaydarova G.S., Sodikova G.S., Agrochemical properties of eroded mountain soils and ways to restore these properties, *ISJ Theoretical & Applied Science*, 2020, Vol. 06(86), pp. 33–38, DOI: [10.15863/TAS.2020.06.86.6](https://doi.org/10.15863/TAS.2020.06.86.6).

21. Nabieva G.M., *Soils of the western spurs of the Chatkal ridge and their enzymatic activity*, Tashkent: NUU, 2008, 132 p.

22. Reuter H.I., Nelson A., Jarvis A., An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographic Information Science*, 2007, Vol. 21(9), pp. 983–1008.
23. 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.

УДК 638.47

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-48-78



Ссылки для цитирования:

Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Подзолисто-буроземные почвы Дальнего Востока на Почвенной карте РФ масштаба 1 : 2.5 млн и их корреляция с таксонами Классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 48-78. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-48-78

Cite this article as:

Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Podzolic-brown soils of the Far East on the Soil map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, and their correlation with soils in the Russian soil classification, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 48-78, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-48-78

Подзолисто-буроземные почвы Дальнего Востока на Почвенной карте РФ масштаба 1 : 2.5 млн и их корреляция с таксонами Классификации почв 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,

* <https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>, e-mail: anankotat@yandex.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>, e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru.

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

** <https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,
e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Поступила в редакцию 22.05.2023, после доработки 03.07.2023,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Подзолисто-буроземные почвы, показанные на Почвенной карте РФ масштаба 1 : 2.5 млн, распространены на равнинах и плато Дальнего Востока, Восточной буроземно-лесной области в схеме почвенно-географического районирования. В пределах своего ареала, в Приморье и Приамурье, они выделены на разных почвообразующих породах и в разных условиях климата и биоты. В Классификации почв России нет

прямых аналогов подзолисто-буроземным почвам. С целью определения их соответствия таксонам классификации был проведен анализ опубликованных материалов морфологических и физико-химических свойств подзолисто-буроземных почв (Н.А. Крейда; Г.И. Иванов; В.И. Росликова и др.; Н.М. Костенков, Е.А. Жарикова) с точки зрения корреляции с диагностическими критериями их возможных аналогов. Он показал, что в Приморье на щебнисто-суглинисто-глинистом элювиеделювии плотных пород подзолисто-буроземные почвы соответствуют сложному подтипу дерново-палево-элювиально-метаморфических почв, на суглинисто-глинистых озерно-аллювиальных и делювиальных отложениях подзолисто-буроземные почвы переводятся в темногумусовые подбелы. В Приамурье подзолисто-буроземные глееватые и глеевые почвы имеют черты как текстурно-дифференцированных почв с диагностическим горизонтом ВТ, так и почв с характерной криогенной структурой в срединном горизонте. В идеологии и номенклатуре классификации почв России подзолисто-буроземные глееватые почвы определены как перегнойно-подзолистые глееватые, подзолисто-буроземные глеевые почвы могут определяться как глееземы криометаморфические оподзоленные или как элювиально-метаморфические криометаморфизованные глееватые и глеевые почвы.

Ключевые слова: свойства почв; единицы легенды; аналоги в классификации почв России; разделение ареалов на карте.

Podzolic-brown soils of the Far East on the Soil map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, and their correlation with soils in the Russian soil classification

© 2024 T. V. Ananko^{1*}, M. I. Gerasimova^{1,2**}, N. V. Savitskaya^{1***}

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-7317-6790>, e-mail: anankotat@yandex.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-3218-6941>, e-mail: savitskaya_nv@esoil.ru.

²*Lomonosov Moscow State University,*

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,

e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Received 22.05.2023, Revised 03.07.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: Podzolic-brown forest soils on the Soil Map of Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, are widespread on the plains and plateaus of the Far East, referred to the Eastern brown-forest-soil area in the scheme of soil-geographical zoning. There, in Primorye and Priamurye regions, they are confined to various parent rocks and to different climatic and biota conditions. In the Classification of Soils of Russia (2004, 2008), there are no direct analogues of podzolic-brown soils in the map legend. To name these soils in the Russian classification system, regional publications (N.A. Kreida, G.I. Ivanov, V.I. Roslikova et al., N.M. Kostenkov, E.A. Zharikova) were reviewed: morphological and physicochemical properties of podzolic-brown soils were assessed in terms of their compliance with the diagnostic criteria of their possible analogues in the Russian system. The comparison has shown that in Primorye, on stony-loamy-clayey derivatives of hard rocks, podzolic-brown soils correspond to soddy-pale-eluvial-metamorphic soils with textural differentiation, on loamy-clayey lacustrine-alluvial and colluvial deposits – as dark-humus podbels. In the north, in Priamurye region, podzolic-brown gley soils have properties of both texture-differentiated soils with the BT diagnostic horizon and of soils with a specific cryogenic structure in the middle cryometamorphic horizon. In the ideology and nomenclature of the Russian classification system, the former are defined as mucky-podzolic gleyic soils, the latter soils, as depending on the intensity of surface gley and structure development, can be defined as cryometamorphic podzolized gleyzems, eluvial-metamorphic cryometamorphic gleyic soils, or gleyic svetlozems.

Keywords: soil properties; legend units; analogues in the Russian classification; separation of mapping units.

ВВЕДЕНИЕ

На основе исследований почв и почвенного покрова юга Дальнего Востока (Корнблум, Зимовец, 1961; Ливеровский, Рубцова, 1966; Иванов, 1966, 1967, 1976; Иванов и др., 1967; Крейда, 1967, 1968, 1970; Росликова, 1975) для не горных территорий (равнины, плато, мелкосопочник) под хвойно-широколиственными и широколиственными лесами были выделены два типа почв с дифференцированным профилем: подзолисто-бурые (подзолисто-буроземные), профиль $A_0-A_1-(A_1A_2)-A_2g-A_2Bg-BitBC-C$ и подзолисто-бурые глеевые, профиль $Ad-(A_1)-A_2g-A_2Bg-Big-BCg-Cg(G)$. Оба были включены в легенду и содержание Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн (ПКРФ) в составе двух сложных сдвоенных единиц: (1) дерново-палево-подзолистые и подзо-

листо-буроземные, (2) дерново-палево-подзолистые и подзолисто-буроземные глубоко глееватые и глеевые, – и в Классификацию и диагностику почв СССР 1977 г. (КП-77). На подтиповом уровне первые относились к слабо ненасыщенным длительно промерзающим умеренно теплым, вторые дополнительно разделялись по степени и локализации оглеения.

В работе по обновлению ПКРФ в идеологии и номенклатуре Классификации и диагностики почв России (КиДПР), как основы для создания унифицированной цифровой модели почвенного покрова России (Ананко и др., 2017), обе единицы легенды были разделены в соответствии с их ареалами на карте (рис. 1). Для западной части европейской России были приняты дерново-палево-подзолистые почвы (Подзолистые..., 1977; Ильичев, 1982; Тонконогов, 2010), для юга Дальнего Востока – подзолисто-буроземные почвы и их глубоко глееватые и глеевые варианты. Если в обеих версиях КиДПР (2004, 2008) есть прямой аналог дерново-палево-подзолистых почв, то в отношении подзолисто-буроземных почв возникли определенные трудности, которые и являются предметом обсуждения в данной статье.

В версию Классификации почв России 2004 г. в отдел текстурно-дифференцированных почв был введен тип текстурно-метаморфических почв с формулой профиля АУ-ELM-ВТ-С, который “в классификации 1977 г. примерно соответствует типу подзолисто-бурых лесных почв” (Классификация..., 2004, стр. 78). В строении профиля этого типа присутствовал элювиально-метаморфический диагностический горизонт ELM, который позднее не был включен в перечень диагностических горизонтов в “Полевом определителе...” за неопределенностью диагностики, а текстурно-метаморфические почвы заменены близкими к ним по свойствам дерново-буро-подзолистыми почвами с профилем АУ-BEL-ВТ-С, хотя в публикациях по Дальнему Востоку часто выделялись почвы с прежним названием (Голодная и др., 2010; Савенкова и др., 2010). В составе диагностических горизонтов этих двух типов почв отсутствует элювиальный горизонт EL, что не позволяет считать их аналогами подзолисто-буроземных почв. В КиДПР в отделе текстурно-дифференцированных почв среди подтипов дерново-подзолистых почв есть подтип сегрегационно-

отбеленные (подбелы светлые; профиль AY-ELnn-BEL-BT-C) в варианте классификации 2004 г., в варианте 2008 г. признак nn – “сегрегационно-отбеленные” переименован в “конкреционные”. Можно предположить, что подбелы светлые включают часть подзолисто-буроземных лесных почв Дальнего Востока. Имеющимся в КиДПР темногумусовым подбелам, в том числе глеевым, “более всего соответствуют в КП-77 оподзоленный и оподзоленно-глеевый подтипы луговых подбелов” (Классификация..., 2004, стр. 76–77). Таким образом, прямых аналогов подзолисто-буроземным почвам легенды ПКРФ в классификации почв России нет, и задачей данного исследования является поиск почв, адекватно представляющих их свойства.

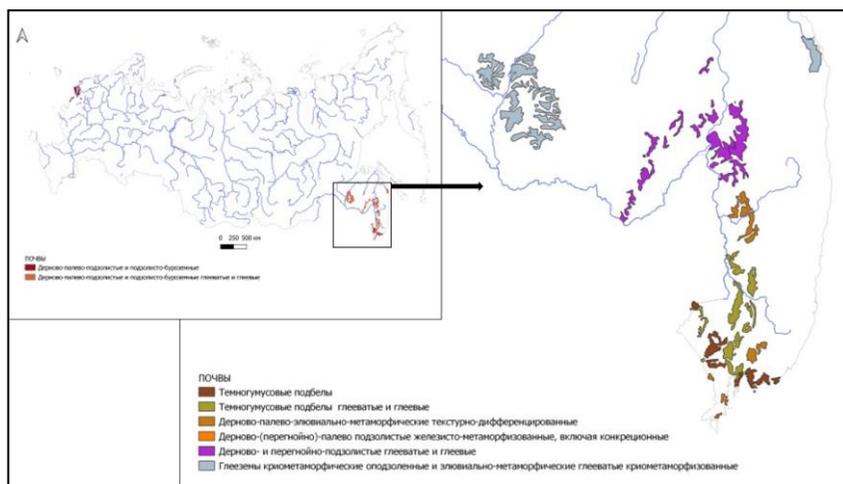


Рис. 1. Ареалы подзолисто-буроземных почв на карте РФ масштаба 1 : 2,5 М и интерпретация дальневосточного ареала в системе классификации почв России.

Fig. 1. Areas of podzolic-brown soils on the map of the Russian Federation scale 1 : 2,5 M and interpretation of soils of the Far Eastern mapping units in the Russian soil classification system.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В базе данных оцифрованной версии карты РФ имеется 11 полигонов подзолисто-буроземных почв на юге Приморского края. Ареал подзолисто-буроземных глубоко глееватых и глеевых почв шире и охватывает не только Приморский край, но и южные районы Амурской области и Хабаровского края; всего 52 полигона (рис. 1). Судя по карте и космическому снимку, рассматриваемые почвы формируются в разных литолого-геоморфологических условиях: на глинистых отложениях высоких увалов расчлененных древнеозерно-аллювиальных равнин и на вершинах и склонах останцовых возвышенностей, сложенных элювиально-делювиальными щебнистыми суглинисто-глинистыми отложениями – дериватами плотных пород. Значительная протяженность ареала подзолисто-буроземных почв, с юга на север и с востока на запад, определяет ряд различий и в биоклиматических факторах почвообразования. На юге, в Приморье, в условиях относительно теплого муссонного климата преобладают коренные широколиственные леса и вторичные остепненные дубовые леса и лесостепи (Колесников, 1956; Зоны и типы поясности..., 1999). В условиях холодного континентального климата, в криолитозоне, в Амурской области, ареалы подзолисто-буроземных глееватых и глеевых почв приходятся на подзону южно-таежных лиственничных лесов с марями в понижениях. Отмеченные различия приводят к значимым различиям в морфологических и физико-химических свойствах почв, следовательно, к их разной классификационной интерпретации. Обсуждение классификационных подходов основывается на анализе литературных материалов, в результате чего определились следующие дискуссионные вопросы.

1. Разделение подзолисто-буроземных почв и их глееватых и глеевых аналогов на разных породах и их место в классификации почв России.

2. Особенности диагностических свойств подзолисто-буроземных почв (в основном глубоко глееватых и глеевых) в северных и северо-западных частях ареала, в Приамурье, и, следовательно, место этих почв в классификации почв России.

Анализ свойств подзолисто-буроземных почв Приморского края на щебнисто-мелкоземистых дериватах плотных пород проводился по описаниям и аналитическим характеристикам 9 разрезов в работах Н.А. Крейды (1970) и В.И. Росликовой с соавторами (2010) (табл. 1). Подзолисто-буроземные почвы на тяжелых озерно-аллювиальных и делювиальных нещебнистых отложениях анализировались на примере 15 разрезов из работ Н.А. Крейды, Г.И. Иванова, В.И. Росликовой, Н.М. Костенкова и Н.А. Жариковой (табл. 2). Для определения классификационного положения подзолисто-буроземных глубоко глееватых и глеевых почв использовались описания 5 разрезов в Амурской области и Хабаровском крае (Иванов, 1976) (табл. 3).

Авторские описания профилей были немногочисленны, но достаточно детальны, как и аналитические материалы к ним, так что было возможно идентифицировать диагностические горизонты и признаки. Следующим шагом было обоснование предлагаемых названий почв на уровне типов и подтипов в соответствии с правилами классификации почв России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в почвообразующих породах послужили Н.А. Крейде основанием для разделения почв с дифференцированным профилем на подтиповом уровне на *подзолисто-буроземные на элюво-делювии плотных пород* и *буро-глееподзолистые типичные на древнеозерно-аллювиальных и делювиальных нещебнистых отложениях* (Крейда, 1970). Отмечалось, что “профиль почв на элюво-делювиях характеризуется меньшей мощностью и контрастностью, иногда сильной каменистостью, элювиальный горизонт содержит меньше марганцево-железистых конкреций, имеются морфологически выраженные признаки суспензионного переноса между иллювиальным горизонтом и почвообразующей породой” (Крейда, 1970, стр. 150). Аналогичные особенности профилей на разных породах отмечались Э.А. Корнблумом и Б.А. Зимовцом (1961).

Таблица 1. Морфологические и физико-химические свойства горизонтов подзолисто-буроземных почв на щебнисто-мелкоземистых дериватах плотных пород южного Приморского ареала (пределы колебаний) (по материалам Н.А. Крейды, В.И. Росликовой и др., Г.И. Иванова)

Table 1. Morphological and physico-chemical properties of horizons of podzolic-brown-earth soils on gravelly-fine-grained derivatives of dense rocks of the southern Primorsky area (limits of fluctuations) (based on the materials of N.A. Kreida, V.I. Roslikova et al., G.I. Ivanov)

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Сгк/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Орштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
A ₁	Серый, темно-серый; 5–10, реже до 15	Комковато-порошистая, комковатая	5.8	74–95	4.5–11.3	0.9–1.2	Легко-среднесуглинистый; 0–5	Нет	Нет	Темно-серые аллохтонные тонкие пленки	AУ(ао)
A ₁ A ₂	Светло-серый, серый, белесовато-палевый; 5–10	Комковато-порошистая, комковато-зернистая	5.6–5.8	80–84	3.7	0.7	Суглинистый; 5–10	Мало	Нет	Темно-серые аллохтонные пленки на бурых автохтонных	AУ(ао)/E1 (переходный)

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Стг/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Орштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
A ₂	Светло-палевый; 13–25	Плитчатая, слоистая, комковатая, ореховатая	5.6	80–99	1.5–3.5	0.4	Суглинистый или глинистый 5–15	Очень мало – б. к. мелких	Нет или очень слабые	Буровато-коричневые аллохтонные пленки на нижней поверхности агрегатов, серые – на верхней	ELf
A ₂ B	Светло-коричневый, палево-бурый; 7–20	Ореховатая	5.6	55–60	0.9	0.3–0.4	Суглинистый или глинистый 15–30	Мало	Нет или очень слабые	“Кремнезема мистая присыпка” (Скелетана)	EL/VT (переходный)

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Стг/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Ортштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КнДПР
В	Темно-коричневый, бурый, шоколадный; 20–35	Ореховатая, комковатая, глыбистая	4.8–5.8	85–95	0.4–1.4	0.1–0.2	Тяжелосуглинистый или глинистый, 30–50	Нет	Нет	Автохтонные пленки. Редкие глинистые аллохтонные пленки	BMtd
С	Желтовато-бурый, коричневый с охристыми пятнами	Ореховатая, чаще невыражена	5.6	Нет данных	0.5	0.04	Тяжелосуглинистый или глинистый	Нет	Нет или слабые	Глинистые суспензионные пленки на щебне	С

Примечание. *В таблицах 1–3 сохранена терминология авторов, а также индексы горизонтов.

Note. *Tables 1–3 retain the authors' terminology and horizon indices.

Таблица 2. Морфологические и физико-химические свойства горизонтов подзолисто-буроземных почв на тяжелых озерно-аллювиальных и делювиальных отложениях южного Приморского ареала (пределы колебаний) (по материалам Г.И. Иванова, В.И. Росликовой и др., Н.А. Крейды)

Table 2. Morphological and physico-chemical properties of horizons of podzolic-brown-earth soils on heavy lake-alluvial and deluvial deposits of the southern Primorsky area (limits of fluctuations) (based on the materials of G.I. Ivanov, V.I. Roslikova et al., N.A. Kreida)

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Сгк/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Орпштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
A ₁	Черный, темно-серый; 6–8	Мелкокомковатая, порошистая	5.5–6.4	90–99	4–6; 11–16	1.1–1.3	Средне-тяжелосуглинистый	Нет	Не отмечены	Не отмечены	AU(ao)
A _{2g}	Желтовато-белесый, белесый; 10–15	Слоистокомковатая, слоистая, листоватая, плитчатая	4.8–5.8	97–99	0.4–1.0	0.16–0.26	Средне-тяжелосуглинистый	Очень много, в том числе крупных	Слабые	По граням белесая “присыпка”	ELnn

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщен- ности	Гумус, %	Сгк/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля круп- нозема, %	Орштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
A ₂ B	Палево- бурый, белесо- бурый; 8–12	Призматичес- кислой- слоистая, призматичес- кая, орехо- ватая	4.6– 5.4	48–62	0.5– 1.2	0.66	Глинистый	Мало	Слабые	По граням белесая “присыпка”	EL/VT (пере- ход- ный)
B(g)	Темно- бурый, бурый; 20–30	Орехо- вато- призматичес- кая, призматичес- кая	4.6– 5.6	45–87	0.5– 1.2	0.25	Глинистый	Мало	Слабые	По граням “присып- ка”, глини- стые и тем- ные гуму- сово-гли- нистые пленки	BT(g)

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщен- ности	Гумус, %	Стг/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля круп- нозема, %	Орштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
С(g)	Сизо- вато- бурый, бурый	Сло- истая или бес- струк- турный	4.8– 6.0	73–99	0.3– 0.7	Нет дан- ных	Глинистый	Мало	Слабые	Не отме- чены	С(g)

Таблица 3. Морфологические и физико-химические свойства горизонтов подзолисто-буроземных глеевых почв северного Приамурского ареала (пределы колебаний) (по материалам Г.И. Иванова, А.Б. Гыниновой и др.).
Table 3. Morphological and physico-chemical properties of horizons of podzolic-brown-earth gley soils of the northern Amur area (limits of fluctuations) (based on the materials of G.I. Ivanov, A.B. Gyninova, etc.)

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Стк/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Орггтейны	Признаки оглесения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
A₁ (AoA₁)	Темно-серый; 5–10	Комковато-порошистая, не выражена	5.0–5.3 4.3–4.6	50–80	10.9–19.5	Нет данных	Тяжелосуглинистый	Нет	Не отмечены	Не отмечены	AO, H
GA₂	Сизо-желтый, сизопалевый, пестрый; 5–10	Монолитная, не выражена, слоеватая	4.7–5.1	42–74	0.5–1.4	Нет данных	Глинистый	Мало	Охристые и сизые пятна	Не отмечены	Ge, Elg

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт*	Цвет; мощность, см	Структура	pH _{водн}	Степень насыщенности	Гумус, %	Стк/Сфк	Гран.состав мелкозема; доля крупнозема, %	Оргштейны	Признаки оглеения в окраске	Кутаны	Горизонт по КиДПР
B_g	Сизо-палево-бурый, сизо-серый, бурый; 25–40	Призматическая, призматическо-слоистая, творожистая ореховатая	5.6–6.2	50–80	0.6–0.7	Нет данных	Глинистый	Мало	Охристые и сизые пятна	По граням-белесая "присыпка", темные коллоидные пленки	BT_g, BM_{crm},g CRM_g
C_g	Сизо-охристый, сизо-бурый	Структура не выражена	4.8–5.8	70–90	0.6	Нет данных	Глинистый	нет	Сизые и ржавые пятна	Не отмечены	C_g(G)

Г.И. Иванов (1976) также разделял на высоком таксономическом уровне почвы с дифференцированным профилем на дериватах плотных пород и на озерно-аллювиальных отложениях: первые он относил к *бурым лесным оподзоленным*, вторые – к *бурым отбеленным типичным*. В то же время В.И. Росликова с соавторами в Атласе почв юга Дальнего Востока (2010) независимо от почвообразующих пород называет все почвы Приханкайской низменности с осветленными горизонтами *подбелами лесными*. Ливеровский Ю.А. считал название “подбелы” наиболее правильным для дальневосточных почв и синонимом подзолисто-буроземных почв (Ливеровский, 1961). Разные подходы в номенклатуре в значительной степени отражали сложившуюся концепцию формирования суглинистых и глинистых почв с осветленным горизонтом, отличную от классических представлений о почвах западных регионов. Главное отличие заключается в том, что в дифференциации профиля дальневосточных почв основное значение придается поверхностному оглеению, активно развивающемуся в теплое время года. Переувлажнение обеспечивается муссонным режимом осадков в сочетании с поздним оттаиванием глубокопромерзающих почв тяжелого гранулометрического состава. Вследствие динамики окислительно-восстановительного потенциала происходит сильное осветление – отбеливание подгумусового горизонта за счет мобилизации соединений железа и их стяжение в многочисленные марганцево-гумусово-железистые конкреции. Поэтому, с одной стороны, в названиях почв очевидна замена “подзолистого” элемента на глеевое осветление почвенной массы: кроме термина “подбел”, впервые упомянутого в 1961 г. Э.А. Корнблюмом и Б.А. Зимовцом, Г.И. Ивановым широко использовался термин “отбел” и его производные. С другой стороны, сохранялся элемент “буро-” (Крейда, 1970), подчеркивающий оглинивание, характерное для почв зоны широколиственных лесов. Рассмотрим подробнее свойства подзолисто-буроземных почв разных частей их ареала на ПКРФ с точки зрения их диагностики в формате КиДПР.

Южный Приморский ареал

Подзолисто-буроземные почвы на тяжелосуглинстом и глинистом щебнистом элюво-делювии плотных пород.

Все разрезы подзолисто-буроземных почв на плотных породах имеют однотипное морфологическое строение почвенного профиля. В авторской редакции оно соответствует формуле профиля, приведенной в классификации 1977 г. и Программе карты (1972): $A_0-A_1-A_1A_2-A_2g-(A_2Bg)-B-BC-C$ (табл. 1). Характерно четкое разделение на генетические горизонты: гумусовый небольшой мощности, переходный гумусово-элювиальный A_1A_2 , осветленный элювиальный горизонт A_2 и мощный бурый, слабо оструктуренный срединный горизонт, постепенно переходящий в породу; количество обломков плотных пород возрастает вниз по профилю с 3–5% до 30–50% от объема горизонта.

Гумусовые горизонты A_1 серые или темно-серые, характеризуются слабокислыми значениями pH и насыщенностью основаниями, что сближает их с темногумусовыми горизонтами AU. Однако слабая оструктуренность, преобладание фульвокислот в ряде почв и большая доля нерастворимого остатка (40–49%), а также широкое отношение C/N (16–20) свидетельствуют об ограниченной гумификации органических остатков. По совокупности свойств гумусовые горизонты ближе к серогумусовым AU с возможными дополнительными признаками.

Переходные горизонты A_1A_2 не являются диагностическими в КиДПР при наличии в профиле почв горизонта EL.

Осветленные горизонты A_2 по комплексу свойств, приведенных в таблице 1, а также обеднению мелкозема оксидами Fe, Al и илом, по сравнению с нижележащими горизонтами, соответствуют элювиальному горизонту EL. Вместе с тем светло-палевая окраска, отмечаемая практически во всех авторских описаниях, по-видимому, связана с наличием железистых пленок на поверхности минеральных зерен и агрегатов. “Недоотмытость” осветленного горизонта от соединений железа, образующих красящие пленки, объясняется краткостью периода с восстановительными условиями в горизонте во время летнего максимума осадков, благодаря отчасти хорошей водопроницаемости нижележащих горизонтов, отчасти – высоким летним температурам. Поэтому в си-

стеме КиДПР к основному индексу ЕL добавляется малый индекс f, означающий слабое ожелезнение и используемый в диагностике западных дерново-палево-подзолистых почв (Подзолистые почвы..., 1977; Полевой определитель..., 2008). Не исключено, что объединение палево- и буроземно-подзолистых почв в легенде ПКРФ могло объясняться такой “палевостью” элювиального горизонта на юге дальневосточного ареала. *Горизонты A₂B* выделяются не во всех профилях и не являются диагностическими для этих почв.

Срединные горизонты B имеют ясные диагностические признаки метаморфического горизонта ВМ: педогенная ореховатая или комковатая структура в сочетании с более яркими и “теплыми” тонами окраски по сравнению с почвообразующей породой. На обломках пород заметны автохтонные пленки, характерные для метаморфических горизонтов. Накопление ила, по сравнению с почвообразующей породой, незначительно, чаще отсутствует (Крейда, 1976), хотя коэффициент дифференциации КД колеблется в широких пределах: от низкого – 1.2, характерного для метаморфических горизонтов, до высокого – 1.8, характерного для текстурных горизонтов (Классификация..., 2004). Однако формирование почв преимущественно на переотложенных продуктах выветривания плотных пород не позволяет считать этот показатель жестким диагностическим критерием. Иногда отмечаются редкие глинистые иллювиальные кутаны, но в основном они появляются глубже; диагностический признак текстурного горизонта ВТ – многослойные аллохтонные кутаны – отсутствует. Вместе с тем текстурная дифференциации, хотя и не всегда достаточно отчетливая, педогенная и/или литогенная, равно как и наличие компонента “подзолистые” в исходном названии почв, не позволяет игнорировать эту их особенность. В итоге к диагностическому горизонту ВМ добавляется признак td – текстурно-дифференцированный (2004), и формула профиля рассматриваемых почв в формате КиДПР будет следующей: АУ-Еlf-ВМtd-С (табл. 1).

В соответствии с формулой профиля, почвы относятся к типу *дерново-элювиально-метаморфических* отдела структурно-метаморфических почв, сложному подтипу: *дерново-палево-элювиально-метаморфические текстурно-дифференцированные*.

Развитие оглеения ограничивается более или менее свободным внутренним дренажем, благодаря щебнистости профиля, а буро-земообразование обеспечивается богатством пород и благоприятным гидротермическим режимом юга Приморья.

Подзолисто-буроземные почвы на тяжелосуглинистых и глинистых озерно-аллювиальных и делювиальных отложениях

В публикациях почвы имеют разные названия: дерново-подзолистые (Глинка, 1911; Жукова, 1934; Грицун, 1964; Мизеров, 1966), подбелы (Корнблум, Зимовец, 1961; Ливеровский, Росликова, 1962;), буро-глее-подзолистые (Крейда, 1970), бурые отбеленные, желто-бурые отбеленные (Иванов, 1976). В более поздних работах используются названия *подбелы лесные* (Росликова и др., 2010), *темногумусовые подбелы* (Костенков, Жарикова, 2018). Строение профиля такое же, как у почв предыдущей группы, но лучше выражена текстурная дифференциация, горизонты более мощные, окраска ярче, и конкреций в осветленном горизонте существенно больше (табл. 2).

Гумусовые горизонты A₁ темно-серые или черные, почти полностью насыщены основаниями и имеют слабокислые и близкие к нейтральным значения рН; содержание гумуса колеблется от 4–5 до 11–16%. Во фракционном составе преобладают гуминовые кислоты, связанные с кальцием (Хавкина, 1967). Вместе с тем содержание негидролизуемого остатка остается высоким, что, по мнению Н.Н. Матинян (2002), является специфической особенностью глинистых почв поверхностного оглеения. Характеристики гумуса Н.А. Крейда связывает с длительной историей вторичного остепнения почв, в отличие от почв на щебнистых элюво-делювиях плотных пород (Крейда, 1970). По совокупности свойств горизонты могут быть отнесены к *темногумусовым АУ*. При высоком содержании гумуса за счет большого количества растительных остатков разной степени разложения вводится подтип *грубогумусированные* с верхним горизонтом АУао.

Осветленные горизонты A₂ диагностируются как элювиальные ЕL. Особая их черта – очень большое количество конкреций, в том числе крупных (22.7%), а также высокое (30–50%) содержание железа в конкрециях относительно его валового содержания в мелкоземе почв (Иванов, 1976), что свидетельствует о

преобладании концентрации железа в конкрециях над его выносом или сохранением в горизонте, т. е. о признаке *mn* горизонта *EL се-грегационно-отбеленный (конкреционный)*.

Иллювиальные горизонты темно-бурого цвета с ореховато-призматической структурой, гумусово-глинистыми и глинистыми кутанами и белесой скелетаной по граням агрегатов, слабыми признаками оглеения и высоким КД (1.7–3.5), в том числе за счет неоднородности пород.

В итоге строение профиля в формате КиДПР будет следующим: AU(ao)-ELnn-(BEL)-BT-C. Горизонт BEL не выделяется, либо имеет малую мощность. Почвы могут быть отнесены к типу *темногумусовых подбелов, подтипу типичных*. В местах затрудненного поверхностного и внутripочвенного дренажа при содержании гумуса в верхнем горизонте >10%, а также отчетливых морфохроматических признаках оглеения по всему профилю (Иванов, 1976) почвы диагностируются как подбелы глееватые темногумусово-перегнойные с горизонтом AUh. Своеобразные подбелы с яркой желто-палевой окраской горизонта EL и охристо-коричневой – горизонта BT на морских террасах и делювиальных шлейфах, что по мнению авторов связано “с интенсивным ожелезнением поверхностных частей щебня (или всего щебня) в процессе выветривания”, выделены в прибрежной полосе юго-западного Приморья (Иванов, 1976; Костенков, Жарикова, 2018). Увеличение кислотности и ненасыщенности в гумусовом горизонте, высокое содержание гумуса с элементами перегнойного, преобладание в его составе фульвокислот (Иванов, 1976), а также интенсивное внутripочвенное выветривание в условиях максимально теплого и влажного на Дальнем Востоке климата отличает эти почвы от рассмотренных выше. Вместе с тем в осветленном горизонте содержится большое количество конкреций: по данным Г.И. Иванова – 10.5% от веса мелкозема, что находится в пределах выделения соответствующего подтипового признака. Эти не совсем обычные сочетания свойств могут быть причиной определения почв как сложного подтипа: *дерново-перегнойно-палево-подзолистые конкреционные железисто-матморфизованные* с профилем AY(h)-Elmnf(g)-BTmf(g)-C(g). Палевый цвет горизонта EL при относительно высоком содержании Fe-Mn-конкреций мо-

жет объясняться поступлением подвижных Fe-органических соединений из гумусово-перегнойного горизонта в период муссонов. При меньшем содержании конкреций почвы перейдут в подтип *дерново-(перегнойно)-палево-подзолистых железисто-метаморфизованных*.

Северный Приамурский ареал

Подзолисто-буроземные оглеенные почвы на тяжелосуглинистых и глинистых озерно-аллювиальных отложениях.

Оглеенные подзолисто-буроземные почвы Приамурья значительно отличаются от своих южных аналогов. В связи с общим увеличением увлажненности и холодности климата к северу в хвойно-широколиственных лесах увеличивается доля мелколиственных и хвойных пород: березы, осины, лиственницы, пихты, ели. В Амурской области и Хабаровском крае большая часть полигонов подзолисто-буроземных почв находится в южно-таежной подзоне лиственничных лесов, а в Амурской области – еще и в пределах криолитозоны. В профиле автоморфных почв в течение лета часто сохраняется льдистая сезонная мерзлота, почвы понижений связаны с многолетнемерзлыми породами (ММП); на поверхности почв встречаются мелкие осоковые кочки, криогенные пятна-медальоны (Иванов, 1976). Все это слабо согласуется с “буроземной” компонентой их названия. Тренды изменений в характере гумусовых горизонтов и проявлений оглеения в подзолисто-буроземных почвах в северной части ареала были отмечены в работах Э.А. Корнблюма и Б.А. Зимовеца (1961), Г.И. Иванова (1976).

По строению профиля и свойствам горизонтов, приведенным в КП-77 и Программе карты 1972 г., оглеенным подзолисто-буроземным почвам Приамурья более всего соответствуют описанные Г.И. Ивановым (1976) *бурые глеево-отбеленные* почвы с профилем: (O)-A₀A₁-(A₁)-(A₁A₂g)-A₂G-(A₂Bg)-Bg-(BCg)-Cg(G), в которых сильно оглеен горизонт A₂ (табл. 3).

Гумусовые горизонты A₁ или A₀A₁ по аналитическим показателям и морфологическим описаниям относятся либо к грубогумусовым (АО) (серогумусовым АУао с признаком ао “грубогумусированный”), либо к перегнойным Н (дерново-перегнойным

(признак h – AYh).

Осветленные горизонты A₂ пестрые, сизо-ржавые, массивные, плотные, бесструктурные, количество конкреций (только мелких) существенно меньше, чем в почвах Приморья на аналогичных породах. Значения рН и степень насыщенности также резко падают до 4.5–5 и 40–70% соответственно по сравнению с неоглеенными почвами. В авторской интерпретации осветленные горизонты определяются как сильно оглеенные, практически глеевые A₂G. В Программе карты (1972) такие горизонты считаются характерными для таежных глеево-дифференцированных, в том числе оподзоленных, почв. В системе КиДПР они могут соответствовать либо элювиальным глееватым горизонтам ELg, либо глеевым оподзоленным (элювиированным) Ge. Признак “сегрегационно-отбеленный” (конкреционный) отсутствует, так как содержание конкреций составляет <10% от массы горизонта, а содержание железа в конкрециях не превышает 20–25% от общего его количества в мелкоземной почве (Иванов, 1976).

Срединные горизонты Bg во всех разрезах сизо-бурые (на срезе буро-ржавые), пестрые. Однако в некоторых из них обнаруживаются диагностические признаки, характерные для текстурного горизонта BГ: ореховато-призматическая структура, тонкие глинистые кутаны по граням агрегатов, скелетана (“кремнеземистая присыпка”) по ходам корней и трещинам, высокий КД (1.5). В других случаях срединные горизонты имеют признаки криометаморфического горизонта CRM: творожистая или мелкоореховатая структура, низкий КД (<1.4), отсутствие кутан.

Поскольку достоверно определить степень оглеения осветленного горизонта по КиДПР на основании тех описаний разрезов, которыми мы располагаем, не представляется возможным, рассмотрим два варианта – A₂g и A₂G с точки зрения диагностики почв при сочетаниях с разными срединными горизонтами.

1. При сильном оглеении верхней части профиля и ослаблении его с глубиной в сочетании со срединным горизонтом с творожистой или мелкоореховатой острорезерной структурой строение профиля можно определить как H-Ge-CRMg-Cg, и почвы могут быть отнесены к *глеземам криометаморфическим пережной-ным оподзоленным*. По-видимому, они приурочены к наиболее

влажным и холодным кустарничково-моховым листовничникам с марями на северо-западе и севере ареала.

2. При меньшей степени оглеения горизонта A_2 (A_2g) в относительно дренированных позициях не исключено формирование *светлоземов глееватых* с профилем H-ELg-CRMg-Cg.

3. В юго-восточной части Приамурского ареала под широколиственными и хвойно-широколиственными лесами могут формироваться *дерново-элювиально-метаморфические глееватые* почвы с профилем AYao-ELg-BM(crm),g-Cg.

4. На древних террасах Амура встречаются почвы с ясно выраженной текстурной дифференциацией профиля, небольшим количеством конкреций в осветленном горизонте на фоне оглеенности профиля, перегнойным (или грубогумусовым) горизонтом, более кислые и ненасыщенные, чем рассмотренные выше. Они диагностируются как *перегнойно-подзолистые глееватые* или *глеевые*, профиль H-(AO)-ELg-BTg-Cg(G).

Небольшое количество разрезов дифференцированных оглеенных почв с подробным описанием их свойств не позволяет уверенно говорить о том, что в Приамурье формируются почвы с криометаморфическим горизонтом или признаком. Однако еще в работе Э.А. Корнблума и Б.А. Зимовца в 1961 г. в минеральных срединных горизонтах дифференцированных почв Приамурья отмечалась “мелкоореховатая острореберная структура с гелевидными натекками на гранях” (стр. 55), которую можно считать характерной для криометаморфического горизонта.

Другим аргументом в пользу введения в диагностику почв Приамурья криометаморфических элементов может быть положение почв на периферии криолитозоны, с одной стороны, и их криологический режим, с другой стороны. Он предполагает существование продолжительного периода с температурой в интервале наиболее интенсивных фазовых переходов влаги (Федорова, 1970; Тонконогов, 2010). По наблюдениям А.Б. Гыниновой, в юго-западном Приамурье криологический режим луговых подбелов, близких по свойствам к рассматриваемым почвам, подтверждает возможность формирования криогенной структуры, характерной для криометаморфических горизонтов в КиДПР (Гынинова и др., 2008). Сравнение некоторых криологических показателей подзо-

листо-буроземных оглеенных почв Дальнего Востока с таковыми средней тайги Западной Сибири, где эти почвы были выделены давно и отражены на картах (Атлас ХМАО, 2000), показывает, что они во многом близки. Так, оба региона находятся вблизи южной границы многолетней мерзлоты, в зоне редкоостровного ее распространения, а сами почвы относятся к длительно-сезонно-мерзлотным (КП-77). Количество осадков летнего периода на Дальнем Востоке больше, но больше и испаряемость, так что можно предположить, что почвы обоих регионов уходят в период осенне-зимнего промерзания при близкой влажности. Горизонт с криометаморфической структурой в западносибирских почвах находится на глубине 60–80 см (Караваева, 1973). Примерно на такой же глубине формируется горизонт с аналогичной структурой в почвах Приамурья. Ареалы всех рассмотренных подзолисто-буроземных почв на Почвенной карте 2.5 млн, интерпретированных в идеологии и номенклатуре классификации почв России, представлены на рисунке 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обновление легенды и содержания почвенной карты РФ 1988 г. включало поиск аналогов единицам легенды карты в классификации почв России. Он производился путем анализа опубликованных материалов, в первую очередь, подробных описаний разрезов, в системе диагностических горизонтов и признаков КиДПР для определения положения в ней почвы.

Прежде всего, сдвоенная единица легенды ПКРФ была разделена, и ареалы собственно дерново-палево-подзолистых почв были ограничены западными провинциями Европейской России.

Дальневосточные подзолисто-буроземные почвы, в т. ч. глееватые и глеевые, представляющие две единицы легенды ПКРФ, характеризуются текстурной дифференциацией профиля. КД во многих случаях значительно превышает 1.4 за счет неоднородности пород, иллювиирования, либо процесса оглинивания в щебнисто-мелкоземистых почвах в Приморье с его высоким почвообразующим потенциалом климата и биоты (Таргульян, 2019).

В южной части ареала подзолисто-буроземных почв, в Приморье, срединными горизонтами почв на щебнистых дериватах

плотных пород являются метаморфические горизонты ВМ с признаком td: глинистой дифференциации педогенной и/или литогенной природы; в почвах на озерно-аллювиальных отложениях и делювиальных глинах и суглинках – текстурные горизонты ВТ, в т. ч. со слабой глееватостью и с интенсивным ожелезнением за счет накопления продуктов выветривания богатых железом первичных минералов. Горизонт ЕL отбелен и имеет один из двух дополнительных признаков: при относительно невысокой контрастности водного и ОВ режимов формируется слабо ожелезненный горизонт Еlf, при максимально контрастных режимах происходит сильное отбеливание почвенной массы за счет стяжения соединений железа в конкреции и нодулы, так что горизонт называется сегрегационно-отбеленным или конкреционным – ЕLnp.

В северной части ареала подзолисто-буроземных почв – в Приамурье – дифференциация профиля выражена слабее, поскольку миграции веществ в профиле происходят менее активно, чем на юге ареала, по разным причинам, в т. ч. из-за длительного промерзания и медленного оттаивания. Элювиальные горизонты имеют яркие морфохроматические признаки оглеения и могут быть определены как Gel или ELg. Срединные горизонты также оглеены, диагностируются по КиДПР как ВТg; в некоторых из них предполагается криогенная структура, и горизонты определяются как CRMg или ВМсrm,g.

Модификации процесса гумусонакопления определяются климатическими различиями (север/северо-запад и юг ареала) и условиями внутрипрофильного дренажа. Особенности климата и растительности определяют тенденцию формирования темногумусовых и серогумусовых горизонтов часто с повышенным содержанием гумуса и элементами грубого гумуса на юге ареала и перегнойных или грубогумусовых горизонтов на севере.

Рассмотренные комбинации горизонтов и признаков подзолисто-буроземных и подзолисто-буроземных глеватых и глеевых почв – единиц легенды ПКРФ – в различных частях их ареалов служат основанием для корреляции их с несколькими выделами классификации почв России (рис. 1). В центральной и южной частях ареала – это *типы дерново-элювиально-метаморфических почв, подбелов темногумусовых и дерново-подзолистых почв*. Они

могут иметь соответствующие некоторым типам *подтипы*: *глееватые, текстурно-дифференцированные, “палево-”, железисто-метаморфизованные, конкреционные, перегнойные*. В северной части ареала – *типы глееземов криометаморфических, светлосеземов, дерново-подзолистых, перегнойно-подзолисто-глеевых и элювиально-метаморфических почв*, которые могут иметь *подтипы: глееватые, криометаморфизованные, текстурно-дифференцированные*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Коношников 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. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Т. 2. Природа и экология. М.: Роскартография: Мониторинг, 2004. 152 с.
3. *Голодная О.М., Костенков И.М., Ознобихин В.И.* Почвы заповедников Дальнего Востока и их классификация // Современные почвенные классификации и проблемы их региональной адаптации. М-лы Всероссийской науч. конф. Владивосток, 2010. С. 65–68.
4. *Гынинова А.Б., Шоба Л.Д., Балсанова Л.Д.* Влияние глубокого промерзания на морфогенез луговых подбелов в Приамурье // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2008. С. 10–14.
5. *Иванов Г.И.* Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
6. *Ильичев Б.А.* Дерново-палево-подзолистые почвы Северо-Запада Европейской части СССР. М.: Наука, 1982. 122 с.
7. *Караваева Н.А.* Почвы тайги Западной Сибири. М.: Наука, 1973. 166 с.
8. Классификации и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
10. *Колесников Б.П.* Природное районирование Приморского края // Вопросы сельского и лесного хозяйства Дальнего Востока. Владивосток. Вып. 1. 1956. С. 5–16.
11. *Корнблюм Э.А., Зимовец Б.А.* Происхождение почв Приамурья с белесым горизонтом // Почвоведение. 1961. № 6. С. 55–66.
12. *Костенков И.М., Жарикова Е.А.* Почвы Прибрежной территории юго-западной части Приморья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 141–154.

13. *Крейда Н.А.* Почвы хвойно-широколиственных и широколиственных лесов Приморского края. Ученые Записки. Т. 27. Ч. 2. Владивосток, 1970. 228 с.
14. *Кудрявцев В.А.* О сезонном промерзании и оттаивании почвы / Мат-лы VII междувед. совещ. по мерзловед. М.: Изд.АН СССР, 1959. С. 168–173.
15. *Ливеровский Ю.А.* Основные особенности географии и генезиса почв южной половины Дальнего Востока // Особенности почвообразования в зоне бурых лесных почв. Владивосток: АН СССР. Сиб. Отд., 1967. С. 19–25.
16. *Ливеровский Ю.А., Рубцова Л.П.* Почвы Зейско-Буреинской равнины и проблемы их генезиса // Почвоведение. 1956. № 5. С. 1–16.
17. *Ливеровский Ю.А., Рубцова Л.П.* Таежные почвы Приамурья // Генезис и география почв. М.: Наука, 1966. С. 140–156.
18. *Матинян Н.Н.* Почвообразование на ленточных глинах озерно-ледниковых равнин Северо-запада России. СПб.: С-П ун-т, 2002. 200 с.
19. Подзолистые почвы Запада Европейской части СССР. М: Колос, 1977. 288 с.
20. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
21. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн / под ред. *В.М. Фридланда.* М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
22. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2001. 400 с.
23. Программа Почвенной карты СССР м-ба 1 : 2 500 000 / под ред. *В.М. Фридланда.* М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1972. 158 с.
24. *Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд. Моск. ун-та, 1993. 330 с.
25. *Росликова В.И.* Марганцево-железистые конкреции в почвах Суйфуно-Ханкайской низменности // Почвоведение. 1961. № 4. С. 82–90.
26. *Росликова В.И., Матюшкина Л.А.* Дифференциация почвенного покрова поймы Среднеамурской низменности в связи с эволюцией форм рельефа // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 106. С. 105–129. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-106-105-129](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-106-105-129).
27. *Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М.* Атлас почв юга Дальнего Востока России. Приханкайская низменность. Владивосток: изд. Дальнаука, 2010. 246 с.
28. *Савенкова Е.М.* Структура почвенного покрова мелкосопочника Западно-Приморской равнины // Современные почвенные классификации и проблемы их региональной адаптации. М-лы Всесоюзной науч. конф. Владивосток. 2010. С. 45–48.

29. *Таргульян В.О.* Теория педогенеза и эволюции почв. М.: Геос, 2019. 296 с.
30. *Тонконогов В.Д.* Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2010. 286 с.
31. Указания по классификации и диагностике почв. Вып. 2. М.: Колос, 1967. 64 с.
32. *Федорова Н.М.* Температурный режим суглинистых почвогрунтов водоразделов Западной Сибири Сосьвинского Приобья и некоторые аспекты современного почвообразования // Почвоведение. 1970. № 3. С. 74–91.
33. *Хавкина Н.В., Борева А.А.* Особенности гумусообразования в почвах Приморья // Особенности почвообразования в зоне бурых лесных почв. Владивосток: АН СССР. Сиб. отд., 1967. С. 99–102.

REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya pochvennoi karty RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience of updating the soil map of the RSFSR scale 1 : 2.5 million in the Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420, DOI: [10.7868/S0032180X17120024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17120024).
2. Atlas Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga-Yugry (Atlas of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra), Vol. 2, *Priroda i ekologiya*, Moscow: Roskartografiya, Monitoring, 2004, 152 p.
3. Golodnaya O.M., Kostenkov I.M., Oznobikhin V.I., Pochvy zapovednikov Dal'nego Vostoka i ikh klassifikatsiya (Soils of nature reserves of the Far East and their classification), *Sovremennye pochvennye klassifikatsii i problemy ikh regional'noi adaptatsii*, Proc. Russ. Sci. Conf., Vladivostok, 2010, pp. 65–68.
4. Gyninova A.B., Shoba L.D., Balsanova L.D., Vliyanie glubokogo promerzaniya na morfogenez lugovykh podbelov v Priamur'e (The effect of deep freezing on the morphogenesis of meadow whitewash in the Amur region), *Vestnik Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2008, pp. 10–14.
5. Ivanov G.I., *Pochvoobrazovanie na yuge Dal'nego Vostoka* (Soil formation in the South of the Far East), Moscow: Nauka, 1976, 200 p.
6. Il'ichev B.A., *Dernovo-palevo-podzolistye pochvy Severo-Zapada Evropeiskoi chasti SSSR* (Sod-pale-podzolic soils of the North-West of the European part of the USSR), Moscow: Nauka, 1982, 122 p.
7. Karavaeva N.A., *Pochvy taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the taiga of Western Siberia), Moscow: Nauka, 1973, 166 p.

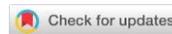
8. *Klassifikatsii i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
9. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.
10. Kolesnikov B.P., Prirodnoe raionirovanie Primorskogo kraia (Natural zoning of Primorsky Krai), *Voprosy sel'skogo i lesnogo khozyaistva Dal'nego Vostoka*, Vladivostok, Vol. 1, 1956, pp. 5–16.
11. Kornbljum E.A., Zimovets B.A., Proiskhozhdenie pochv Priamur'ya s belesym gorizontom (The origin of the Amur region soils with a whitish horizon), *Pochvovedenie*, 1961, No. 6, pp. 55–66.
12. Kostenkov I.M., Zharikova E.A., Pochvy Pribrezhnoi territorii yugo-zapadnoi chasti Primor'ya (Soils of the coastal territory of the south-western part of Primorye), *Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 141–154.
13. Kreida N.A., Pochvy khvoino-shirokolistvennykh i shirokolistvennykh lesov Primorskogo kraia (Soils of coniferous-broad-leaved and broad-leaved forests of Primorsky Krai), *Uchenye Zapiski* (Scientific Notes), Vol. 27, Part 2, Vladivostok, 1970, 228 p.
14. Kudryavtsev V.A., O sezonnom promerzanii i ottaivanii pochvy (About seasonal freezing and thawing of the soil), *Proc. VII Int. Council on Permafrost Science*, Moscow: Izd. ANSSSR, 1959, pp. 168–173.
15. Liverovskii Yu.A., Osnovnye osobennosti geografii i genezisa pochv yuzhnoi poloviny Dal'nego Vostoka (The main features of the geography and genesis of soils of the southern half of the Far East), In: *Osobennosti pochvoobrazovaniya v zone burykh lesnykh pochv* (Peculiarities of soil formation in the zone of brown forest soils), Vladivostok: ANSSSR. Sib. otd., 1967, pp. 19–25.
16. Liverovskii Yu.A., Rubtsova L.P., Pochvy Zeisko-Bureinskoi ravniny i problemy ikh genezisa (Soils of the Zeysko-Bureinskaya plain and problems of their genesis), *Pochvovedenie*, 1956, No. 5, pp. 1–16.
17. Liverovskii Yu.A., Rubtsova L.P., Taezhnye pochvy Priamur'ya (Taiga soils of the Amur region), In: *Genezis i geografiya pochv* (Soil Genesis and Geography), Moscow: Nauka, 1966, pp. 140–156.
18. Matinyan N.N., *Pochvoobrazovanie na lentochnykh glinakh ozerno-lednikovyykh ravnin Severo-zapada Rossii* (Soil formation on ribbon clays of lake-glacial plains of North-West Russia), Saint-Petersburg: Saint-Petersburg university, 2002, 200 p.
19. *Podzolistye pochvy Zapada Evropeiskoi chasti SSSR* (Podzolic soils of the West of the European part of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 288 p.
20. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field determinant of soils of Russia), Moscow: Pochv. ins-t im V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

21. *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln* (Soil map of the RSFSR scale 1 : 2.5 million), Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.
22. *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiiskoi Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: Pochvennyi ins-t im. V.V. Dokuchaeva, 2001, 400 p.
23. *Programma Pochvennoi karty SSSR m-ba 1 : 2 500 000* (The program of the Soil map of the USSR m-ba 1 : 2 500 000), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1972, 158 p.
24. Romanovskii N.N., *Osnovy kriogeneza litosfery* (Fundamentals of lithosphere cryogenesis), Moscow: Izd. Moskovskogo un-ta, 1993, 330 p.
25. Roslikova V.I., Margantsevo-zhelezistye konkreiii v pochvakh Suifuno-Khankaiskoi nizmennosti (Manganese-ferruginous nodules in the soils of the Suifuno-Khankai lowland), *Pochvovedenie*, 1961, No. 4, pp. 82–90.
26. Roslikova V.I., Matyushkina L.A., Differentiation of the soil cover of the floodplain of the Middle-Amur Lowland in connection with the evolution of the relief forms, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 106, pp. 105–129, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-106-105-129](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-106-105-129).
27. Roslikova V.I., Rybachuk N.A., Korotkii A.M., *Atlas pochv yuga Dal'nego Vostoka Rossii, Prikhankaiskaya nizmennost'* (Atlas of soils of the South of the Russian Far East. The Prikhankai lowland.), Vladivostok: izd. Dal'nauka, 2010, 246 p.
28. Savenkova E.M., *Struktura pochvennogo pokrova melkosopochnika Zapadno-Primorskoi ravniny* (The structure of the soil cover of the West Coastal Plain melkosopochnik), In: *Sovremennye pochvennye klassifikatsii i problemy ikh regional'noi adaptatsii* (Modern soil classifications and problems of their regional adaptation), *Proc. All-Union Sci. Conf.*, Vladivostok, 2010, pp. 45–48.
29. Targul'yan V.O., *Teoriya pedogeneza i evolyutsii pochv* (Theory of pedogenesis and evolution of soils), Moscow: Geos, 2019, 296 p.
30. Tonkonogov V.D., *Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoi i taezhnoi zonakh Vostochno-Evropeiskoi i Zapadno-Sibirskoi ravnin* (Automorphic soil formation in tundra and taiga zones of the East European and West Siberian plains), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2010, 286 p.
31. *Ukazaniya po klassifikatsii i diagnostike pochv* (Guidelines for the classification and diagnosis of soils), Vol. 2, Moscow: Kolos, 1967, 64 p.
32. Fedorova N.M., *Temperaturnyi rezhim suglinistykh pochvogruntov vodorazdelov Zapadnoi Sibiri Sos'vinskogo Priob'ya i nekotorye aspekty sovremennogo pochvoobrazovaniya* (Temperature regime of loamy soils of watersheds of Western Siberia of the Sosvinsky Ob region and some aspects of modern soil formation), *Pochvovedenie*, 1970, No. 3, pp. 74–91.

33. Khavkina N.V., Boreeva A.A., *Osobennosti gumusoobrazovaniya v pochvakh Primor'ya* (Features of humus formation in the soils of Primorye), In: *Osobennosti pochvoobrazovaniya v zone burykh lesnykh pochv* (Peculiarities of soil formation in the zone of brown forest soils), Vladivostok: ANSSSR, Sib. Otd., 1967, pp. 99–102.

УДК 631.417.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127



Ссылки для цитирования:

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

Cite this article as:

Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udaltsov 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, V. 118, pp. 79-127, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127

Благодарность:

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6). Авторы выражают благодарность ЦКП ФИЦ ПНЦБИ РАН за приборное обеспечение исследований.

Acknowledgments:

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (Registration number: 123030300031-6). The authors would like to express their gratitude to the СКР ФИЦ ПНЦБИ of RAS for instrumental support of the studies.

Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования

© 2024 г. Т. Н. Лебедева^{1*}, Д. А. Соколов^{1,2**},
М. В. Семенов^{2***}, Н. Б. Зинякова^{1****}, С. Н. Удальцов^{1*****},
В. М. Семенов^{1*****}

¹Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН – ФИЦ ПНЦБИ РАН, Россия,
142290, Пушкино, Московская область, ул. Институтская, 2

*<https://orcid.org/0000-0001-6588-778X>,

**<https://orcid.org/0000-0002-6183-6798>,

***<https://orcid.org/0000-0002-2167-9097>,

****<https://orcid.org/0000-0003-1891-7944>,

*****<https://orcid.org/0000-0002-2539-6107>.

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

***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>, e-mail: v.m.semenov@mail.ru.

Поступила в редакцию 10.08.2023, после доработки 28.08.2023,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Дана обобщенная сводка содержания органического углерода ($C_{орг}$) в подтипах серой лесной почвы, залегающих на территории России. Показано, что в гумусовых горизонтах целинных светло-серых, типичных серых и темно-серых лесных почв содержится в среднем 2.16 ± 0.67 , 2.42 ± 0.61 и $3.58 \pm 0.95\%$ $C_{орг}$, а в пахотном слое сельскохозяйственных почв – 1.36 ± 0.40 , 1.71 ± 0.40 и $2.84 \pm 0.86\%$ соответственно. В органическом веществе образцов разных горизонтов серой лесной почвы (Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) под мелколиственным лесом и посевом ячменя выделяли структурные (твердые органические частицы размером 0.05–2 мм, $C_{РОМ}$, и минерально-ассоциированное органическое вещество размером <0.05 мм, $C_{МАОМ}$) и процессные (потенциально-минерализуемое органическое вещество, C_0 , и микробная биомасса, $C_{мик}$) пулы. Отношение $C_{РОМ}/C_{МАОМ}$ в верхних горизонтах почвы под лесом и пашней равнялось 0.60 и 0.26 соответственно, и уменьшалось с глубиной до 0.05 при всех рассмотренных видах землепользования. Размеры пулов $C_{МАОМ}$, $C_{РОМ}$, C_0 и $C_{мик}$ коррелировали друг с другом и зависели от глубины почвенного слоя, тогда как влияние землепользования на соотношение пулов обнаруживалось только для поверхностных горизонтов. Вклад $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ в потенциально-минерализуемый пул органического вещества серой лесной почвы составлял 20–41 и 71–87% соответственно. Согласно полученным данным величина пула C_0 была почти эквивалентна годовым размерам гетеротрофной эмиссии CO_2 из почвы. Подчеркивается важность определения размеров и соотношений

структурных и процессных пулов почвенного органического вещества в программах мониторинга углерода и рекарбонизации агроэкосистем.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество; секвестрация; депонирование; органическое вещество твердых частиц; минерально-ассоциированное органическое вещество; потенциально-минерализуемое органическое вещество; микробная биомасса.

Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use

© 2024 T. N. Lebedeva^{1*}, D. A. Sokolov^{1,2**}, M. V. Semenov^{2***},
N. B. Zinyakova^{1****}, S. N. Udaltsov^{1*****}, V. M. Semenov^{1*****}

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science,
Russian Academy of Sciences,*

2 Institutskaya Str., Pushchino 142290, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0001-6588-778X>,

**<https://orcid.org/0000-0002-6183-6798>,

***<https://orcid.org/0000-0002-2167-9097>,

****<https://orcid.org/0000-0003-1891-7944>,

*****<https://orcid.org/0000-0002-2539-6107>.

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

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

***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>, e-mail: v.m.semenov@mail.ru.

Received 10.08.2023, Revised 28.08.2023, Accepted 07.02.2024

Abstract: The summarized data on the content of organic carbon (C_{org}) in the subtypes of gray forest soils occurring on the territory of Russia was presented. It was shown that the humus horizons of virgin light-gray, typical-gray, and dark-gray forest soils contain, on average, 2.16 ± 0.67 , 2.42 ± 0.61 , and $3.58 \pm 0.95\%$ C_{org} , respectively, while the plowing layers of arable soils contain 1.36 ± 0.40 , 1.71 ± 0.40 , and $2.84 \pm 0.86\%$, respectively. Structural (particulate organic matter 0.05–2 mm in size, C_{POM} , and mineral-associated organic matter <0.05 mm in size, C_{MAOM}) and process (potentially mineralizable organic matter, C_0 , and microbial biomass, C_{mic}) pools were isolated in the organic matter of samples from different horizons of gray forest soils (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) under small-leaved forest and barley crop. The C_{POM}/C_{MAOM} ratio in the upper soil horizons under forest and arable land was 0.60 and 0.26, respectively, and this ratio decreased with

depth to 0.05 under both land uses. The sizes of the C_{MAOM} , C_{POM} , C_0 , and C_{mic} pools correlated with each other and depended on the depth of the soil horizon, while the effect of land use on the pool ratios was found only for the surface horizons. The contribution of C_{POM} and C_{MAOM} to the potentially mineralizable pool of organic matter in gray forest soil was 20–41 and 71–87%, respectively. According to the obtained data, the size of the C_0 pool was almost equal to the annual amount of the heterotrophic CO_2 emission from the soil. It was emphasized that determining of the sizes and ratios of structural and process soil organic matter pools should be important in the programs of carbon monitoring and recarbonization of agroecosystems.

Keywords: soil organic matter; sequestration; storage; particulate organic matter; mineral-associated organic matter; potentially mineralizable organic matter; microbial biomass.

ВВЕДЕНИЕ

Серые лесные почвы являются типичными для лиственно-лесной и лесостепной зон Евразии. Залегающие в лесостепной зоне серые лесные почвы зачастую называются серыми лесостепными, подчеркивая тем самым их более южное географическое положение и формирование в более теплых климатических условиях, по сравнению с широколиственно-лесными и подтаежными ландшафтами (Ахтырцев, 1979; Чендев, 2008). Согласно эколого-генетической классификации, тип серых лесных почв подразделяется, в зависимости от уровня гумусированности и признаков элювиально-иллювиальной дифференциации профиля, на светло-серые, серые и темно-серые подтипы. Характерны сочетания серых лесных почв с глеевыми, глееватыми и эродированными серыми лесными почвами (Алифанов, 1995; Ахтырцев, 1979; Зайдельман, Ковалев, 1994; Ковалев и др., 2021; Урусевская и др., 2000). Площадь серых лесных почв на территории Российской Федерации составляет примерно 41 млн га (Орлов и др., 1996; Единый государственный реестр..., 2014). Подтипы светло-серых, серых и темно-серых лесных почв выявлены соответственно в 38, 42 и 34 субъектах Российской Федерации (Единый государственный реестр..., 2014). На эти подтипы приходится соответственно 0.1–15.2, 0.1–30.5 и 0.1–12.6% территории этих субъектов. В Московской области серые лесные почвы занимают 7.3% территории (Почвы..., 2002).

Особенностью серых лесных почв является высокая изменчивость содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в гумусовом горизонте в зависимости от состава растительности, почвообразующей породы, рельефа, глубины залегания грунтовых вод и других факторов. Поэтому в разных обобщениях были получены разные средние содержания $C_{\text{орг}}$ в светло-серых лесных (от 2.00 до 2.05%), типичных серых (от 2.17 до 3.02%) и темно-серых лесных почвах (от 3.45 до 4.50%) (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996; Урусевская и др., 2000). Для серых лесных почв характерна тенденция увеличения содержания $C_{\text{орг}}$ с запада на восток с максимумом в Средней Сибири (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996). По сравнению с гумусовым горизонтом содержание $C_{\text{орг}}$ в серых лесных почвах уменьшается с глубиной в 2–10 и более раз, поэтому на верхний (0–20 см) слой приходится примерно половина от запасов органического углерода в метровой толще (Орлов и др., 1996). Запасы $C_{\text{орг}}$ в 0–100 см слое серых лесных почв в 1.2 и 2.6 раз больше, чем в каштановых и дерново-подзолистых почвах, но меньше, чем в черноземах в 1.7 раз. Таким образом, серые лесные почвы являются значимым глобальным резервуаром и стоком органического углерода.

Серые лесные почвы обладают умеренным агроресурсным потенциалом и благоприятны для высокопродуктивного земледелия. На серые лесные почвы приходится около 15% пахотных земель России (Единый государственный реестр..., 2014). Степень распаханности серых лесных почв достигала в прошлом свыше 40% (Урусевская и др., 2000). В 90-х годах XX в. значительная часть пахотных серых лесных почв перешла в разряд залежных и брошенных земель, заросших луговой и древесно-кустарниковой растительностью (Люри и др., 2010). Пахотные подтипы серых лесных почв характеризуются гомогенным пахотным горизонтом, обедненным, как правило, органическим углеродом, по сравнению с естественными аналогами, но большей мощности, чем гумусовый горизонт ненарушенных почв из-за припахивания и перемещения органического вещества из верхних слоев. Потери органического вещества в 0–20 см слое распаханых серых лесных почв на протяжении 90 и 270 лет составили от 46 и 61% соответственно, по сравнению с целинными почвами под лесом, тогда как

в слое 20–40 см отмечается накопление органического вещества (Чендев, 2008). В пахотных горизонтах светло-серых, серых и темно-серых лесных почв содержится соответственно на 27, 18 и 25% меньше $C_{\text{орг}}$, чем в необрабатываемых подтипах (Урусевская и др., 2000), по другим оценкам – на 15, 27 и 34% (Дядькина, 2016). Деградационные, как и проградационные, изменения в содержании органического вещества в серых лесных почвах не могут не затрагивать качественных характеристик почвенного органического вещества (ПОВ), которые, как правило, более чувствительны к внешним факторам и нарушающим воздействиям.

Ранее о качестве органического вещества серых лесных почв судили по показателям гумусового состояния почв, среди которых ключевая роль отводилась определению фракционного и группового состава гумуса (Гришина, 1986; Орлов и др., 2004). Этот познавательный подход был оправдан в рамках доминировавшей прежде гумусовой (гуминовой) теории ПОВ (Заварзина и др., 2021; Когут, Семенов, 2015). В последние годы широкую известность приобрела континуумная модель ПОВ (Lehmann, Kleber, 2015) с подразделением ПОВ на два отдельных пула, включающих свободные и окклюдированные твердые органические частицы (particulate organic matter, POM) размером 2–0.053 мм и связанные почвенными минералами микрочастицы и биомолекулы (mineral-associated organic matter, MAOM) размером <0.053 мм (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023с; Cotrufo et al., 2022; Cotrufo et al., 2019; Cotrufo et al., 2013; Haddix et al., 2020; Just et al., 2023; Kögel-Knabner et al., 2022; Lavallee et al., 2020). Гранулометрическое разделение ПОВ на POM и MAOM позволяет количественно дифференцировать пулы с различными скоростями оборота, химическим составом и путями образования (Артемьева, 2010; Семенов и др., 2023b; Angst et al., 2023; Just et al., 2021; Lavallee et al., 2020; Poeschlau et al., 2018; Yu et al., 2022), получать данные, пригодные для использования в моделях динамики почвенного углерода и его отклика на климатические изменения (Cotrufo et al., 2019; Derrien et al. 2023; Dobarco et al., 2023; Haddix et al., 2020; Lavallee et al., 2020; Lugato et al., 2021) и разрабатывать новые способы длительного сохранения углерода в почве (Begill et al., 2023; Derrien et al., 2023; Just et al., 2023; Kögel-Knabner et al., 2022;

Witzgall et al., 2021).

В этой связи происходит переориентация научных и мониторинговых исследований на получение данных по содержанию, запасам и фракционному соотношению углерода РОМ ($C_{РОМ}$) и МАОМ ($C_{МАОМ}$) в разных почвах в зависимости от климатических условий, структуры ландшафта, растительности, землепользования, систем земледелия, способов агротехники и других условий и факторов. Создаются национальные и глобальные базы данных по территориальному и профилемому распределению $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ в том числе на картографической основе. Устанавливаются связи $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ с размерами и качеством поступлений в почву надземной и подземной биомассы растений и органических удобрений, с почвенным микробиомом и минералогическим составом почвы, исследуется состав, биологические, химические и физические характеристики РОМ и МАОМ. Для более полной оценки свойств и функций ПОВ, наряду с определением РОМ и МАОМ, которые были отнесены к группе структурных пулов, было предложено определять процессные пулы: потенциально-минерализуемый углерод (C_0) и углерод микробной биомассы ($C_{мик}$) (Семенов и др., 2023b). Подразделение ПОВ на структурные и процессные пулы позволило получить новую информацию о многолетней динамике $C_{орг}$ в разноудобренной почве (Семенов и др., 2023a).

В задачи данного исследований входило: 1) определить содержание, запасы и соотношения углерода в структурных ($C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$) и процессных (C_0 и $C_{мик}$) пулах органического вещества в профиле серой лесной почвы разного землепользования; 2) оценить минерализационный потенциал РОМ и МАОМ серой лесной почвы и сравнить вклад этих двух гранулометрических фракций ПОВ как источников продукции CO_2 почвой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях использовали образцы серой лесной почвы (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)), отобранные на юге Московской области под вторичным лесом возрастом свыше 75 лет с доминированием березы и со старопахотного участка, засеянного в год отбора ячменем. Почвенные образцы отбирали из трех стенок почвенных разрезов в слоях, соответствующих поч-

венным горизонтам. Свежеотобранные образцы высушивали на открытом воздухе до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Координаты точек отбора проб и основные физико-химические характеристики почвы представлены в таблице 1.

Гранулометрическое подразделение почвы на РОМ (2–0.05 мм), распределенное во фракции песка, и тонкодисперсное МАОМ (<0.05 мм) в составе пыли и глины производили по методу Cambardella, Elliott (1992) в модификации Семенова и др. (2023b) в трехкратной повторности. Навеску воздушно-сухой почвы массой 10 г диспергировали в 30 мл 0.5%-ного раствора гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) на шейкере в течение 15 ч при скорости 180 об./мин. Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0.05 мм. Остаток на сите несколько раз промывали дистиллированной водой до получения прозрачной промывной жидкости. Полученную массу РОМ и песка на сите сушили в течение 1 ч при 40 °С, после чего количественно переносили в емкость, досушивали в течение суток при 65 °С и взвешивали.

Для определения МАОМ суспензию <0.05 мм вместе с промывочной жидкостью количественно собирали в емкости и отстаивали в течение суток. Надосадочную жидкость и осадочную массу последовательно центрифугировали в течение 30 мин со скоростью 2 500 об./мин, полученный осадок объединяли и высушивали при 65 °С в течение суток. Массу МАОМ вычисляли по разнице между навеской почвы и массой РОМ. В высушенной и растертой до пудры массе РОМ и МАОМ определяли содержание углерода ($C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$).

Содержание C_0 в почве определяли по количеству $C\text{--CO}_2$, выделившегося в течение 178-суточной инкубации почвенных образцов при постоянных условиях температуры (22 °С) и влажности (25 вес. %), согласно ранее опубликованной методике (Семенов и др., 2006; Семенов и др., 2018). Минерализационный потенциал гранулометрических фракций почвы определялся так же, как и потенциально-минерализуемое органическое вещество в интактном образце почвы.

Таблица 1. Физико-химические характеристики серой лесной почвы разного землепользования
Table 1. Physical-chemical characteristics of gray forest soil under different land use

Слой, см	C _{орг}	N _{общ}	C/N	Гранулометрические фракции, %		Плотность, г/см ³
				<0.01 мм	<0.001 мм	
Мелколиственный лес, 54°49'4" N; 37°33'58" E						
2–18	$\frac{1.85 \pm 0.09}{32.8}$	$\frac{0.16 \pm 0.01}{3.2}$	11.7	41	18	1.11
18–66	$\frac{0.56 \pm 0.03}{36.5}$	$\frac{0.07 \pm 0.00}{4.4}$	8.3	48	27	1.36
66–100	$\frac{0.38 \pm 0.02}{19.9}$	$\frac{0.05 \pm 0.00}{2.7}$	7.3	50	34	1.55
Пашня, 54°49'19" N; 37°33'33" E						
0–20	$\frac{1.21 \pm 0.05}{31.9}$	$\frac{0.12 \pm 0.00}{10.3}$	10.1	40	15	1.32
20–61	$\frac{0.69 \pm 0.02}{43.4}$	$\frac{0.09 \pm 0.00}{3.2}$	8.1	50	26	1.53
61–100	$\frac{0.43 \pm 0.05}{26.9}$	$\frac{0.06 \pm 0.01}{5.4}$	7.2	52	34	1.60

Примечание. Над чертой – % от массы почвы, под чертой – т/га.

Note. Above the line – % of soil weight, below the line – t/ha.

Навески РОМ и МАОМ массой 1 г каждого образца в трехкратной повторности помещали в пробирки емкостью 12 мл, увлажняли до 25 вес. % и инкубировали в течение 177 сут. при постоянной влажности и температуре, регулярно измеряя скорость выделения $C-CO_2$. По кумулятивным количествам $C-CO_2$ за время инкубации рассчитывали потенциальную минерализацию органического вещества $C_{0-РОМ}$ и $C_{0-МАОМ}$, выражая в мг/100 г и в процентах от массы фракции. Учитывая долю гранулометрических фракций в почве, рассчитывали вклад РОМ и МАОМ в потенциально-минерализуемый пул всей почвы. Микробную биомассу ($C_{мик}$) в почве определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) в модификации, предложенной Н.Д. Ананьевой (Ананьева и др., 2011).

Содержание $C_{орг}$ в почве и в гранулометрических фракциях РОМ и МАОМ определяли сухим сжиганием на CN-анализаторе Vario Cube (Elementar, Германия), предварительно растирая образцы до частиц размера <0.25 мм. Экспериментальные данные приведены в виде средних величин из трех аналитических повторений и их стандартных отклонений. Математическую обработку данных проводили с помощью MS Excel и программы Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание, запасы и распределение $C_{орг}$ в профиле серой лесной почвы. Серая лесная почва относится к ряду зональных почв, в которых образование и накопление органического вещества наиболее отчетливо обусловлено почвообразовательными процессами и биоклиматическим потенциалом, тесно связанным с продолжительностью периода биологической активности в природно-географической зоне. Обновленные сведения о содержании $C_{орг}$ в целинных и пахотных подтипах серых лесных почв с добавлением данных за последние два десятилетия, приведены в таблице 2. Средние содержания $C_{орг}$ в светло-серой, типичной серой и темно-серой лесной почвах естественных угодий оказались одного и того же порядка с полученными другими авторами (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996; Урусевская и др., 2000), но не идентичны таковым. Наиболее сильные расхождения проявляются для типичных серых и темно-серых лесных почв. В целом в гумусовом го-

ризонте необрабатываемых серых и темно-серых лесных почв содержится в 1.1 и 1.7 раз больше $C_{\text{орг}}$, чем в светло-сером подтипе.

Пахотные горизонты светло-серых, серых и темно-серых лесных почв, используемых в земледелии, обеднены органическим углеродом соответственно на 59, 39 и 26% по сравнению с целинными аналогами (табл. 2). Особенно низкая обеспеченность органическим веществом свойственна неудобренным почвам. Перевод земель под залежь или использование органической системы удобрения, почвозащитной обработки почвы и способов диверсификации севооборотов препятствуют перманентному дегумусированию пахотных почв или даже способствуют восстановлению запасов органического вещества до уровня естественных аналогов.

Содержание $C_{\text{орг}}$ в серой лесной почве, залегающей на правом берегу р. Оки под мелколиственным лесом, было ниже среднестатистического для типичных серых почв, больше соответствуя по уровню гумусированности светло-серой почве (табл. 1 и 2). Низкая обеспеченность органическим веществом свойственна и для длительно обрабатываемой серой лесной почвы. По шкале обеспеченности пахотных почв органическим веществом исследуемая серая лесная почва относится к классу с содержанием $C_{\text{орг}}$ меньше минимального (Когут, 2012). Так же, как и в случае с почвой под лесом, в пахотном горизонте содержалось примерно столько же $C_{\text{орг}}$, сколько обычно обнаруживается в пахотных светло-серых почвах. Коэффициент обедненности пахотной почвы района исследований органическим углеродом составлял 54%, занимая промежуточное положение между значениями, полученными для светло-серых и типичных серых лесных почв.

Следовательно, нетипичное для серой лесной почвы содержание $C_{\text{орг}}$ на участках сопредельного с долиной р. Ока ландшафта является особенностью гумусообразования, присущего этому местоположению. Отмечается более сильная обогащенность нижних горизонтов пахотной серой лесной почвы органическим углеродом, по сравнению с целинной.

Таблица 2. Содержание $C_{\text{орг}}$ в гумусовом и пахотном горизонтах серых лесных почв, % от массы почвы
Table 2. C_{org} content in the humus and plowing horizons of the gray forest soils, %

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Светло-серая лесная</i>						
Новосибирская область	2.81	1.90	1.72	1.92	Не опр.	Якименко, Конарбаева, 2016
Иркутская область	1.24	1.12	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Рябинина, 2012
Тюменская область	2.06	1.86	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Республика Татарстан	3.42	1.28	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015
Республика Башкортостан	1.43	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабиров и др., 2001
Республика Башкортостан	3.03	1.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015
Кировская область	Не опр.	0.70	0.67	0.71	Не опр.	Кодочилова и др., 2020
Нижегородская область	1.68	1.22	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	2.02	1.51	0.97	1.46	2.69	Полякова, 2007
Нижегородская область	Не опр.	0.90	0.83	0.87	1.03	Титова и др., 2013

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Светло-серая лесная</i>						
Нижегородская область	Не опр.	0.92	Не опр.	Не опр.	1.05	Комарова, Козлова, 2016
Среднее по России	2.06	1.59	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	2.00	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	2.05	1.77	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	2.16	1.36	1.05	1.24	1.59	
<i>Серая лесная</i>						
Алтайский край	2.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Пивоварова и др., 2014
Республика Бурятия	2.46	1.79	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Чимитдоржиева, 2016
Тюменская область	1.89	2.15	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Красноярский край	2.25*	1.88	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Шпедт, Трубников, 2015
Красноярский край	2.76 (3.59*)	2.17	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Сорокина, 2018
Республика Татарстан	3.42	1.91	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Республика Башкортостан	3.66	2.26	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015
Республика Башкортостан	1.94	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабиров и др., 2001
Республика Башкортостан	Не опр.	Не опр.	2.39	2.65	2.81	Хабиров, 1993
Нижегородская область	2.09	1.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	1.95	1.71	1.37	2.05	3.04	Полякова, 2007
Владимирская область	Не опр.	1.9 1.1	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Артемьева, Травникова, 2006
Владимирская область	Не опр.	Не опр.	1.55	1.84	1.91	Окорков и др., 2016
Владимирская область	Не опр.	Не опр.	1.68	1.83	1.98	Сычев и др., 2020
Пензенская область	Не опр.	1.51	1.50	Не опр.	1.59	Иванов, Кузин, 2009

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Рязанская область	Не опр.	1.55	1.38	1.59	1.80	Ушаков, 2007
Тульская область	4.0 1.6	2.4 1.4 1.6	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Артемьева, Травникова, 2006
Тульская область	2.29	1.81	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Соколов и др., 2021
Тульская область	1.71*	1.25	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Липатов и др., 2005
Тульская область	1.95*	1.67	Не опр.	1.59	2.02	Зинякова и др. 2013
Московская область	2.38	1.52	1.30	1.74	5.16	Исмагилова, 2010
Московская область	1.43	0.96	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ходжаева, Семенов, 2015
Московская область	2.08	1.07	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Баева и др. 2017
Московская область	1.88	1.44	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Семенов и др., 2022
Московская область	Не опр.	Не опр.	1.13	1.18	2.03	Семенов и др. 2023a

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Среднее по России	3.02	2.56	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	2.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	2.17	1.71	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	2.42	1.71	1.54	1.81	2.48	
<i>Темно-серая лесная</i>						
Алтайский край	3.00	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Пивоварова и др., 2014
Тюменская область	3.84	3.07	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Красноярский край	4.83*	4.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Шпедт, Трубников, 2015
Республика Татарстан	4.00	3.25	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015
Республика Башкортостан	3.75	3.52	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабилов и др., 2001
Республика Башкортостан	5.16	3.71	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Темно-серая лесная</i>						
Нижегородская область	3.02	2.38	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	2.54	2.32	2.24	2.44	7.43	Полякова, 2007
Тамбовская область	4.78	2.51	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ахтырцев, Ефанова, 1988
Воронежская область	3.32	2.17	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ходжаева, Семенов, 2015
Курская область	3.02 (1.84*)	1.52	Не опр.	Не опр.	2.81	Недбаев, Мальшева, 2018
Белгородская область	2.06	1.91	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Чендев и др., 2011
Тульская область	3.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Богатова, Щеглов, 2005
Среднее по России	4.05	3.29	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	4.50	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	3.45	2.57	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	3.58	2.84	Не опр.	Не опр.	Не опр.	

Можно предположить, что заделка растительных остатков при вспашке и разрушение макроагрегатов способствуют более глубокому перераспределению по профилю почвы тонкодисперсного и растворимого органического вещества.

Из таблицы 1 видно, что более трети $C_{\text{орг}}$, аккумулированного в метровой толще серой лесной почвы, сосредоточено в верхнем 0–20 см (40% в целинной и 31% в пахотной почве). Превышение запасов $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое целинной почвы, по сравнению с пахотной, было не столь значительно, как это следовало из данных по валовому содержанию $C_{\text{орг}}$, а в нижних горизонтах пахотной почвы запасы $C_{\text{орг}}$ были даже выше, чем в целинной почве. Поэтому запасы $C_{\text{орг}}$ в 0–100 см слое пахотной почвы оказались на 15% больше, чем в целинной. Таким образом, потери органического вещества в длительно используемых в земледелии почвах присущи преимущественно пахотному горизонту. Следует строго придерживаться рекомендаций Д.С. Орлова (Орлов и др., 1996; Орлов и др., 2004) – сравнивать гумусное состояние целинных, залежных и пахотных почв, а также оценивать углерод-секвестрирующую эффективность различных технологий и мероприятий по запасам $C_{\text{орг}}$, а не по его содержанию в массе почвы.

Структурные пулы органического вещества серой лесной почвы. Твердые органические частицы (РОМ) и минерально-связанное органическое вещество (МАОМ) были отнесены к группе структурных пулов ПОВ (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023b). Эти пулы придают ПОВ целостность, отражают его автохтонность, обеспечивают сохранность органического углерода, выполняют депонирующую, агрегирующую, протекторную и другие функции. В гумусовых горизонтах целинной и пахотной серой лесной почвы в виде РОМ вместе с фракцией песка находилось 18 и 8% массы почвы соответственно (табл. 3), а на МАОМ вместе с пылью и глиной приходилось 82 и 92% (табл. 4).

В нижних горизонтах содержание фракции РОМ + песок уменьшалось до 3–6%, а МАОМ – увеличивалось до 94–97% от массы почвы. Концентрации углерода во фракциях РОМ и МАОМ коррелировали между собой ($r = 0.980$, $p = 0.001$) и с $C_{\text{орг}}$ в массе почвы ($r = 0.972$ и 0.993 при $p = 0.001$ и $p < 0.001$ соответственно).

Во фракции POM содержалось в 1.4–2.5 раза больше органического углерода, а отношение C/N было шире в 1.4–1.8 раза, чем в интактном образце почвы. В отличие от POM, концентрация углерода и отношение C/N во фракции MAOM были соответственно в 1.1–1.4 и 1.2–1.3 раза меньше по сравнению с интактным образцом почвы.

Таблица 3. Распределение твердых органических частиц (POM) в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 3. Distribution of particulate organic matter (POM) in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	Фракция POM + песок, % от массы почвы	C _{POM} , % от массы фракции	C/N фракции POM	C _{POM} , г/кг почвы	C _{POM} , % от C _{орг}
<i>Мелколиственный лес</i>					
2–18	18 ± 1	3.70 ± 0.13	16.2 ± 0.9	6.53 ± 0.64	35
18–66	6 ± 2	0.95 ± 0.13	14.2 ± 0.8	0.53 ± 0.10	10
66–100	4 ± 1	0.47 ± 0.07	13.0 ± 0.4	0.20 ± 0.08	5
<i>Пашня</i>					
0–20	8 ± 1	3.07 ± 0.02	15.1 ± 0.5	2.44 ± 0.17	20
20–61	4 ± 1	0.98 ± 0.01	13.6 ± 1.6	0.43 ± 0.09	6
61–100	3 ± 1	0.75 ± 0.06	12.7 ± 1.4	0.20 ± 0.06	5

Пропорции C/N в POM и MAOM относительно интактного образца почвы в верхнем горизонте серой лесной почвы составляли 1.44 : 0.78 : 1 в среднем для двух землепользований. В гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы и типичного чернозема разного землепользования эти соотношения равнялись 1.43 : 0.77 : 1 (Семенов и др., 2023с), а для почв луговых и лесных экосистем подчинялись пропорции 1.47 : 0.84 : 1 (Cotrufo et al., 2019). В нижних горизонтах чернозема типичного, серой лесной и дер-

ново-подзолистой почв соотношение C/N в РОМ, МАОМ и в ин-
 тактном образце почвы соответствовало в среднем 1.70 : 0.72 : 1.

Таблица 4. Распределение минерально-ассоциированного органического вещества (МАОМ) в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 4. Distribution of mineral-associated organic matter (МАОМ) in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	Фракция МАОМ + пыль + глина, % от массы почвы	C _{МАОМ} , % от массы фракции	C/N фракции МАОМ	C _{МАОМ} , г/кг почвы	C _{МАОМ} , % от C _{орг}
<i>Мелколиственный лес</i>					
2–18	82 ± 1	1.33 ± 0.02	9.0 ± 0.5	10.95 ± 0.20	59
18–66	94 ± 2	0.52 ± 0.02	6.8 ± 0.4	4.94 ± 0.15	88
66–100	96 ± 1	0.36 ± 0.03	5.6 ± 0.4	3.44 ± 0.29	91
<i>Пашня</i>					
0–20	92 ± 1	1.01 ± 0.04	8.0 ± 0.4	9.34 ± 0.36	77
20–61	96 ± 1	0.65 ± 0.01	7.0 ± 1.4	6.18 ± 0.09	89
61–100	97 ± 1	0.41 ± 0.02	5.5 ± 0.7	4.02 ± 0.19	93

Эти данные указывают на сходные и сопряженные пути формирования РОМ и МАОМ в разных почвах, но сами фракции отличаются между собой по предшественникам, процессам образования, составу, механизмам стабилизации и состоянию присутствия в почве. Если РОМ образуется из растительных остатков, подвергающихся в почве фрагментированию, разложению и окклюированию (Семенов и др., 2019b; Cotrufo et al., 2022), то МАОМ формируется параллельно с образованием РОМ путем “минерального и микробного насосов” (Liang, 2020; Liang et al., 2019; Xiao et al., 2023) из растворенного углерода растительного

происхождения и микробной некромассы, которые взаимодействуют с минеральными частицами почвы (Angst et al., 2023).

Фактические содержания углерода в пулах РОМ ($C_{\text{РОМ}}$) и МАОМ ($C_{\text{МАОМ}}$) устанавливаются по измеренным значениям массы гранулометрических фракций и содержания углерода в этих фракциях. Изменчивость $C_{\text{орг}}$ в профилях целинной и пахотной серой лесной почвы на 53% объяснялась пулом $C_{\text{МАОМ}}$ и на 50% пулом $C_{\text{РОМ}}$ ($C_{\text{орг}} = 1.14C_{\text{РОМ}} + 0.99C_{\text{МАОМ}} - 0.01$, при $R^2 = 0.999$, $n = 18$). По данным для трех почв (дерново-подзолистая, серая лесная, чернозем типичный) вклад $C_{\text{МАОМ}}$ в $C_{\text{орг}}$ составлял 64%, а $C_{\text{РОМ}} - 40\%$. В гумусовом горизонте серой лесной почвы целинного участка в пуле $C_{\text{РОМ}}$ содержалось 6.53 г/кг (35% от $C_{\text{орг}}$), а в пуле $C_{\text{МАОМ}} - 10.9$ г/кг (59% от $C_{\text{орг}}$) углерода соответственно (табл. 3 и 4). Для сравнения в гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы и типичного чернозема в пуле $C_{\text{РОМ}}$ содержалось соответственно 7.91 г/кг (38% от $C_{\text{орг}}$) и 17.7 г/кг (41% от $C_{\text{орг}}$) углерода, а в пуле $C_{\text{МАОМ}} - 11.6$ г/кг (56% от $C_{\text{орг}}$) и 22.7 г/кг (53% от $C_{\text{орг}}$) (Семенов и др., 2023с). Величины содержания $C_{\text{РОМ}}$ соответствуют значениям (от 2.10 до 18.7 г/кг почвы, от 20 до 48% от $C_{\text{орг}}$), полученным ранее для ряда зональных почв под естественными угодьями (Семенов и др., 2019а). Вниз по профилю серой лесной почвы содержание $C_{\text{РОМ}}$ уменьшалось в 12–32 раза, составляя 5–10% от $C_{\text{орг}}$. Распределение РОМ по профилю серой лесной почвы похоже на распределение биомассы корней, которые располагаются преимущественно в полуметровой толще. Содержание $C_{\text{МАОМ}}$ с глубиной уменьшалось всего лишь в 2–3 раза, при этом доля этого пула в ПОВ возрастала до 88–91% (табл. 4).

Обеднение пахотного горизонта серой лесной почвы органическим веществом, по сравнению с целинным участком, происходило в большей мере за счет РОМ, чем МАОМ. Содержание $C_{\text{РОМ}}$ в пахотном слое было в 2.7 раза меньше, чем в почве под лесом, а $C_{\text{МАОМ}} -$ только в 1.2 раза. Поэтому процент $C_{\text{МАОМ}}$ в органическом веществе пахотной серой лесной почве был выше, чем в почве под лесом. В предыдущих работах были получены следующие пределы обеднения пахотных почв твердыми органическими частицами: в дерново-подзолистой почве – в 4 раза, в серой лесной почве – в 3–3.2 раза, в черноземе – от 1.8 до 2.8 раз (Семенов

и др., 2019а; Семенов и др., 2023с). Убыль углерода минерально-ассоциированного органического вещества в пахотном слое в дерново-подзолистой почве составляла 2 раза, а в пахотном типичном черноземе уменьшение содержания $C_{\text{МАОМ}}$ было незначительным (Семенов и др., 2023с). Ранее было показано, что $C_{\text{МАОМ}}$ слабо чувствительно и к внесению органических удобрений. За 9 лет ежегодного применения органических удобрений содержание $C_{\text{МАОМ}}$ в серой лесной почве возросло в 1.3 раза, тогда как $C_{\text{РОМ}}$ – в 2.4–6.3 раз (Семенов и др., 2023а).

Предполагается (Just et al., 2023), что соотношение $C_{\text{РОМ}}$ к $C_{\text{МАОМ}}$ может быть индикатором стабильности ПОВ, допуская, что чем уже это соотношение, тем выше стабильность органического вещества. Соотношение $C_{\text{РОМ}}$ к $C_{\text{МАОМ}}$ в гумусовом горизонте серой лесной почвы под лесом равнялось 0.60, а под пашней – 0.26. В нижних горизонтах это соотношение уменьшалось до 0.05–0.06, в основном из-за низкой доли $C_{\text{РОМ}}$. В среднем для чернозема типичного, серой лесной и дерново-подзолистой почв на участках с естественной растительностью индекс $C_{\text{РОМ}}/C_{\text{МАОМ}}$ в гумусовом горизонте равнялся 0.69 ± 0.09 , в пахотном слое – 0.35 ± 0.10 , тогда как в нижнем горизонте целинной и пахотной почвы – соответственно 0.12 ± 0.06 и 0.10 ± 0.04 .

Таким образом, органическое вещество твердых частиц аккумулируется преимущественно в гумусовом горизонте серой лесной почвы и чувствительно к смене землепользования. Минерально-ассоциированное органическое вещество преобладает в составе ПОВ, особенно в нижних горизонтах почвенного профиля, и мало зависит от землепользования.

Процессные пулы органического вещества серой лесной почвы. Реактивность, трансформируемость и биоактивность ПОВ создаются процессными пулами потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0) и микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023с). Процессные пулы ответственны за физиологические, рециклирующие, эмиссионные и другие функции. В гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы содержалось 1.22 г/кг потенциально-минерализуемого углерода (табл. 5), столько же, сколько и в необрабатываемой дер-

ново-подзолистой почве, но меньше, чем в черноземе (Семенов и др., 2023с). Пахотная серая лесная почва содержала в 2 раза меньше C_0 , чем целинная, занимая промежуточное положение между используемыми в земледелии черноземом и дерново-подзолистой почвой.

Таблица 5. Содержание потенциально минерализуемого (C_0) и микробного ($C_{\text{мик}}$) углерода в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 5. Potentially mineralizable (C_0) and microbial (C_{mic}) carbon contents in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	C_0			$C_{\text{мик}}$		
	г/кг почвы	Константа скорости минера- лизации, сут ⁻¹	% от $C_{\text{орг}}$	г/кг почвы	% от $C_{\text{орг}}$	% от C_0
<i>Мелколиственный лес</i>						
2–18	1.22 ± 0.03	0.020 ± 0.000	6.6	0.29 ± 0.04	1.6	24
18–66	0.17 ± 0	0.022 ± 0.000	3.1	0.04 ± 0.01	0.8	25
66–100	0.08 ± 0	0.032 ± 0.000	2.1	0.03 ± 0.01	0.7	37
<i>Пашня</i>						
0–20	0.61 ± 0.02	0.021 ± 0.001	5.1	0.16 ± 0.02	1.3	26
20–61	0.17 ± 0.01	0.032 ± 0.002	2.4	0.05 ± 0.01	0.7	29
61–100	0.08 ± 0.01	0.040 ± 0.000	1.8	0.03 ± 0	0.7	38

Судя по проценту C_0 от $C_{\text{орг}}$ органическое вещество целинной серой лесной почвы было самым доступным для минерализации по сравнению с дерново-подзолистой почвой и типичным черноземом под естественными угодьями (6.6, 5.9 и 3.6% от $C_{\text{орг}}$ соответственно). Минерализуемость органического вещества в ряду пахотных почв уменьшалась в следующей последовательности: дерново-подзолистая > серая лесная > чернозем типичный

(5.6, 5.1 и 2.8% от $C_{\text{орг}}$ соответственно). Целинные серая лесная и дерново-подзолистая почвы характеризовались средней обеспеченностью C_0 , тогда как чернозем степного участка – высокой (Семенов и др., 2018). Пахотным аналогам серой лесной и дерново-подзолистой почв была свойственна низкая обеспеченность C_0 , а чернозема – средняя.

Размеры пула потенциально-минерализуемого углерода в нижних горизонтах целинной и пахотной серой лесной почв были соответственно в 7–15 и 4–8 раз меньше, чем в верхнем горизонте (табл. 5). Уменьшение минерализуемости органического вещества вниз по профилю серой лесной почвы, также как и в дерново-подзолистой почве и черноземе, свидетельствует о преобладании биологически стабильного органического вещества в нижних горизонтах, согласуясь с ранее полученными данными (Семенов и др., 2018; Ходжаева, Семенов, 2015).

Измеренное методом СИД содержание $C_{\text{мик}}$ в гумусовом горизонте серой лесной почвы под лесом (табл. 5) было близким таковым, полученным с помощью количественного определения дцДНК и метода фумигации-экстракции хлороформом в образцах серой лесной почвы под залежью и лесом на территории смежного ландшафта (Семенов и др., 2019с). В пахотном слое обрабатываемой серой лесной почвы содержалось в 1.8 раза меньше $C_{\text{мик}}$, чем в верхнем горизонте целинной почвы (табл. 5). На микробный пул $C_{\text{мик}}$ в серой лесной почве приходилось 24–38% от C_0 и 0.7–1.6% от $C_{\text{орг}}$, т. е. примерно столько, сколько обнаруживалось в дерново-подзолистой почве и в черноземе (15–37% от C_0 и 0.2–1.7% от $C_{\text{орг}}$ (Семенов и др., 2023с).

С увеличением глубины содержание $C_{\text{мик}}$ уменьшалось в 3.5–8.3 раз, а различия между землепользованиями по микробной биомассе нивелировались. Профильное распределение $C_{\text{мик}}$ в серой лесной почве и отклик на изменение землепользования были идентичны таковым в дерново-подзолистой почве и типичном черноземе (Никитин и др., 2019; Семенов и др., 2016; Семенов и др., 2019с; Семенов и др., 2023с). Показано, что биомасса грибов и бактерий отрицательно коррелировала с глубиной отбора проб по почвенному профилю дерново-подзолистой почвы (Никитин и др., 2019). В серой лесной почве в двух нижележащих горизонтах ко-

личество бактериальных клеток снижалось, по сравнению с поверхностным горизонтом в 3.0–6.7 раз, а численность метаболически активных клеток архей уменьшалась в нижележащих горизонтах в 1.5–3 раза (Семенов и др., 2019с). Полученные данные по профильному распределению архей и бактерий в серой лесной почве были сопоставимы с результатами, полученными для черноземов и бурых полупустынных почв (Семенов и др., 2019с; Семенов и др., 2016).

Запасы потенциально-минерализуемого и микробного углерода в 0–100 см слое целинной серой лесной почвы составляли 3.72 и 0.94 т/га соответственно, а в пахотной почве – 3.18 и 0.91 т/га. В отличие от запасов $C_{\text{орг}}$ пахотная почва оказалась реально обедненной потенциально-минерализуемым и микробным углеродом. Основное количество C_0 в целинной и пахотной серой лесной почве было сосредоточено в слое 0–20 см (61 и 51%, по сравнению со слоем 0–100 см). То же самое было характерно и для микробной биомассы (57 и 46% от запасов в слое 0–100 см). Ранее было предположено, что по запасам потенциально-минерализуемого органического вещества в слое 0–50 см можно предсказывать брутто-величину гетеротрофного дыхания почвы, исходя из того, что эмиссионные потери углерода из почвы не могут превышать его потенциально-минерализуемого количества, содержащегося в почве (Семенов и др., 2018). Судя по запасам C_0 в слоях 0–20 см и 0–50 см, эмиссионный потенциал целинной серой лесной почвы составляет 2.3 и 3.0 т/га, а пахотной почвы – 1.6 и 2.4 т/га. Для сравнения: годовая эмиссия C-CO₂ из серой лесной почвы под чистым паром составляла 2.3–3.3 т/га (Лопес де Гереню и др., 2018). Следовательно, величина потенциально-минерализуемого углерода в почве соизмерима с почвенным дыханием гетеротрофных микроорганизмов, использующих ПОВ. Более высокие размеры эмиссии C-CO₂ почвой с растениями вызваны дыханием корней и ассоциированного с ним ризомикробного сообщества, вклад которых в сумме может достигать до 77–83% (Лопес де Гереню и др., 2018).

Таким образом, измерение процессных пулов C_0 и $C_{\text{мик}}$ является способом биологического фракционирования ПОВ и позволяет оценивать эмиссионный потенциал почвы. Можно предполо-

жить, что эмиссионный потенциал почвы будет зависеть от минерализационной способности органического вещества структурных пулов РОМ и МАОМ, и, соответственно, от соотношения РОМ и МАОМ в составе ПОВ.

Минерализационная способность РОМ и МАОМ. В исследованиях последних лет пересматривается бытующее ранее представление о РОМ и МАОМ, как об облигатно лабильном и стабильном пулах соответственно (Angst et al., 2023). Оказалось, что в этих пулах присутствуют как биологически активные, так и химически инертные компоненты (Семенов и др., 2023с). Наличие корреляций $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ с C_0 и $C_{мик}$, как показано выше, свидетельствует об участии этих структурных пулов ПОВ в формировании запасов потенциально-минерализуемого органического вещества в серой лесной почве. В одной из предыдущих работ минерализуемость фракции РОМ (C_0 -РОМ) в серой лесной почве и типичном черноземе была в 2.8–7.6 раз больше, чем интактного образца почвы, а вклад РОМ в потенциально-минерализуемый пул этих почв составлял 36–86% (Семенов и др., 2019а).

Во фракции РОМ + песок содержалось в 2.7–8.0 раза больше потенциально-минерализуемого углерода (C_0 -РОМ), чем в МОАМ + пыль + глина (C_0 -МАОМ), при этом константы скорости минерализации были примерно одинаковыми (табл. 6). Более сильная минерализация РОМ, по сравнению с МАОМ, обнаружена и в других работах (Benbi et al., 2014). C_0 -МАОМ теснее коррелировал с C_0 всей почвы, чем C_0 -РОМ, как в случае серой лесной почвы (соответственно $r = 0.999$ и $r = 0.859$), так и для трех почв в целом (соответственно $r = 0.992$, $p < 0.001$ и $r = 0.850$, $p = 0.007$). Масса пула РОМ в серой лесной почве была в 4.5–32 раз меньше массы МАОМ пула, но фактический вклад РОМ в потенциально-минерализуемый пул почвы, по сравнению с вкладом МАОМ пула, был меньше всего лишь в 1.7–4.2 раза (20–41 и 71–87% от C_0).

В образцах дерново-подзолистой почвы и чернозема вклад C_0 -РОМ в C_0 был меньше вклада C_0 -МАОМ в 1.0–1.6 раз. В среднем для трех почв потенциально-минерализуемый пул почвы на $41 \pm 13\%$ представлен фракцией РОМ и на $71 \pm 11\%$ – фракцией МАОМ.

Таблица 6. Размеры минерализуемого пула (C_0) и константа скорости минерализации (k) твердых органических частиц (ПОМ) и минерально-ассоциированного органического вещества (МАОМ) в серой лесной почве
Table 6. Mineralizable pool size (C_0) and mineralization rate constant (k) of particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) in gray forest soil

Угодье, слой	C_0 фракции			C_0 фракции в перерасчете на всю почву		
	мг/100 г фракции	% от С фракции	k , сут ⁻¹	мг/100 г почвы	% от C_0 целой почвы	% от $C_{орг}$ целой почвы
ПОМ + песок						
Мелколиственный лес, 2–18 см	286 ± 10	7.7	0.021	50	41	2.7
То же, 18–66 см	59 ± 2	6.2	0.018	3	20	0.6
Пашня, 0–20 см	279 ± 1	9.1	0.017	22	36	1.8
То же, 20–61 см	120 ± 2	12.2	0.013	5	31	0.5
МАОМ + пыль + глина						
Мелколиственный лес, 2–18 см	105 ± 2	7.9	0.016	87	71	4.7
То же, 18–66 см	16 ± 0	3.0	0.029	15	85	2.6
Пашня, 0–20 см	50 ± 1	5.0	0.016	46	75	3.8
То же, 20–61 см	15 ± 0	2.4	0.015	15	87	1.5

Можно заметить, что суммарный вклад C_0 -РОМ и C_0 -МАОМ в C_0 всей почвы оказывается завышенным в среднем на 12%, чем при его определении в интактном образце. Это связано с дестабилизацией некоторой части защищенного органического вещества во фракциях РОМ и МАОМ при их гранулометрическом разделении, которое стало потенциально-минерализуемым (Семенов и др., 2015). В другой работе были получены более значительные превышения суммарной минерализации органического вещества трех гранулометрических фракций по сравнению с исходной почвой (Arevalo et al., 2012).

Таким образом, оба структурных пула РОМ и МАОМ содержат в себе биологически активное органическое вещество, способное к минерализации. Наши данные согласуются с выводом в работе (Yu et al., 2022), что РОМ и МАОМ вносят значительный вклад в разложение ПОВ, возможно, потому что РОМ и МАОМ имеют часто близкие характеристики минерализации и/или большой размер пула МАОМ может компенсировать его меньшую скорость разложения по сравнению с РОМ. Именно совокупный эффект РОМ и МАОМ пулов, а не какая-либо отдельная фракция ПОВ, создает эмиссионный потенциал почвы. Вклад в продукцию CO_2 небольшого $C_{РОМ}$ пула может быть ничуть не меньше, чем большого по размерам, но медленно оборачиваемого пула $C_{МАОМ}$.

Взаимосвязь структурных и процессных пулов ПОВ.

Размеры структурных и процессных пулов относительно валового содержания $C_{орг}$ в гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы соотносились ($C_{орг} : C_{МАОМ} : C_{РОМ} : C_0 : C_{мик}$) как 1 : 0.59 : 0.35 : 0.07 : 0.02, а в пахотном горизонте обрабатываемой почвы – 1 : 0.77 : 0.20 : 0.05 : 0.01. Для сравнения: в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве эти соотношения составляли соответственно 1 : 0.56 : 0.38 : 0.06 : 0.01 и 1 : 0.72 : 0.24 : 0.06 : 0.01, а в черноземе лугово-степной и сельскохозяйственной экосистем – 1 : 0.53 : 0.41 : 0.04 : 0.01 и 1 : 0.68 : 0.30 : 0.03 : 0.005. В нижнем горизонте серой лесной почвы соотношения между пулами были иными без особых различий между землепользованиями: в целинной – 1 : 0.91 : 0.05 : 0.02 : 0.01, а в пахотной – 1 : 0.93 : 0.05 : 0.02 : 0.01. То же самое было характерно и для нижних горизонтов це-

линных и пахотных угодий дерново-подзолистой почвы (1 : 0.89 : 0.16 : 0.04 : 0.01 и 1 : 0.84 : 0.11 : 0.04 : 0.01) и типичного чернозема (1 : 0.87 : 0.10 : 0.01 : 0.003 и 1 : 0.87 : 0.11 : 0.01 : 0.002). Из этих данных видно, что вид землепользования и глубина залегания в почвенном профиле оказывают более сильное влияние на соотношение углеродных пулов, чем тип почвы.

Содержание углерода в структурных и процессных пулах серой лесной почвы разных горизонтов и землепользований тесно коррелировало с общим $C_{\text{орг}}$ (табл. 7). Достоверными были связи содержаний углерода в пулах с $C_{\text{орг}}$ и в целом для трех зональных почв (табл. 7). Поэтому измерение пулов $C_{\text{МАОМ}}$, $C_{\text{РОМ}}$, C_0 и $C_{\text{мик}}$ должно стать обязательным этапом в мониторинге динамики ПОВ и в программах рекарбонизации почв агроэкосистем. Наличие корреляции между размерами пулов $C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$, как отдельно для серой лесной почвы, так и для трех зональных почв, указывает на общность исходного источника органического вещества для обоих этих пулов, которым являются растительные остатки, и на участие продуктов разложения РОМ в образовании МАОМ.

Достоверные, хотя и с разной теснотой, корреляции $C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$ с C_0 подтверждают способность компонентов РОМ и МАОМ к минерализации (табл. 7). Судя по коэффициентам корреляции, РОМ более доступно для минерализации микроорганизмами, чем МАОМ, согласуясь с ранее полученными результатами (Семенов и др., 2019а; Семенов и др., 2023с; Cotrufo et al., 2019, Lavallee et al., 2020). Вместе с тем роль МАОМ в краткосрочном разложении ПОВ, вероятно, недооценивается (Yu et al., 2022). Твердые органические частицы быстро и полно осваиваются почвенными микроорганизмами, которые используют $C_{\text{РОМ}}$ для поддержания жизнедеятельности и на синтез новой биомассы (Xiao et al., 2017). Поэтому $C_{\text{РОМ}}$ достаточно тесно коррелировал с $C_{\text{мик}}$, как в образцах серой лесной почвы, так и дерново-подзолистой почвы и чернозема.

Связь между $C_{\text{МАОМ}}$ и $C_{\text{мик}}$ объясняется участием микробной некромассы в формировании МАОМ. В отличие от $C_{\text{РОМ}}$ связь $C_{\text{МАОМ}}$ и $C_{\text{мик}}$ была достоверной в дерново-подзолистой и в серой лесной почвах, а в черноземе она была незначимой.

Таблица 7. Корреляционная матрица зависимостей между размерами структурных и процессных пулов углерода в профилях зональных почв разного землепользования

Table 7. Correlation matrix of dependencies between sizes of structural and process carbon pools in profiles of zonal soils under different land use

Параметр	C _{орг}		C _{РОМ}		C _{МАОМ}		C ₀		C _{мик}	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
C _{орг}	$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.973}{0.922}$	$\frac{0.001}{<0.001}$	$\frac{0.976}{0.969}$	$\frac{0.001}{<0.001}$	$\frac{0.991}{0.791}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$	$\frac{0.991}{0.626}$	$\frac{<0.001}{0.005}$
C _{РОМ}			$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.900}{0.800}$	$\frac{0.014}{<0.001}$	$\frac{0.994}{0.912}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$	$\frac{0.990}{0.751}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$
C _{МАОМ}					$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.941}{0.651}$	$\frac{0.005}{0.003}$	$\frac{0.945}{0.494}$	$\frac{0.004}{0.037}$
C ₀							$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.999}{0.952}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$
C _{мик}									$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет

Примечание. Над чертой – серя лесная почва (n = 6), под чертой – дерново-подзолистая почва, серая лесная почва, типичный чернозем (n = 18).

Note. Above the line – gray forest soil (n = 6), below the line – soddy-podzolic soil, gray forest soil, typical chernozem (n = 18).

Очевидно, что оборот микробной биомассы в профиле типичного чернозема был не столь велик, чтобы изменить размеры МАОМ пула. Содержания C_0 и $C_{\text{мик}}$ тесно коррелировали между собой во всех трех зональных почвах. С одной стороны, почвенные микроорганизмы напрямую используют потенциально-минерализуемое органическое вещество, которое служит источником энергии и питания, с другой стороны, микробная некромаасса является наиболее доступным для минерализации субстратом.

Таким образом, между размерами структурных и процессных пулов в разных почвах обнаруживается определенная стехиометрия. Соотношения между пулами чувствительны к профильному расположению почвенных горизонтов и типу землепользования. Величины пулов коррелируют друг с другом и с общим $C_{\text{орг}}$, указывая на вовлеченность компонентов структурных и процессных пулов в оборот углерода и на возможность получения полного и разностороннего представления о качестве ПОВ путем подразделения его на пулы биологическими, физическими и химическими способами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серые лесные почвы являются значимым резервуаром органического углерода ($C_{\text{орг}}$). В зависимости от подтипа содержание $C_{\text{орг}}$ в гумусовом горизонте серых лесных почв целинных и залежных угодий на территории Российской Федерации варьирует от 1.24 до 5.16%, а в пахотном горизонте – от 0.70 до 4.74%. Подтипы серой лесной почвы отчетливо различаются по содержанию $C_{\text{орг}}$ в органогенном горизонте. Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в светло-серой лесной почве под естественными угодьями и под пашней составляет 2.16 ± 0.67 и $1.36 \pm 0.40\%$, в типичной серой лесной почве – 2.39 ± 0.61 и $1.72 \pm 0.40\%$, в темно-серой лесной почве – 3.58 ± 0.95 и $2.84 \pm 0.86\%$ соответственно. Одна из причин обеднения органическим углеродом верхнего слоя пахотных серых лесных почв – перераспределение органического вещества в подпахотные горизонты, вследствие чего запасы $C_{\text{орг}}$ в метровой толще пахотной почвы могут быть даже больше, чем в целинной почве.

В серой лесной почве в зависимости от глубины в профиле и

землепользования от 59 до 93% $C_{\text{орг}}$ представлено фракцией минерально-ассоциированного органического вещества (МАОМ), сосредоточенного в гранулометрической фракции < 0.05 мм. Соответственно, 5–35% $C_{\text{орг}}$ содержится в виде твердых органических частиц (РОМ) размером 0.05–2 мм. В пахотных почвах и в подповерхностных горизонтах доля $C_{\text{МАОМ}}$ в составе $C_{\text{орг}}$ увеличивается, а $C_{\text{РОМ}}$ – снижается. Массовое содержание углерода в структурных пулах нижних горизонтов не зависело от землепользования. Отношения $C : N$ в интактных образцах почвы, фракциях РОМ и МАОМ в поверхностных горизонтах разного землепользования равнялись 1 : 1.44 : 0.78 соответственно, а в нижних горизонтах – 1 : 1.70 : 0.72.

В процессных пулах целинной серой лесной почвы, представленных потенциально-минерализуемым органическим веществом (C_0) и микробной биомассой ($C_{\text{мик}}$) содержалось 6.6 и 1.6% от $C_{\text{орг}}$. Распределение углерода по профилю почвы процессных пулов, также как и структурных, было сходным с общим $C_{\text{орг}}$. Верхний слой пахотной почвы обеднен C_0 и $C_{\text{мик}}$ соответственно в 2 и 1.8 раз по сравнению с целинной. До 24–38% потенциально-минерализуемого органического вещества серой лесной почвы могло быть представлено микробной биомассой. Массовое содержание углерода в процессных пулах нижних горизонтов почвы было одинаковым при обоих землепользованиях.

Размеры структурных и процессных пулов относительно валового содержания $C_{\text{орг}}$ в гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы соотносились ($C_{\text{орг}} : C_{\text{МАОМ}} : C_{\text{РОМ}} : C_0 : C_{\text{мик}}$) как 1 : 0.59 : 0.35 : 0.07 : 0.02, а в пахотном горизонте обрабатываемой почвы – 1 : 0.77 : 0.20 : 0.05 : 0.01. В нижнем горизонте серой лесной почвы соотношения между пулами были иными без особых различий между землепользованиями. Размеры структурных и процессных пулов ПОВ коррелировали друг с другом и с $C_{\text{орг}}$.

Фракции РОМ и МАОМ содержат потенциально-минерализуемые компоненты (6.2–12.2 и 2.4–7.9% от массы РОМ и МАОМ соответственно). Процентная доля потенциально-минерализуемого углерода в структурных пулах меняется с глубиной почвенного слоя и практически не зависит от землепользования. Потенциально-минерализуемый пул органического веще-

ства серой лесной почвы на 20–41% представлен фракцией твердых органических частиц и на 71–87% фракцией минерально-ассоциированного органического вещества. Определение потенциально-минерализуемого углерода в почве является способом верификации полевых оценок гетеротрофного источника в годовом потоке CO₂, а измерение пулов структурных и процессных пулов должно стать обязательным этапом в мониторинге динамики ПОВ и при оценке эффективности приемов по рекарбонизации почв агроэкосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова А.Б., Иванов Д.В., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Марасов А.А., Паймикина Э.Е., Рупова Э.Х.* Динамика содержания гумуса и его запасов в почвах Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2015. № 3. С. 13–17.
2. *Алифанов В.М.* Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушино: ОНТИ НЦБИ РАН, 1995. 318 с.
3. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г.* Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.
4. *Артемьева З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
5. *Артемьева З.С., Травникова Л.С.* Изменение характеристик органического вещества и глинистых минералов серых почв в процессе агропедогенеза // Почвоведение. 2006. № 1. С. 96–107.
6. *Ахтырцев Б.П.* Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1979. 231 с.
7. *Ахтырцев Б.П., Ефанова Е.В.* Изменение свойств и плодородия темно-серых лесостепных почв юга-востока Окско-Донской низменности при интенсивном сельскохозяйственном использовании // Плодородие почв Среднерусской лесостепи и пути регулирования. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1988. С. 49–60.
8. *Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудеяров В.Н.* Физические свойства и изменение запасов углерода Серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 345–353. DOI: [10.7868/S0032180X17030029](https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029).
9. *Богатова М.К., Щеглов Д.И.* Органическое вещество в профиле темно-серых лесных почв под различными типами фитоценозов

Тульской области // Вестник Воронежского университета. Серия: Химия, Биология, Фармация. 2005. № 2. С. 121–125.

10. *Гришина Л.А.* Гумусообразование и гумусное состояние почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.

11. *Дядькина С.Е.* Содержание гумуса в верхнем горизонте серых лесных почв по литературным источникам 1963–2010 годов // Почвоведение – основа продовольственной и экологической безопасности страны. Часть II. Москва-Белгород: Издательский дом “Белгород”, 2016. С. 248–249.

12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.

13. *Ерёмин Д.И., Груздева Н.А., Ерёмин Д.В.* Изменение гумусового состояния серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато под действием длительной распашки // Почвоведение. 2018. № 7. С. 826–835. DOI: [10.1134/S0032180X18070110](https://doi.org/10.1134/S0032180X18070110).

14. *Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемьева 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).

15. *Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В.* Эколого-гидрологическая оценка светло-серых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом // Почвоведение. 1994. № 1. С. 116–127.

16. *Зинякова Н.Б., Ходжаева А.К., Тулина А.С., Семенов В.М.* Активное органическое вещество в серой лесной почве пахотных и залежных земель // Агрохимия. 2013. № 9. С. 3–14.

17. *Иванов П.А., Кузин Е.Н.* Изменение плодородия серой лесной почвы под влиянием химической и биологической мелиорации // Земледелие. 2009. № 1. С. 18–20.

18. *Иванова Т.Н., Багаутдинов Ф.Я., Кулинецова Е.П.* Гумусовое состояние серых лесных почв Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Аграрная наука в инновационном развитии АПК. Часть I. Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. С. 79–83.

19. *Исмаилова Н.Х.* Изменение содержания и качества органического вещества в агросерых почвах Нечерноземной зоны в зависимости от антропогенного воздействия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 13–22. DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-13-22](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-13-22).

20. *Ковалев И.В., Семенов В.М., Ковалева Н.О., Лебедева Т.Н., Яковлева В.М., Паутова Н.Б.* Оценка биогенности и биоактивности агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв // Почвоведение. 2021. № 7. С. 827–837. DOI: [10.31857/S0032180X21070078](https://doi.org/10.31857/S0032180X21070078).

21. *Козут Б.М.* Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944–952.
22. *Козут Б.М., Семенов В.М.* Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе // Агрохимия. 2015. № 12. С. 3–19.
23. *Кодочилова Н.А., Бузынина Т.С., Варламова Л.Д., Катерова Е.А.* Влияние систематического внесения минеральных удобрений и длительного последствия известкования на органическое вещество светло-серой лесной почвы // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21(2). С. 160–168. DOI: [10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168).
24. *Комарова Н.А., Козлова Л.М.* Изменение содержания гумуса в светло-серой лесной почве под влиянием различных паров // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016. № 3. С. 5–14.
25. *Липатов Д.Н., Лыжин В.А., Вежливцева Л.А.* Пространственное распределение и многолетняя динамика содержания гумуса в агроландшафтах Тульской области // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 3. С. 35–41.
26. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А.* Влияние контрастных режимов увлажнения на эмиссию CO₂ из серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1244–1258. DOI: [10.1134/S0032180X18100039](https://doi.org/10.1134/S0032180X18100039).
27. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Щенисенко Е.А., Нефедова Т.Т.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
28. *Недбаев В.Н., Мальшиева Е.В.* Содержание гумуса в темно-серых лесных почвах и его трансформация в агроландшафтах Центрально-Черноземной зоны // Вестник Курской ГСХА. 2018. № 8. С. 65–70.
29. *Никитин Д.А., Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К., Никитина С.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Кутовая О.В.* Сезонная динамика биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1356–1364. DOI: [10.1134/S0032180X19110078](https://doi.org/10.1134/S0032180X19110078).
30. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Изменение содержания гумуса на серых лесных почвах при длительном применении удобрений // Российская сельскохозяйственная наука. 2016. № 1. С. 21–26.
31. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
32. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.

33. *Пивоварова Е.Г., Кононцева Е.В., Хлуденцов Ж.Г., Домникова Е.Ю.* Оценка современного состояния серых лесных почв умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края // Вестник Алтайского ГАУ. 2014. № 12. С. 55–60.
34. *Полякова Н.В.* Гумусное состояние пахотных серых лесных почв // Плодородие. 2007. № 1. С. 19–20.
35. *Полякова Н.В., Платонычева Ю.Н., Володина Е.Н.* Особенности почвообразования в серых лесных почвах под влиянием антропогенного фактора // Плодородие. 2011. № 4. С. 32–34.
36. Почвы Московской области и их использование. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2002. Т. 1. 500 с.
37. *Рябинина О.В.* Оценка свойств серой лесной почвы под посевами многолетних трав // Вестник ИРГСХА. 2012. № 52. С. 21–28.
38. *Семенов В.М., Журавлев Н.С., Тулина А.С.* Минерализация органического вещества в серой лесной почве и типичном черноземе, обесструктуренных физическими воздействиями // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1254–1266. DOI: [10.7868/S0032180X1510010X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1510010X).
39. *Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В.* Структурно–функциональное состояние органического вещества почвы // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Москва: Наука, 2006. С. 230–247.
40. *Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. DOI: [10.7868/S0032180X1804007X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X).
41. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Соколов Д.А.* Размеры и соотношения пулов органического углерода в серой лесной почве при многолетнем применении минеральных и органических удобрений // Почвоведение. 2023а. № 4. С. 482–501. DOI: [10.31857/S0032180X22601426](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601426).
42. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Хромычкина Д.П., Соколов Д.А., Лопес де Гереню В.О., Кравченко И.К., Ли Х., Семенов М.В.* Зависимость разложения органического вещества почвы и растительных остатков от температуры и влажности в длительных инкубационных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 860–875. DOI: [10.31857/S0032180X22070085](https://doi.org/10.31857/S0032180X22070085).
43. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н.* Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023б. Т. 6. № 1. e199. DOI: [10.31251/pos.v6i1.199](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199).

44. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019а. № 4. С. 440–450. DOI: [10.1134/S0032180X19040130](https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130).
45. 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. 2023с. № 9. С. 1155–1172. DOI: [10.31857/S0032180X23600427](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427).
46. Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019b. № 10. С. 1172–1184. DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113).
47. 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. 2019с. № 8. С. 974–985. DOI: [10.1134/S0032180X19080124](https://doi.org/10.1134/S0032180X19080124).
48. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Степанов А.Л. Распределение метаболически активных представителей прокариот (архей и бактерий) по профилям чернозема и бурой полупустынной почвы // Почвоведение. 2016. № 2. С. 239–248. DOI: [10.7868/S0032180X16020106](https://doi.org/10.7868/S0032180X16020106).
49. Соколов Д.А., Дмитриевская И.И., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Черников В.А., Семенов В.М. Исследование стабильности почвенного органического вещества методами дериватографии и длительной инкубации // Почвоведение. 2021. № 4. С. 407–419. DOI: [10.31857/S0032180X21040146](https://doi.org/10.31857/S0032180X21040146).
50. Сорокина О.А. Оценка трансформации плодородия серых почв по степени гумусированности // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3(138). С. 240–246.
51. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536. DOI: [10.31857/S0032180X20120138](https://doi.org/10.31857/S0032180X20120138).
52. Титова В.И., Артемьева З.С., Архангельская А.М. Агрогенная трансформация органического вещества светло-серой лесной легкосуглинистой почвы (по исследованиям в длительном опыте) // Известия ТСХА. 2013. Вып. 3. С. 18–30.

53. *Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С.* Географо-генетические особенности гумусового состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1377–1390.
54. *Ушаков Р.Н.* Качественный состав гумуса серой лесной почвы при внесении удобрений // Плодородие. 2007. № 1. С. 17–18.
55. *Хабиров И.К.* Экология и биохимия азота в почвах Приуралья. Уфа: УНЦ РАН, 1993. 224 с.
56. *Хабиров И.К., Габбасова И.М., Хазиев Ф.Х.* Устойчивость почвенных процессов. Уфа: БГАУ, 2001. 327 с.
57. *Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504. DOI: [10.7868/S0032180X15120102](https://doi.org/10.7868/S0032180X15120102).
58. *Чендев Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С., Смирнова Л.Г., Новых Л.Л., Долгих А.В.* Антропогенная эволюция серых лесостепных почв южной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2011. № 1. С. 3–15.
59. *Чендев Ю.Г.* Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.
60. *Чимитдоржиева Г.Д.* Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. 388 с.
61. *Шпедт А.А., Трубников Ю.Н.* Оценка скорости изменения гумусового состояния дерново-подзолистых и серых лесных почв в условиях залежи // Управление почвенным плодородием и питание культурных растений. Омск: ЛИТЕРА, 2015. С. 185–190.
62. *Якименко В.Н., Конарбаева Г.А.* Трансформация фонда тяжелых металлов серой лесной почвы в агроценозе // Агрохимия. 2016. № 4. С. 61–69.
63. *Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W.* Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key // Nature Communications. 2023. Vol. 14. Art. No. 2967. DOI: [10.1038/s41467-023-38700-5](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5).
64. *Arevalo C.B.M., Chang S.X., Bhatti J.S., Sidders D.* Mineralization Potential and Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon under Different Land Uses in the Parkland Region of Alberta, Canada // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. Vol. 76(1). P. 241–251. DOI: [10.2136/sssaj2011.0126](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0126).
65. *Begill N., Don A., Poeplau C.* No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils // Global Change Biol. 2023. Vol. 29(16). P. 4662–4669. DOI: [10.1111/gcb.16804](https://doi.org/10.1111/gcb.16804).
66. *Benbi D.K., Boparai A.K., Brar K.* Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic

- matter // *Soil Biol. Biochem.* 2014. Vol. 70. P. 183–192. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.12.032](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.032).
67. *Cambardella C.A., Elliott E.T.* Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. Vol. 56(3). P. 777–783. DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).
68. *Cotrufo M.F., Haddix M.L., Kroeger M.E., Stewart C.E.* The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 168. Art. No. 108648. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108648](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648).
69. *Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nature Geoscience.* 2019. Vol. 12. P. 989–994. DOI: [10.1038/s41561-019-0484-6](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6).
70. *Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global Change Biol.* 2013. Vol. 19(4). P. 988–995. DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).
71. *Derrien D., Barré P., Basile - Doelsch I., Cécillon L., Chabbi A., Crème A., Fontaine S., Henneron L., Janot N., Lashermes G., Quénéa K., Rees F., Dignac M.F.* Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review // *Agronomy Sust. Develop.* 2023. Vol. 43. Art. No. 21. DOI: [10.1007/s13593-023-00876-x](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00876-x).
72. *Dobarco M.R., Wadoux A.M.J-C., Malone B., Minasny B., McBratney A.B., Searle R.* Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty // *Biogeosciences.* 2023. Vol. 20. P. 1559–1586. DOI: [10.5194/bg-20-1559-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023).
73. *Haddix M.L., Gregorich E.G., Helgason B.L., Janzen H., Ellert B.H., Cotrufo M.F.* Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil // *Geoderma.* 2020. Vol. 363. Art. No. 114160. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114160](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160).
74. *Just C., Armbruster M., Barkusky D., Baumecker M., Diepolder M., Döring T.F., Heigl L., Honermeier B., Jate M., Merbach I., Rusch C., Schubert D., Schulz F., Schweitzer K., Seidel S., Sommer M., Spiegel H., Thumm U., Urbatzka P., Zimmer J., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M.* Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as derived from particulate and mineral-associated organic matter // *Geoderma.* 2023. Vol. 434. Art. No. 116472. DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116472).

75. *Just C., Poeplau C., Don A., van Wesemael B., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M.* A simple approach to isolate slow and fast cycling organic carbon fractions in Central European Soils – importance of dispersion method // *Front. Soil Sci.* 2021. Vol. 1. Art. No. 692583. DOI: [10.3389/fsoil.2021.692583](https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.692583).
76. *Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S.* Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management // *Understanding and fostering soil carbon sequestration*. Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022. P. 1–36. DOI: [10.19103/AS.2022.0106.02](https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02).
77. *Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F.* Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Global Change Biol.* 2020. Vol. 26(1). P. 261–273. DOI: [10.1111/gcb.14859](https://doi.org/10.1111/gcb.14859).
78. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
79. *Liang C.* Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal // *Soil Ecol. Lett.* 2020. Vol. 2. P. 241–254. DOI: [10.1007/s42832-020-0052-4](https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4).
80. *Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M.* Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter // *Global Change Biol.* 2019. Vol. 25(11). P. 3578–3590. DOI: [10.1111/gcb.14781](https://doi.org/10.1111/gcb.14781).
81. *Lugato E., Lavallee J.M., Haddix M.L., Panagos P., Cotrufo M.F.* Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 295–300. DOI: [10.1038/s41561-021-00744-x](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x).
82. *Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F. et al.* Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 125. P. 10–26. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025).
83. *Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I., Höschen C., Schweizer S.A., Buegger F., Pouteau V., Chenu C., Mueller C.W.* Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. No. 4115. DOI: [10.1038/s41467-021-24192-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8).
84. *Xiao K.Q., Zhao Y., Liang C., Zhao M., Moore O.W., Otero-Fariña A., Zhu Y.G., Johnson K., Peacock C.L.* Introducing the soil mineral carbon pump // *Nature Rev. Earth Environ.* 2023. DOI: [10.1038/s43017-023-00396-y](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y).
85. *Xiao W., Feng S., Liu Z., Su Y., Zhang Y., He X.* Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils // *Soil Biol. Biochem.* 2017. Vol. 107. P. 85–93. DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.12.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.025).

86. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 172. Art. No. 108756. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108756](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756).

REFERENCES

1. Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Malanin V.V., Khasanov R.R., Marasov A.A., Pajmikina E.E., Rupova E.H., Dinamika sodержaniya gumusa i ego zapasov v pochvah Respubliki Tatarstan (Dynamics of humus content and its reserves in the soils of the Republic of Tatarstan), *Rossijskij zurnal prikladnoj ekologii*, 2015, No. 3, pp. 13–17.
2. Alifanov V.M., *Paleokriogenez i sovremennoe pochvoobrazovanie* (Paleocryogenesis and modern soil formation), Pushchino, ONTI NCBI RAN, 1995, 318 p.
3. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Gavrilenko E.G., Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44(11), pp. 1215–1221, DOI: [10.1134/S1064229311030021](https://doi.org/10.1134/S1064229311030021).
4. Artem'eva Z.S., *Organicheskoe veshchestvo i granulometricheskaya sistema pochvy* (Organic matter and granulometric system of the soil), Moscow: GEOS, 2010, 240 p.
5. Artem'eva Z.S., Travnikova L.S., Transformation of organic matter and clay minerals in cultivated gray forest soils, *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No. 1, pp. 84–94.
6. Akhtyrcev B.P., *Serye lesnye pochvy Central'noj Rossii* (Gray forest soils of Central Russia), Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1979, 231 p.
7. Akhtyrcev B.P., Efanova E.V., *Izmenenie svojstv i plodorodiya temnoseryh lesostepnyh pochv yuga-vostoka Oksko-Donskoj nizmennosti pri intensivnom zemledel'cheskom ispol'zovanii* (Changes in the Properties and Fertility of Dark Gray Forest-Steppe Soils in the South-East of the Oka-Don Lowland under Intensive Agricultural Use), In: *Plodorodie pochv Srednerusskoj lesostepi i puti regulirovaniya*, Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo universiteta, 1988, pp. 49–60.
8. Baeva Y.I., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kudryarov V.N., Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50(3), pp. 327–334, DOI: [10.1134/S1064229317030024](https://doi.org/10.1134/S1064229317030024).

9. Bogatova M.K., Shcheglov D.I., Organicheskoe veshchestvo v profile temno-seryh lesnyh pochv pod razlichnymi tipami fitocenozov Tul'skoj oblasti (Organic matter in the profile of dark gray forest soils under various types of phytocenoses in the Tula region), *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Himiya, Biologiya, Farmaciya*, 2005, No. 2, pp. 121–125.
10. Grishina L.A., Gumusoobrazovanie i gumusnoe sostoyanie pochv (*Humus formation and humus state of soils*), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986, 244 p.
11. Dyad'kina S.E., Soderzhanie gumusa v verhnem gorizonte seryh lesnyh pochv po literaturnym istochnikam 1963–2010 godov (Humus content in the upper horizon of gray forest soils according to literary sources of 1963–2010), *Pochvovedenie – osnova prodovol'stvennoj i ekologicheskoy bezopasnosti strany*, Part II, Moskva-Belgorod: Izdatel'skij dom “Belgorod”, 2016, pp. 248–249.
12. Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii (*Unified State Register of Soil Resources of Russia*), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva Rossel'hoz akademii, 2014, 768 p.
13. Eremin D.I., Gruzdeva N.A., Eremina D.V., Izmenenie gumusovogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv vostochnoj okrainy Zaural'skogo plato pod dejstviem dlitel'noj raspashki (Changes in the Humus Status of Gray Forest Soils in the Eastern Outskirts of the Trans-Ural Plateau under the Effect of Long-Term Plowing), *Pochvovedenie*, 2018, No. 7, pp. 826–835, DOI: [10.1134/S0032180X18070110](https://doi.org/10.1134/S0032180X18070110).
14. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M., Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54(12), pp. 1826–1854, DOI: [10.1134/S1064229321120164](https://doi.org/10.1134/S1064229321120164).
15. Zaidelman F.R., Kovalev I.V., Ekologo-gidrologicheskaya ocenka svetloseryh ogleennyh pochv, osushennyh bestranshejnym i transhejnym drenazhom (Ecological-hydrological evaluation of light gray gleyed soils drained by trench and non-trench drainage), *Pochvovedenie*, 1994, No. 1, pp. 116–127.
16. Zinyakova N.B., Hodzhaeva A.K., Tulina A.S., Semenov V.M., Aktivnoe organicheskoe veshchestvo v seroj lesnoj pochve pahotnyh i zaleznyh zemel' (Active Organic Matter in the Gray Forest Soil of Arable and Fallow Lands), *Agrokhimiya*, 2013, No. 9, pp. 3–14.
17. Ivanov P.A., Kuzin E.N., Izmenenie plodorodiya seroj lesnoj pochvy pod vliyaniem himicheskoy i biologicheskoy melioracii (Changes in the gray forest soil fertility under the influence of chemical and biological melioration), *Zemledelie*, 2009, No. 1, pp. 18–20.
18. Ivanova T.N., Bagautdinov F.Ya., Kulintseva E.P., Gumusovoe sostoyanie seryh lesnyh pochv Predural'ya pri razlichnom sel'skochozyajstvennom

- ispol'zovanii (Humus status of grey forest soils in Preduralie various agricultural use), *Agrarnaya nauka v innovacionnom razvitii APK*, Part I, Ufa: Bashkirskij GAU, 2015, pp. 79–83.
19. Ismagilova N.H., Changes in the Content and Quality of Organic Matter in Agro-Gray Soils of the Non-Chernozem Zone Depending on Anthropogenic Impact, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2010, No. 65, pp. 13–22, DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-13-22](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-13-22).
20. Kovalev I.V., Semenov V.M., Kovaleva N.O., Lebedeva T.N., Yakovleva V.M., Pautova N.B., Estimation of the Biogenicity and Bioactivity of Gleyed Agrogray Nondrained and Drained Soils, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54(7), pp. 1059–1067, DOI: [10.1134/S1064229321070073](https://doi.org/10.1134/S1064229321070073).
21. Kogut B.M., Assessment of the humus content in arable soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45(9), pp. 843–851, DOI: [10.1134/S1064229312090062](https://doi.org/10.1134/S1064229312090062).
22. Kogut B.M., Semenov V.M., Evolyuciya dominiruyushchih paradig v uchenii o gumuse i pochvennom organicheskom veshchestve (Evolution of the Dominant Paradigms in the Theory of Humus and Soil Organic Matter), *Agrokhimiya*, 2015, No. 12, pp. 3–19.
23. Kodochilova N.A., Buzynina T.S., Varlamova L.D., Katerova E.A., Vliyanie sistematicheskogo vneseniya mineral'nyh udobrenij i dlitel'nogo posledejstviya izvestkovaniya na organicheskoe veshchestvo svetlo-seroj lesnoj pochvy (Effect of systematic application of mineral fertilizers and long-term aftereffect of liming on the organic matter of light-grey forest soil), *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2020, Vol. 21(2), pp. 160–168, DOI: [10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168).
24. Komarova N.A., Kozlova L.M., Izmenenie soderzhaniya gumusa v svetlo-seroj lesnoj pochve pod vliyaniem razlichnyh parov (Changes in humus content in light-gray forest soil as influenced by various fallows), *Sibirskij vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki*, 2016, No. 3, pp. 5–14.
25. Lipatov D.N., Lyzhin V.A., Vezhlivceva L.A. Prostranstvennoe raspredelenie i mnogoletnyaya dinamika soderzhaniya gumusa v agrolandshaftah Tul'skoj oblasti (Spatial distribution and long-term dynamics of humus content in agricultural landscapes of the Tula region), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2005, No. 3, pp. 35–41.
26. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Khoroshaev D.A., The Effect of Contrasting Moistening Regimes on CO₂ Emission from the Gray Forest Soil under a Grass Vegetation and Bare Fallow, *Eurasian Soil Sci.*, 2018, Vol. 51(10), pp. 1200–1213, DOI: [10.1134/S1064229318100034](https://doi.org/10.1134/S1064229318100034).
27. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Shchenisenko E.A., Nefedova T.T., *Dinamika sel'skohozyajstvennyh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochvy* (Dynamics of agricultural

lands in Russia in the 20th century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils), Moscow: GEOS, 2010, 416 p.

28. Nedbaev V.N., Malysheva E.V., Soderzhanie gumusa v temno-seryh lesnyh pochvah i ego transformaciya v agrolandshaftah Central'no-Chernozemnoj zony (The humus content in dark gray forest soils and its transformation in the agricultural landscapes of the Central Black Earth zone), *Vestnik Kurskoj GSKHA*, 2018, No. 8, pp. 65–70.

29. Nikitin D.A., Chernov T.I., Zhelezova A.D., Tkhakakhova A.K., Nikitina S.A., Semenov M.V., Xenofontova N.A., Kutovaya O.V., Seasonal Dynamics of Microbial Biomass in Soddy-Podzolic Soil, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52(11), pp. 1414–1421, DOI: [10.1134/S1064229319110073](https://doi.org/10.1134/S1064229319110073).

30. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Fenova O.A., Izmenenie sodержaniya gumusa na seryh lesnyh pochvah pri dlitel'nom primenenii udobrenij (Change the content of humus on gray forest soils with long-term use of fertilizers), *Rossijskaya sel'skohozyajstvennaya nauka*, 2016, No. 1, pp. 21–26.

31. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S., Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoyaniya pochv i ih geneticheskikh gorizontov (Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.

32. Orlov D.S., Biryukova O.N., Suhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossijskoj Federacii* (Organic matter of soils in the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 256 p.

33. Pivovarov E.G., Konontseva E.V., Khludencov J.G., Domnikova E.Y., Ocenka sovremennogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv umerenno zasushlivoj i kolochnoj stepi Altajskogo kraja (*The evaluation of the current state of gray forest soils of temperately arid and forest-outlier steppe of the Altai region*), *Vestnik Altajskogo GAU*, 2014, No. 12, pp. 55–60.

34. Polyakova N.V., Gumusnoe sostoyanie pahotnyh seryh lesnyh pochv (Humus state of arable gray forest soils), *Plodorodie*, 2007, No. 1, pp. 19–20.

35. Polyakova N.V., Platonycheva Y.N., Volodina E.N., Osobennosti pochvoobrazovaniya v seryh lesnyh pochvah pod vliyaniem antropogennogo faktora (Pedogenesis features in gray forest soils under the effect of anthropogenic factor), *Plodorodie*, 2011, No. 4, pp. 32–34.

36. *Pochvy Moskovskoj oblasti i ih ispol'zovanie* (Soils of the Moscow region and their use), Moscow: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2002, Vol. 1, 500 p.

37. Ryabinina O.V., Ocenka svojstv seroj lesnoj pochvy pod posevami mnogoletnih trav (Evaluation of the gray forest soil properties for planting perennial plants), *Vestnik IrGSKHA*, 2012, No. 52, pp. 21–28.

38. Semenov V.M., Zhuravlev N.S., Tulina A.S., Mineralization of Organic Matter in Gray Forest Soil and Typical Chernozem with Degraded Structure due to Physical Impacts, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(10), pp. 1136–1148, DOI: [10.1134/S1064229315100105](https://doi.org/10.1134/S1064229315100105).
39. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Strukturno–funktional'noe sostoyanie organicheskogo veshchestva pochvy (Structural-functional status of soil organic matter), In: *Pochvennyye processy i prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochv* (Soil processes and time and spatial organization of soils), Moscow: Nauka, 2006, pp. 230–247.
40. Semenov V.M., Kogut B.M., Zinyakova N.B., Masyutenko N.P., Malyukova L.S., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Biologically Active Organic Matter in Soils of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 434–447, DOI: [10.1134/S1064229318040117](https://doi.org/10.1134/S1064229318040117).
41. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Sokolov D.A., Sizes and Ratios of Organic Carbon Pools in Gray Forest Soil under Long-Term Application of Mineral and Organic Fertilizers, *Eurasian Soil Sci.*, 2023a, Vol. 56(4), pp. 470–487, DOI: [10.1134/S1064229322602517](https://doi.org/10.1134/S1064229322602517).
42. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Khromychkina D.P., Sokolov D.A., Lopes de Gerenyu V.O., Kravchenko I.K., Li H., Semenov M.V., Dependence of Soil Organic Matter and Plant Residues Decomposition on Temperature and Moisture in the Long-Term Incubation Experiments, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55(7), pp. 926–939, DOI: [10.1134/S1064229322070080](https://doi.org/10.1134/S1064229322070080).
43. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N., Puly i frakcii organicheskogo ugleroda v pochve: struktura, funkcii i metody opredeleniya (Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination), In: *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2023b, Vol. 6, No. 1, e199, DOI: [10.31251/pos.v6i1.199](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199).
44. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Pautova N.B., Particulate Organic Matter in Noncultivated and Arable Soils, *Eurasian Soil Science*, 2019a, Vol. 52(4), pp. 396–404, DOI: [10.1134/S1064229319040136](https://doi.org/10.1134/S1064229319040136).
45. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Zinyakova N.B., Lopes de Gerenyu V.O., Semenov M.V., Measurement of the Soil Organic Carbon Pools Isolated Using Bio-Physical-Chemical Fractionation Methods, *Eurasian Soil Science*, 2023c, Vol. 56(9), pp. 1327–1342, DOI: [10.1134/S1064229323601154](https://doi.org/10.1134/S1064229323601154).
46. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromychkina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O., Plant Residues Decomposition and Formation of Active Organic Matter in the Soil of the Incubation Experiments,

Eurasian Soil Science, 2019b, Vol. 52(10), pp. 1183–1194, DOI: [10.1134/S1064229319100119](https://doi.org/10.1134/S1064229319100119).

47. Semenov M.V., Manucharova N.A., Krasnov G.S., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Biomass and Taxonomic Structure of Microbial Communities in Soils of the Right-Bank Basin of the Oka River, *Eurasian Soil Sci.*, 2019c, Vol. 52, pp. 971–981, DOI: [10.1134/S106422931908012X](https://doi.org/10.1134/S106422931908012X).

48. Semenov M.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L., Distribution of metabolically active prokaryotes (Archaea and Bacteria) throughout the profiles of chernozem and brown semidesert soil, *Eurasian Soil Sci.*, 2016, Vol. 49(2), pp. 217–225, DOI: [10.1134/S1064229316020101](https://doi.org/10.1134/S1064229316020101).

49. Sokolov D.A., Dmitrevskaya I.I., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Chernikov V.A., Semenov V.M., A study of soil organic matter stability using derivatography and long-term incubation methods, *Eurasian soil science*, 2021, Vol. 54(4), pp. 487–498, DOI: [10.1134/S1064229321040141](https://doi.org/10.1134/S1064229321040141).

50. Sorokina O.A., Ocenka transformacii plodorodiy seryh pochv po stepeni gumusirovannosti (The assessment of grey soils fertility transformation according to the degree of humus content), *Vestnik KrasGAU*, 2018, No. 3(138), pp. 240–246.

51. Sychev V.G., Naliukhin A.N., Shevtsova L.K., Rukhovich O.V., Belichenko M.V., Influence of Fertilizer Systems on Soil Organic Carbon Content and Crop Yield: Results of Long-Term Field Experiments at the Geographical Network of Research Stations in Russia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53(12), pp. 1794–1808, DOI: [10.1134/S1064229320120133](https://doi.org/10.1134/S1064229320120133).

52. Titova V.I., Artem'eva Z.S., Arhangel'skaya A.M., Agrogennaya transformaciya organicheskogo veshchestva svetlo-seroj lesnoj legkosuglinistoj pochvy (po issledovaniyam v dlitel'nom opyte) (Agrogenic transformation of organic matter in light-gray soil with sandy-loam texture (according to the long-term experiment results)), *Izvestiya TSKHA*, 2013, Iss. 3, pp. 18–30.

53. Urusevskaya I.S., Meshalkina Y.L., Khokhlova O.S., Geografo-geneticheskie osobennosti gumusovogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv (Geographic and genetic features of the humus status of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 2000, No. 11, pp. 1377–1390.

54. Ushakov R.N., Kachestvennyj sostav gumusa seroj lesnoj pochvy pri vnesenii udobrenij (Humus qualitative composition of gray forest soil during fertilization), *Plodorodie*, 2007, No. 1, pp. 17–18.

55. Khabirov I.K., *Ekologiya i biohimiya azota v pochvah Priural'ya* (Ecology and biochemistry of nitrogen in the soils of the Urals), Ufa: UNC RAN, 1993, 224 p.

56. Khabirov I.K., Gabbasova I.M., Khaziev F.H., *Ustojchivost' pochvennyh processov* (Sustainability of soil processes), Ufa: BGAU, 2001, 327 p.

57. Khodzhaeva A.K., Semenov V.M., Distribution of active organic matter in the soil profiles of natural and agricultural ecosystems, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(12), pp. 1361–1369, DOI: [10.1134/S1064229315120108](https://doi.org/10.1134/S1064229315120108).
58. Chendev Yu.G., Aleksandrovskii A.L., Khokhlova O.S., Smirnova L.G., Novykh L.L., Dolgikh A.V., Anthropogenic evolution of dark gray forest-steppe soils in the southern part of the Central Russian Upland, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44(1), pp. 1–12, DOI: [10.1134/S1064229311010030](https://doi.org/10.1134/S1064229311010030).
59. Chendev Yu.G., *Evoluciya lesostepnyh pochv Srednerusskoj vozvyshechnosti v golocene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008, 212 p.
60. Chimitdorzhieva G.D., *Organicheskoe veshchestvo holodnyh pochv* (Organic matter of the cold soils), Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2016, 388 p.
61. Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Ocenka skorosti izmeneniya gumusnogo sostoyaniya dernovo-podzolistyh i seryh lesnyh pochv v usloviyah zalezhi (Estimation of the change rates in the humus state of soddy-podzolic and gray forest soils under fallow conditions), In: *Upravlenie pochvennym plodorodiem i pitanie kul'turnyh rastenij*, Omsk: LITERA, 2015, pp. 185–190.
62. Yakimenko V.N., Konarbaeva G.A., Transformaciya fonda tyazhelyh metallov seroj lesnoj pochvy v agrocenoze (The Transformation of the Heavy Metals Funds in Grey Forest Soil of Agrocenosis), *Agrohimiya*, 2016, No. 4, pp. 61–69.
63. Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W., Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key, *Nature Communications*, 2023, Vol. 14, Art. No. 2967, DOI: [10.1038/s41467-023-38700-5](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5).
64. Arevalo C.B.M., Chang S.X., Bhatti J.S., Sidders D., Mineralization Potential and Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon under Different Land Uses in the Parkland Region of Alberta, Canada, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2012, Vol. 76(1), pp. 241–251, DOI: [10.2136/sssaj2011.0126](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0126).
65. Begill N., Don A., Poeplau C., No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils, *Global Change Biol.*, 2023, Vol. 29(16), pp. 4662–4669, DOI: [10.1111/gcb.16804](https://doi.org/10.1111/gcb.16804).
66. Benbi D.K., Boparai A.K., Brar K., Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2014, Vol. 70, pp. 183–192, DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.12.032](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.032).
67. Cambardella C.A., Elliott E.T., Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, Vol. 56(3), pp. 777–783, DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).

68. Cotrufo M.F., Haddix M.L., Kroeger M.E., Stewart C.E., The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 168, Art. No. 108648, DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108648](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648).
69. Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E., Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter, *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 989–994, DOI: [10.1038/s41561-019-0484-6](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6).
70. Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E., The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biol.*, 2013, Vol. 19(4), pp. 988–995, DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).
71. Derrien D., Barré P., Basile-Doelsch I., Cécillon L., Chabbi A., Crème A., Fontaine S., Henneron L., Janot N., Lashermes G., Quénéa K., Rees F., Dignac M.F., Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review, *Agronomy Sust. Develop.*, 2023, Vol. 43, Art. No. 21, DOI: [10.1007/s13593-023-00876-x](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00876-x).
72. Dobarco M.R., Wadoux A.M.J.-C., Malone B., Minasny B., McBratney A.B., Searle R., Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty, *Biogeosciences*, 2023, Vol. 20, pp. 1559–1586, DOI: [10.5194/bg-20-1559-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023).
73. Haddix M.L., Gregorich E.G., Helgason B.L., Janzen H., Ellert B.H., Cotrufo M.F., Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil, *Geoderma*, 2020, Vol. 363, Art. No. 114160, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114160](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160).
74. Just C., Armbruster M., Barkusky D., Baumecker M., Diepolder M., Döring T. F., Heigl L., Honermeier B., Jate M., Merbach I., Rusch C., Schubert D., Schulz F., Schweitzer K., Seidel S., Sommer M., Spiegel H., Thumm U., Urbatzka P., Zimmer J., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as derived from particulate and mineral-associated organic matter, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, Art. No. 116472, DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116472).
75. Just C., Poeplau C., Don A., van Wesemael B., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., A simple approach to isolate slow and fast cycling organic carbon fractions in Central European Soils – importance of dispersion method, *Front. Soil Sci.*, 2021, Vol. 1, Art. No. 692583, DOI: [10.3389/fsoil.2021.692583](https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.692583).

76. Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S., Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management, In: *Understanding and fostering soil carbon sequestration*, Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022, pp. 1–36, DOI: [10.19103/AS.2022.0106.02](https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02).
77. Lavalley J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F., Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century, *Global Change Biol.*, 2020, Vol. 26(1), pp. 261–273, DOI: [10.1111/gcb.14859](https://doi.org/10.1111/gcb.14859).
78. Lehmann J., Kleber M., The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, pp. 60–68, DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
79. Liang C., Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal, *Soil Ecol. Lett.*, 2020, Vol. 2, pp. 241–254, DOI: [10.1007/s42832-020-0052-4](https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4).
80. Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M., Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter, *Global Change Biol.*, 2019, Vol. 25(11), pp. 3578–3590, DOI: [10.1111/gcb.14781](https://doi.org/10.1111/gcb.14781).
81. Lugato E., Lavalley J.M., Haddix M.L., Panagos P., Cotrufo M.F., Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter, *Nature Geoscience*, 2021, Vol. 14, pp. 295–300, DOI: [10.1038/s41561-021-00744-x](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x).
82. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F. et al., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025).
83. Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I., Höschen C., Schweizer S.A., Buegger F., Pouteau V., Chenu C., Mueller C.W., Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon, *Nature Communications*, 2021, Vol. 12, Art. No. 4115, DOI: [10.1038/s41467-021-24192-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8).
84. Xiao K.Q., Zhao Y., Liang C., Zhao M., Moore O.W., Otero-Fariña A., Zhu Y.G., Johnson K., Peacock C.L., Introducing the soil mineral carbon pump, *Nature Rev. Earth Environ.*, 2023, DOI: [10.1038/s43017-023-00396-y](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y).
85. Xiao W., Feng S., Liu Z., Su Y., Zhang Y., He X., Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils, *Soil Biol. Biochem.*, 2017, Vol. 107, pp. 85–93, DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.12.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.025).
86. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J., Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 172, Art. No. 108756, DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.10875](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.10875).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-128-166



Ссылки для цитирования:

Кокорева А.А., Кожунов А.В., Бутылкина М.А., Дымова И.В., Степаненко В.М., Иванова А.Е. Теплопроводность городских почв и субстратов почвенных конструкций: методические аспекты и математическое моделирование // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 128-166. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-128-166

Cite this article as:

Kokoreva A.A., Kozhunov A.V., Butylkina M.A., Dymova I.V., Stepanenko V.M., Ivanova A.E., Thermal conductivity of urban and artificial soils: methodological aspects and mathematical modeling, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 128-166, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-128-166

Благодарность:

Работа выполнена по программе госбюджета МГУ “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”. Приборная база – исследование выполнено на аналитическом комплексе для определения текстурных характеристик дисперсных систем (Vapor 100, Meso 222, 3P INSTRUMENTS, Германия), приобретен по программе развития МГУ, и комплексе оборудования для исследования гидрофизических и тепловых свойств почв, закупленного по Программе развития МГУ для Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и др.

Acknowledgments:

The work was carried out with the financial support of state budget programme in Moscow State University “Physical bases of ecological functions of soils: monitoring, forecasting and management technologies”. Instrumentation – the research was carried out by means of the analytical complex for determination of texture characteristics of dispersed systems (Vapor 100, Meso 222, 3P INSTRUMENTS, Germany), purchased under the MSU Development Programme, and using a set of equipment for research of hydrophysical and thermal properties of soils, purchased under the MSU Development Programme for the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Moscow University “Future of Soils”.

Теплопроводность городских почв и субстратов почвенных конструкций: методические аспекты и математическое моделирование

© 2024 г. А. А. Кокорева^{1,2*}, А. В. Кожунов³, М. А. Бутылкина¹,
И. В. Дымова¹, В. М. Степаненко¹, А. Е. Иванова¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12
*e-mail:kokoreva.a@gmail.com.

²ФГБУ науки “Институт лесоведения Российской академии наук”,
Россия, 143030, Московская обл., п/о Успенское, Советская 21.

³ФГБОУ ВО “Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева”, Россия,
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 12.

Поступила в редакцию 07.03.2023, после доработки 20.01.2024,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Для экспериментального определения зависимости теплопроводности от влажности почв и субстратов существуют различные методы. Исследовано влияние структуры образца (монолит, насыпной образец), температуры образца, способ установки зонда в образец на получаемые показания прибора TEMPOS, и предложены методические рекомендации. Показана зависимость теплопроводности насыпных образцов почв и субстратов от влажности. Разброс значений теплопроводности в диапазоне влажности от гигроскопической до полной влагоемкости для дерново-подзолистой почвы составляет 0.229–1.430 Вт/(м*К), для торфа – 0.250–0.521 Вт/(м*К), для песка – 0.280–2.605 Вт/(м*К), для смеси – 0.234–1.568 Вт/(м*К). Влияние таких свойств, как плотность, гранулометрический состав, удельная поверхность, содержание органического вещества, засоление, сказывается на тепловых свойствах в меньшей степени. Установленные закономерности могут быть использованы для расчета температурного режима почв при решении ряда прикладных задач, связанных с конструированием специальных почвенных объектов, например, при создании городских почвенных конструкций. Для этого необходимо либо экспериментально определять теплопроводность, либо рассчитывать ее по физическим параметрам почв и субстратов. Первый способ трудозатратен, второй – менее точен. В качестве демонстрации использованы уравнения, доступные для работы в модели HYDRUS-1D (Чанга–Хортон и Кэмпбелла). Эти уравнения либо переоценивают

теплопроводность в области высоких влажностей субстратов, либо недооценивают теплопроводность в области низких влажностей субстратов (песок, суглинок, торф и смесь на их основе).

Ключевые слова: зонд SH-3; TEMPOS; математические модели; HYDRUS-1D.

Thermal conductivity of urban and artificial soils: methodological aspects and mathematical modeling

© 2024 A. A. Kokoreva^{1,2*}, A. V. Kozhunov³, M. A. Butylkina¹,
I. V. Dymova¹, V. M. Stepanenko¹, A. E. Ivanova¹

¹*Lomonosov Moscow State University,
12 Build., 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,*

^{*}*e-mail: kokoreva.a@gmail.com.*

²*Federal State Budgetary Institution of Science “Institute of Forestry of the
Russian Academy of Sciences”,*

*21 Sovetskaya Str., Uspenskoye post office, Moscow region 143030,
Russian Federation.*

³*Russian State Agrarian University –
Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev,
12, Pryanishnikova Str., Moscow 127550, Russian Federation.*

Received 07.03.2023, Revised 20.01.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: There are various methods for experimental determination of the thermal conductivity dependence on soil moisture and substrates. The influence of the sample structure (monolith, bulk sample), sample temperature, the method of installing the probe into the sample on the obtained readings of the TEMPOS device was studied and methodological recommendations were proposed. The dependence of thermal conductivity of soils bulk samples and substrates on moisture is shown. The spread of thermal conductivity values in the moisture range from hygroscopic to full moisture capacity for soddy-podzolic soil is 0.229–1.430 W/(m*K), for peat – 0.250–0.521 W/(m*K), for sand – 0.280–2.605 W/(m*K), for a mixture – 0.234–1.568 W/(m*K). The influence of properties such as density, particle size distribution, specific surface area, organic matter content, salinity affected thermal properties to a lesser extent. The established patterns can be used to calculate the temperature regime of soils in solving a number of applied problems related to the construction of special soil objects, for example, when creating urban soil structures. For this, it is necessary either to determine the thermal conductivity experimentally, or to calculate it, using the physical parameters of soils and

substrates. The first method is labor-consuming, the second is less accurate. As an example, the equations available for work in the HYDRUS-1D (Chang–Horton and Campbell) model are used. These equations either overestimate the thermal conductivity in the area of high substrate humidity, or underestimate the thermal conductivity in the area of low substrate humidity (sand, loam, peat and a mixture based on them).

Keywords: SH-3 probe; TEMPOS; mathematical models; HYDRUS-1D.

ВВЕДЕНИЕ

Данные о тепловых свойствах почв и субстратов используются в различных прикладных задачах: изучение климата и его изменений (Loukili et al., 2008), выращивание сельскохозяйственных культур (Timlin et al., 2002), исследование продуцирования углекислого газа почвой (Buchner et al., 2008; Bauer et al., 2012) и секвестрации углерода в экосистеме (Ju et al. 2006), изучение структурных и функциональных трансформаций сообществ почвенных микроорганизмов (Glushakova et al., 2020) в связи с различными антропогенными воздействиями (Simsek et al., 2019) и др. Расчет гидротермического режима почв (Ronan et al., 1998; Vogel et al., 2011; Sakai et al., 2011) необходим при использовании климатических моделей (Lin et al., 2018), в грунтоведении, при определении глубины промерзания (Fröb, 2011), при проектировании линейных сооружений (Rajeev et al., 2012), трубопроводов (Zhang, Wang, 2017), изучении пространственной неоднородности структуры почвенного покрова (Yu et al., 2020) и при решении других прикладных задач. Знание тепловых свойств почв требуется в разных областях сельского хозяйства – для разработки мероприятий по защите сельскохозяйственных культур от заморозков (Грингоф, Пасечнюк, 2005), при управлении водными ресурсами, в частности, для планирования норм орошения в засушливых регионах с целью максимального повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

В городских условиях остро стоит проблема низкой влагообеспеченности газонной растительности в вегетационный период в южных регионах и переувлажнение – в северных. При этом температурный режим в эти периоды также неблагоприятен для растений. Особенно в летний и раннеосенний периоды, когда в поч-

вах может наблюдаться иссушение верхнего корнеобитаемого слоя. Это совпадает с периодами повышенных температур в корнеобитаемом слое (для большинства газонных трав температура выше 25 °С является неблагоприятным фактором). Для создания на урбанизированных территориях более оптимальных для газонной растительности гидротермических условий применяются специализированные почвенные конструкции. Они рассчитаны таким образом, чтобы в течение всего вегетационного периода снижать влияние погодных условий на режим температуры и влажности корнеобитаемого слоя почвы. Расчет оптимального соотношения частиц различного размера и качества в почвенных конструкциях (т. е. подбор соотношений различных субстратов или мощностей отдельных слоев) для разных климатических условий включает этап имитационного моделирования. В основе данных рекомендаций лежит предположение, что математические модели способны качественно и адекватно отражать изменения влажности и температуры почв с течением времени. Но это не всегда так, что было показано в ряде работ (Kokoreva, 2021; Weisner, 2016). Так, большое количество математических моделей создано на основе изучения агроландшафтов, а процессы теплопереноса и влагопереноса в сложных почвенных конструкциях изучены слабее (Schjønning, 2021), что приводит к более высоким значениям ошибок при прогнозных расчетах. В то же время для городских территорий (как и для агроландшафтов и естественных территорий) использование возможностей математического моделирования более чем актуально. Это подчеркивает важность экспериментального определения теплофизических параметров почвы в качестве физического обеспечения для целей дальнейшего полифункционального прогнозирования. Однако экспериментальное определение теплофизических свойств почв не всегда возможно, поэтому исследования влияния на термический режим фундаментальных почвенных свойств, таких как плотность, минеральный состав, гранулометрический состав, содержание органического вещества, не теряют актуальности (Сенников и др., 2006). Такие исследования являются основой для получения функциональных зависимостей теплофизических параметров от влажности, поскольку при постоянной температуре влажность в наибольшей

степени влияет на тепловые свойства почвы (Arkhangelskaya, Gvozdkova, 2019).

Использование зависимостей тех или иных теплофизических параметров от влажности зависит от уровня модели. При построении глобальных климатических моделей почвы считают однородным слоем и используют данные по температуропроводности почвы. В почвоведении же используется иной подход – расчет температурного режима почвы с использованием параметра теплопроводности для каждого слоя почвы. В большинстве одномерных моделей на основе дифференциальных уравнений переноса тепла и влаги в почве используются педотрансферные функции (ПТФ) – регрессионные уравнения, описывающие связь теплопроводности с традиционными химико-физическими свойствами почв: гранулометрическим составом, содержанием органического вещества, плотностью почвы и твердой фазы и др. (Belik et al., 2019). Такой подход реализован в моделях SWAP и HYDRUS-1D. Отличие данных моделей состоит в том, что в SWAP (версия 3.2.34) не предусмотрена возможность управлять зависимостью теплопроводности от влажности $\lambda(\theta)$, в модель встроена единственно возможная регрессионная зависимость, подробно описанная в руководстве (Kroes et al., 2008). Модель HYDRUS-1D (версия 4.17.0140) предлагает выбрать два уравнения $\lambda(\theta)$: Чанга–Хортон и Кэмпбелла (Šejna et al., 2022), – которые достаточно широко распространены в моделировании теплопереноса (Ju et al., 2006; Vogel et al., 2011).

Таким образом, адекватность прогноза и точность в управлении гидротермическим режимом почвы напрямую зависят в первую очередь от наличия качественного экспериментального обеспечения. На данный момент нет единой методики определения тепловых свойств почв и субстратов (Abu-Hamdeh et al., 2000). Так, в России температуропроводность определяют двумя методами: классическим методом регулярного теплового режима и с помощью различных зондовых методик, основанных на методе нестационарного линейного источника тепла (Arkhangelskaya, Gvozdkova, 2019; Болотов, 2003; Макарычев и др., 2010). Однако применение зондовых методов для измерения теплофизических параметров почв ограничено, поэтому изучение особенностей

применения зондов в почвенных исследованиях на сегодняшний день является актуальным.

Зондовый метод быстрый и удобный, его можно использовать в полевых условиях (Болотов и др., 2010; Rozanski et al., 2013). Но при использовании зонда чаще всего исследуется не вся кривая зависимости тепловых параметров почвы от влажности, а только конкретная величина теплопроводности при данной влажности. Кроме того, несмотря на то, что прибор K2Dpro и его модификация TEMPOS занесены в Государственный реестр средств измерения РФ, нет достаточной информации методического характера в отечественной и иностранной литературе. Также не до конца ясны вопросы применения полученных характеристик различных почвенных субстратов для целей почвенного конструирования.

В этой статье рассмотрены методические особенности проведения оценки теплопроводности различных городских почв и субстратов методом линейного источника тепла. Проведена оценка чувствительности теплопроводности к ряду физических характеристик образцов. Описана возможность получения зависимости теплопроводности от влажности для субстратов, используемых в почвенном конструировании. Проведено сравнение значений теплопроводности, полученных на основе аппроксимации экспериментальных данных и на основе педотрансферных функций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследования были выбраны гумусовые горизонты зональных городских почв (Москва, Краснодар, Волгоград, соответствующих ряду: дерново-подзолистая почва, чернозем, каштановая почва), имеющих одинаковый возраст 60–70 лет:

- 1) урбостратозем среднемощный, глубоко слабооглеенный, среднесуглинистый на техногенных отложениях, подстилаемых покровным суглинком на территории Москвы;
- 2) урбочернозем миграционно-сегрегационный тяжелосуглинистый на карбонатных лёссовидных суглинках на территории Краснодара;

- 3) урбосветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная сегрегационная стратифицированная глубокосолончаковатая почва среднесуглинистая на морских отложениях в Поволжском регионе.

В качестве субстратов для создания конструктороземов были использованы:

- 1) верхний слой урбанозема территории МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;
- 2) торф низинный “Селигер-Агро”, г. Москва (далее – торф);
- 3) песок карьерный (производитель Русеал), г. Москва (далее – песок);
- 4) смесь горизонта $A_{\text{пах}}$ (Москва), торфа низинного (Москва) и песка карьерного (Москва) (далее – смесь). Соотношение субстратов по абсолютно сухой массе в смеси равно: $A_{\text{пах}} : \text{торф} : \text{песок} = 4.4 : 1 : 5.9$.

Физические свойства естественных почв и субстратов приведены в таблице 1.

Физические свойства почвы определялись традиционными методами (McKenzie, 2002; Шеин, Карпачевский, 2007). В полевых условиях была определена плотность естественной почвы буровым методом, а плотность насыпных образцов задавалась в соответствии с рекомендациями (Сусленкова и др., 2018). В насыпных образцах определен гранулометрический состав методом лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора размера частиц Mastersizer 3000e (Malvern Panalytical, UK) и содержание органического углерода методом сжигания в токе кислорода на экспресс-анализаторе углерода АН–8012. Удельная поверхность по азоту была измерена на аналитическом комплексе для определения текстурных характеристик дисперсных систем (Varog 100, Meso 222, 3P INSTRUMENTS, Германия).

Теплопроводность определялась методом нестационарного линейного источника тепла с помощью прибора TEMPOS, который входит в Государственный реестр средств измерения РФ.

Таблица 1. Некоторые физические и химические свойства исследованных почв и субстратов
Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soils and substrates

Образец, глубина, см	Среднее распределение частиц по размерам				Объемная плотность, (г/см ³)	C _{орг} /1,7 %	Удельная поверхность по азоту, м ² /г
	Песок	Пыль	Глина	Текстуриный класс			
	2–0.05	0.05–0.002	<0.002				
Дерново- подзолистая	17.9	72.9	9.2	пылеватый суглинок	1.01	3.10	8.31
Чернозем	0.5	80.2	19.3	пылеватый суглинок	1.23	4.92	5.95
Каштановая	15.9	68.1	16.0	пылеватый суглинок	1.38	1.38	9.05
Песок	88.9	8.4	2.7	песок	1.60	0.38	0.55
Торф	-	-	-	торф	0.27	89.9	1.45
Смесь	6.5	65.1	28.4	пылеватый суглинок	1.01	1.01	2.41

Как и для любого прибора, основанного на импульсном методе, в TEMPOS реализован принцип максимума температуры исследуемой точки среды после того, как действие источника тепла прекращается. Время наступления и величина этого максимума зависят от теплофизических параметров, которые определяются на основе решения уравнения Фурье с известными граничными условиями (Болотов, 2003). Метод позволяет избежать больших ошибок при измерении тепловых свойств почв и других материалов, а также сократить время проведения эксперимента (Campbell et al, 1994).

Прибор TEMPOS состоит из портативного контроллера и датчика (в комплекте 4 датчика, не все подходят для почв), называемого игольчатым зондом. Теплопроводность вычисляется через измерение рассеивания тепла от игольчатого зонда. Точность измерения температуры прибором TEMPOS, в соответствии со спецификацией, составляет $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому в дополнительной калибровке прибора нет необходимости. Однако калибровки требуют зонды. Для исследования использовался зонд SH-3 (с двумя иглами – щупами – длиной 30 мм и диаметром 1.3 мм), верификация которого выполнялась на блоке синтетического материала Delrin с известными тепловыми характеристиками при заданной температуре. При верификации данного зонда рекомендуется оставлять щупы в материале на 15 минут для установления теплового равновесия между материалом и щупами (Келле, 2020).

Принцип работы зонда SH-3 заключается в том, что иглы зонда в течение первых 30 секунд приходят в состояние теплового равновесия со слоем почвы. За это время прибор TEMPOS собирает данные для расчета температурного дрейфа. Если дрейф ниже граничного значения ($<0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$), ток подается к одной из игл зонда в течение следующих 30 секунд для нагрева. Другая игла, расположенная на расстоянии 6 мм от первой, регистрирует температуру окружающей среды. После завершения подачи тока на первую иглу температура фиксируется еще в течение 90 секунд, за которые происходит охлаждение первой иглы. Изменение температуры иглы зонда SH-3 (ΔT) далее рассчитывается по уравнениям (1) и (2):

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) * Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right), \text{ при } t \leq t_h \quad (1)$$

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) * \{Ei\left[-\frac{r^2}{4D(t-t_h)}\right] - Ei\left[\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)\right]\}, \text{ при } t > t_h \quad (2)$$

где:

ΔT – рост температуры во второй игле ($^{\circ}\text{C}$),

q – количество тепла, подводимого к первой игле (Вт/м),

k – теплопроводность ($\text{Вт/м}^{\circ}\text{K}$),

r – расстояние между двумя иглами (мм),

D – температуропроводность, ($\text{мм}^2/\text{сек}$),

t – время общее (секунды),

t_h – время нагрева (секунды),

Ei – экспоненциальный интеграл (Келле, 2020).

Данные по температуре аппроксимируются экспоненциальной интегральной функцией с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (O'Donnell et al., 2009). С помощью данного метода, по заданным значениям q , r , t и t_h , рассчитываются теплопроводность (k) и температуропроводность (D). Теплоемкость рассчитывается как коэффициент пропорциональности между теплопроводностью и температуропроводностью.

При измерении теплофизических характеристик к зонду SH-3 предъявляется обязательное требование – соблюдать расстояние 1.5 см от края образца во всех трех измерениях (Келле, 2020).

Данный зондовый метод имеет ограничения, связанные, прежде всего, с отличиями от модели так называемого “идеального” зонда (длина превышает диаметр в 100 раз и находится в плотном контакте с материалом) и идеальных внешних условий (во время проведения эксперимента предполагается, что состав, структура и внешняя температура образца не меняются). Наиболее существенными отличиями реальных зондов от идеальных являются следующие: (1) температура окружающей среды не постоянна, что будет влиять на показания прибора (Liu et al., 2011); (2) в почве, не полностью насыщенной водой, при нагревании будет происходить перераспределение влаги от теплого участка к более холодному. Последнее отличие накладывает ограничения на быстрое измерение в нескольких повторностях при стационарной установке зонда, а проведение измерений в разных местах матери-

ала приводит к образованию дополнительных полостей в нем, создавая дополнительное контактное сопротивление между зондом и материалом.

Поскольку для почв применение зондовых методов имеет ряд особенностей (Болотов и др., 2010), необходимо прежде всего сказать о некоторых обнаруженных методических аспектах работы с прибором. Когда явление температурного дрейфа при слишком большом перепаде температур при нагреве иглы (>0.002 °C) приводит к возникновению ошибки, это, по результатам исследования, связано с пористостью объекта, так как в более пористом материале иглы зонда будут соприкасаться и с воздухом, и непосредственно с измеряемым материалом. Это особенно часто наблюдалось в высокопористых почвах, таких как монолиты минеральных почв среднесуглинистого состава. При этом с уменьшением влажности суглинка частота возникновения температурного дрейфа существенно возрастала, т. к. увеличивалась вероятность контакта игл с воздухом. В песчаных образцах явление дрейфа часто появлялось только при достаточно низких значениях влажности. При возникновении дрейфа измерение повторяли после некоторой паузы.

Измерения теплопроводности были проведены в насыпных почвенных образцах заданной плотности, помещенных в пластиковые цилиндры высотой 5 см и диаметром 8.5 см. Для убастратозема (Москва) использованы также монолитные образцы того же размера. Размер образцов обусловлен особенностями метода определения теплопроводности.

Для выявления степени влияния условий проведения измерений на величину теплопроводности почвенных образцов были реализованы следующие варианты измерения теплопроводности:

- 1) в дерново-подзолистой почве в диапазоне температуры образца 19–33 °C;
- 2) в колеблющемся стандартном образце;
- 3) в стандартном и почвенных образцах непосредственно после установки зонда и после 15-минутной паузы;
- 4) в процессе иссушения почвенных образцов при стационарной установке и фиксации зонда с извлечением зонда после каждого измерения;

- 5) в образцах дерново-подзолистой почвы, торфа и песка без стационарной установки зонда в 9 повторностях (1 точка в центре монолита, 8 точек – равномерно по окружности с отступом от края монолита 1.5 см) при нескольких значениях влажности в диапазоне от полной влагоемкости (ПВ) до гигроскопической влажности (ГВ) (рис. 1);
- 6) в образцах почв и субстратов в процессе иссушения;
- 7) в образцах почвы с различной плотностью;
- 8) в образцах с различной степенью соприкосновения иглы и твердого материала (размер отверстий задавался).

Проверка гипотезы о нормальности распределения значений теплопроводности осуществлялась с помощью критерия Уилкса–Шапиро.

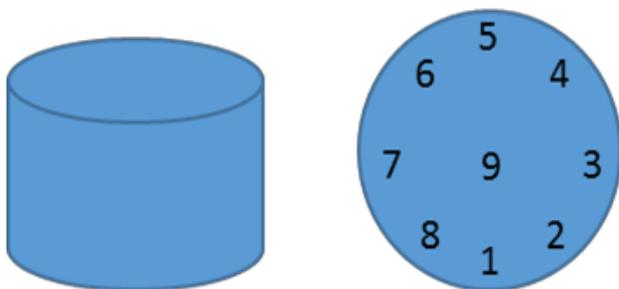


Рис. 1. Схема установки зонда SH-3 в 9 точках почвенного монолита.
Fig. 1. Scheme of installing the SH3 probe at 9 points of a soil monolith.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методические аспекты

Влияние общих условий проведения измерений

Согласно техническому описанию прибора (Келле, 2020), зонд SH-3 при верификации на стандартном материале рекомендуется оставлять на 15 минут перед измерением, а поверку проводить при стандартной температуре 21 °С без механического воздействия на образец. Однако при колебаниях температур образца

от 9 до 35 °С повышение температуры стандартного образца и/или почвенного монолита не всегда приводило к заметному изменению теплопроводности. Так при охлаждении поперечного блока Delrin теплопроводность изменялась от заявленных 0.38 Вт/(м*К) при 21 °С до 0.370 Вт/(м*К) при 9 °С при заявленной погрешности измерения теплопроводности $\pm 10\%$ в диапазоне 0.2–2 Вт/(м*К) (Келле, 2020). Изменения теплопроводности с изменением температуры почвенного образца более значимы (рис. 2) – при изменении температуры на 15 °С теплопроводность увеличивается более чем на 30%. При полевых исследованиях и сравнении почв в периоды с различными погодными условиями возможны значительные расхождения в показаниях – как при исследованиях контрастных температур в почве, например, при лесных пожарах (Думов et al., 2022), так и при сезонных колебаниях теплопроводности в почвах.

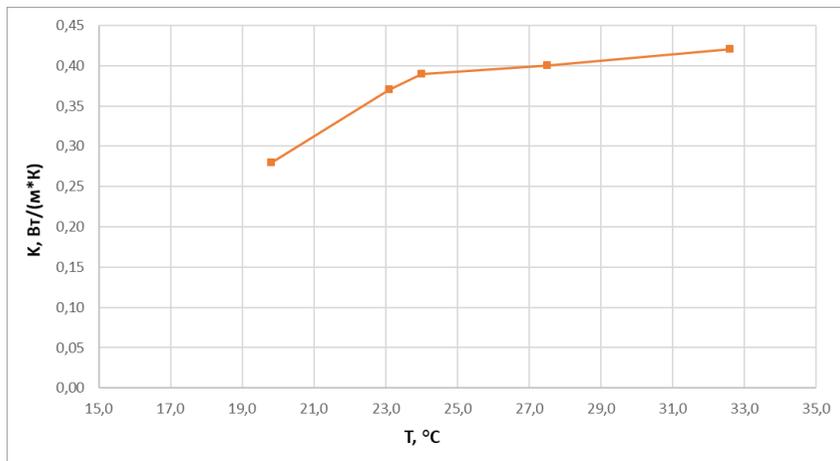


Рис. 2. Влияние температуры (Т) образца дерново-подзолистой почвы на полученные с использованием прибора TEMPOS (зонд SH-3) показания теплопроводности.

Fig. 2. Effect of sod-podzolic soil sample temperature (Т) on thermal conductivity readings obtained using the TEMPOS device (probe SH-3).

При физическом воздействии (колебание стандартного образца) теплопроводность возрастала с 0.380 до 0.410 Вт/(м*К), что может приводить к значимым ошибкам определения теплопроводности (как и других теплофизических параметров). Напротив, несоблюдение рекомендации времени, необходимого для выравнивания температуры зонда и образца (15 минут), давало некоторую погрешность для стандартного образца, но практически не влияло на показания в почвах и субстратах, где разброс показаний теплопроводности был значительно больше, чем погрешность измерения.

Влияние способа установки зонда

Для почвенного образца определяющую роль играл способ установки зонда во влажном образце или размещение зонда в сухом и/или плотном образце (высокое сопротивление материала при установке / необходимость готовых отверстий для зонда). Во влажном образце есть вероятность повреждения места установки зонда во время манипуляций с прибором, что уменьшит контакт игл зонда с поверхностью почвы. В плотном образце необходимо просверливать отверстия для зонда, что также увеличивает вероятность большего контакта игл с воздухом, а не с поверхностью почвы (табл. 2). Частично эта проблема решается использованием различных термопаст. Но для надежного контакта зонда и почвы более стабильные результаты дала стационарная установка зонда в монолит или насыпной образец на весь период иссушения образца с надежной фиксацией зонда в образце, чтобы при манипуляциях с образцом или прибором не происходило увеличение диаметра отверстий, в которые вставлен зонд. Для этого были использованы клейкая лента или силиконовая крышка с отверстием для зонда, вставляемого в монолит.

Как видно из таблицы, при воздушно-сухом состоянии почвы диаметр отверстий, т. е. степень прилегания игл зонда к почвенным образцам, не влияет на сыпучие (песок) и слабо влияет на упругие (торф) материалы, но играет значительную роль в плотных минеральных субстратах, где трещины будут только расти при механическом воздействии зонда на материал почвенного образца.

Таблица 2. Зависимость $\lambda(\theta)$ от плотности прилегания зонда SH-3 к почвенному образцу
Table 2. Dependence of $\lambda(\theta)$ on the tightness of SH-3 probe adjoining to the soil sample

	Теплопроводность, Вт/(м*К)							
	воздушно-сухая почва				почва при капиллярном насыщении			
диаметр отверстий для зонда SH-3	суглинок	торф	песок	смесь	суглинок	торф	песок	смесь
1.4 см	0.280	0.093	0.240	0.260	0.790	0.520	3.010	1.480
2.4 см	0.210	0.092	0.230	0.250	0.750	0.360	2.070	1.450
3.1 см	0.180	0.093	0.230	0.240	0.730	0.310	1.610	1.190

В увлажненных образцах влияние степени прилегания зонда к поверхности материала проявилось для всех почвенных образцов даже при небольшом увеличении отверстий для зонда, что особенно вероятно во влажном песке даже при небольшом колебании зонда во время измерения.

Поэтому были испытаны два варианта измерения теплопроводности в монолите из дерново-подзолистой почвы, взятом на территории г. Москва. Вариант 1: зонд вынимался из образца после измерения и устанавливался заново перед следующим измерением. Вариант 2: зонд установлен в почву стационарно и не извлекался во время всего периода иссушения.

Из данных таблицы 3 следует, что для суглинистой почвы наблюдалось наибольшее расхождение показаний теплопроводности, что может быть связано как с установкой зонда, так и с особенностями порового пространства. Это позволяет рекомендовать использование стационарного метода установки зонда.

Однако при сравнении кривой, полученной при равновесном иссушении со стационарно установленным зондом, и точек, полученных при разовых установках зонда, соблюдаются общие закономерности изменения теплопроводности при уменьшении влажности образца (рис. 3).

Это позволяет использовать данный способ работы с прибором в условиях, когда необходимо сократить время измерения тепловых свойств, что может стать критичным при исследованиях больших партий образцов.

Статистические характеристики варьирования значений теплопроводности

Определение теплопроводности в образцах без стационарной установки зонда возможно в повторностях, что позволяет оценить зависимость статистических характеристик варьирования теплопроводности от влажности (табл. 4). При уровне значимости 0.05 значения теплопроводности можно считать нормально распределенными (Дмитриев, 2009).

Таблица 3. Зависимость $\lambda(\theta)$ для суглинка, песка и торфа в двух вариантах установки зонда (пояснения в тексте)
Table 3. Dependence of $\lambda(\theta)$ for loam, sand and peat on 2 variants of probe installation (explanations are given in the text)

Категории почвенной влаги	суглинок		песок		торф	
	вариант 1	вариант 2	вариант 1	вариант 2	вариант 1	вариант 2
ПВ	0.887	1.193	2.690	3.022	0.558	0.573
НВ*	0.914	1.193	2.899	2.845	0.561	0.542
0.7×НВ	0.704	1.055	2.905	2.488	0.405	0.317
ГВ	0.234	0.531	0.271	0.364	0.127	0.098

Примечание. *НВ – наименьшая влагоемкость.

Note. *НВ – field water holding capacity.

Таблица 4. Зависимость статистических характеристик варьирования значений теплопроводности изученных почв от влажности

Table 4. Dependence of statistical characteristics of variation of thermal conductivity values of the studied soils on moisture content

Почва	Влажность, %	Объем выборки	\bar{x} , Вт/(м*К)	S, Вт/(м*К)	$S_{\bar{x}}$, Вт/(м*К)	V, %
суглинок	4.7	9	0.319	0.055	0.018	17
	46.4	9	0.919	0.147	0.049	16
	55.0	9	1.023	0.092	0.031	9
	58.3	9	1.060	0.082	0.027	8
песок	0.0	9	0.269	0.011	0.004	4
	26.0	9	2.838	0.067	0.022	2
	31.2	9	2.726	0.115	0.038	4
	32.4	9	2.765	0.085	0.028	3
торф	1.8	9	0.130	0.015	0.005	12
	22.8	9	0.235	0.020	0.007	9
	71.1	9	0.542	0.045	0.015	8
	78.3	9	0.558	0.022	0.007	4
	84.9	9	0.561	0.006	0.002	1

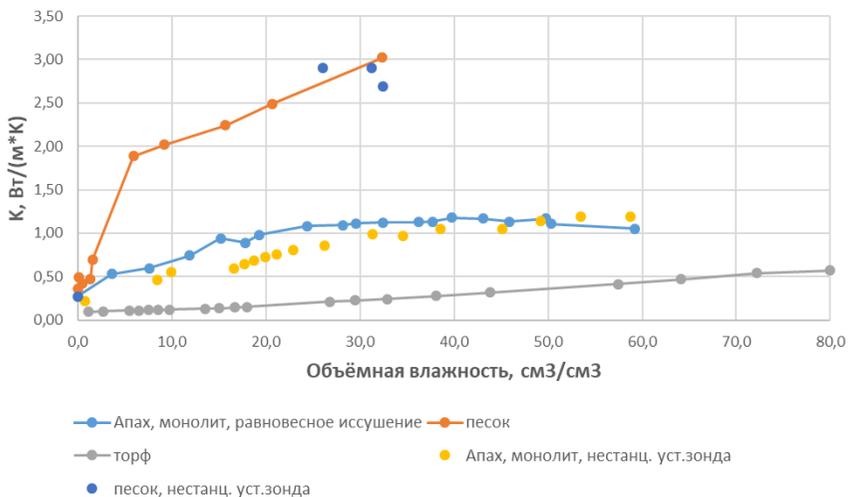


Рис. 3. Сравнение данных по зависимости теплопроводности от объёмной влажности почвы/субстрата $\lambda(\theta)$ для стационарно и не стационарно установленных зондов.

Fig. 3. Comparison of data on the dependence of thermal conductivity on the volumetric soil/substrate moisture $\lambda(\theta)$ for stationary and non-stationary installed probes.

С ростом влажности наблюдается увеличение стандартного отклонения с максимумом значений в диапазоне капиллярной влажности, при которой часть порового пространства почв занята водой, а часть – воздухом. Минимальные значения стандартного отклонения получены для всех образцов при ГВ, а также для торфа при влажности, соответствующей ПВ, максимальные – для значений влажности, близких к капиллярной влагоемкости (КВ). Наиболее высокие коэффициенты вариации характерны для суглинка. При этом по мере увеличения влажности коэффициенты вариации уменьшаются. Среди вероятных причин различий в характере варьирования значений теплопроводности изученных образцов можно назвать степень дифференциации порового пространства, которая определяет неравномерность распределения влаги и воздуха и наиболее выражена в почвах суглинистого ряда.

Следует также отметить, что в диапазоне капиллярной влажности почвы суглинистого ряда наиболее подвержены пластическим деформациям при внешнем воздействии. Предполагаем, что при установке зонда суглинистая почва деформируется, что снижает плотность прилегания почвы к поверхности зонда и приводит к увеличению варьирования значений теплопроводности. Торф и песок, в отличие от суглинка, проявляют признаки упругости, что создает условия для плотного контакта с поверхностью зонда.

Влияние свойств почвы на величину теплопроводности ***Зависимость теплопроводности от влажности***

Для зонального ряда почв (рис. 4) при ГВ теплопроводность наименьшая для всех трех типов почв (дерново-подзолистая почва – 0.229 Вт/(м*К), чернозем – 0.308 Вт/(м*К), каштановая почва – 0.222 Вт/(м*К)). С повышением степени увлажнения почвы от ГВ до КВ в большей степени увеличивается теплопроводность у дерново-подзолистой почвы, несколько медленнее – у каштановой почвы, однако в целом колебания теплопроводности для трех почв не превышают 0.500 Вт/(м*К). При КВ наибольшая теплопроводность наблюдается у дерново-подзолистой почвы – 1.430 Вт/(м*К), у каштановой почвы она меньше – 1.282 Вт/(м*К) и наименьшая теплоемкость наблюдается у чернозема – 1.007 Вт/(м*К). При дальнейшем насыщении почвенных образцов до ПВ их теплопроводность несколько уменьшается, за исключением чернозема, у которого она слабо возрастает. При достижении ПВ теплопроводность чернозема равна 1.103 Вт/(м*К), каштановой почвы – 1.260 Вт/(м*К), дерново-подзолистой почвы – 1.314 Вт/(м*К).

Для субстратов почвенных конструкций при ГВ теплопроводность составляет 0.229 Вт/(м*К) для суглинка, 0.234 Вт/(м*К) для смеси, 0.250 Вт/(м*К) для торфа и 0.280 Вт/(м*К) для песка. При увеличении содержания влаги в почве скорость увеличения теплопроводности выше для песчаного субстрата, и при КВ величина его теплопроводности выше по сравнению с теплопроводностью других субстратов. Вероятно, это связано с минералогическим составом (теплопроводность кварца при 20 °С составляет 0.389 Вт/(м*К)) и плотностью песка (1.73 г/см³), которая повыша-

ет его теплопроводность.

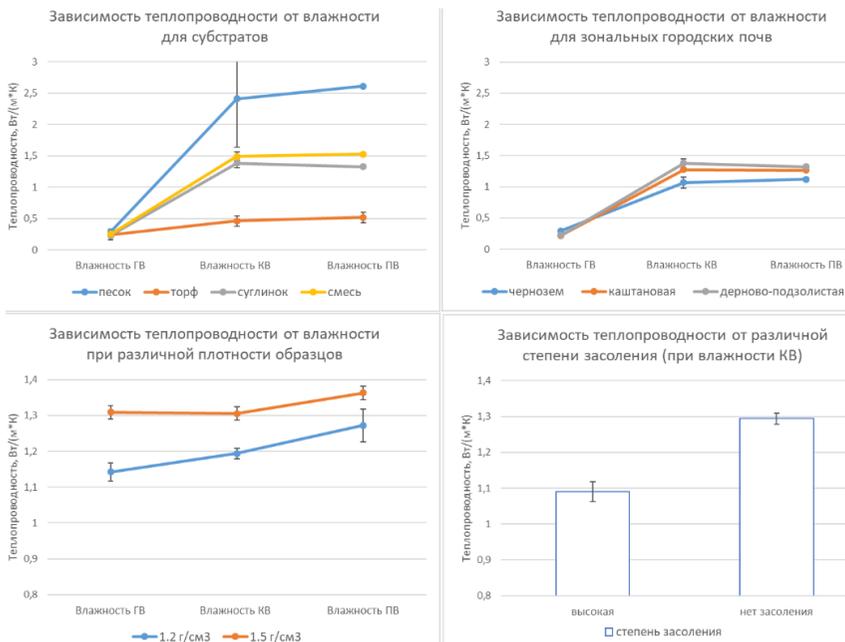


Рис. 4. Диаграммы зависимости теплопроводности от влажности $\lambda(\theta)$ и степени засоления городских почв и субстратов.

Fig. 4. Diagrams of the dependence of thermal conductivity on humidity $\lambda(\theta)$ and the degree of urban soils and substrates salinity.

При КВ теплопроводности смеси и суглинка имеют близкие значения, что будет играть роль в северных регионах страны, где наблюдаются частые случаи переувлажнения городских почв вследствие обильных осадков. Теплопроводность торфа при увеличении влажности субстрата увеличивается наиболее медленно, что связано с преимущественно органической составляющей субстрата. При достижении КВ теплопроводность песка составляет 1.865 Вт/(м*К), суглинка и смеси – соответственно 1.430 и 1.361 Вт/(м*К), торфа – 0.412 Вт/(м*К). С дальнейшим увеличением содержания влаги до ПВ теплопроводность песка продолжает мед-

ленно увеличиваться. Теплопроводность суглинка несколько снижается, а теплопроводность смеси несколько увеличивается. Для торфа на всем протяжении кривой зависимости $\lambda(\theta)$ теплопроводность изменяется наиболее слабо по сравнению с другими субстратами. При ПВ теплопроводность песка составляет 2.605 Вт/(м*К), суглинка и смеси – 1.314 и 1.568 Вт/(м*К) соответственно, теплопроводность торфа – 0.521 Вт/(м*К).

Более подробные кривые зависимости теплопроводности от влажности субстратов и монолитов верхнего горизонта урбанозема представлены на рисунке 5. Для насыпных образцов не удалось зафиксировать увеличение теплопроводности в диапазоне КВ. Возможно, это связано с методом измерения теплопроводности: некоторое увеличение наблюдается только для образца при равновесном способе иссушения, когда при каждой влажности производилось влагостатирование образца. У остальных образцов исследование теплопроводности проводилось одновременно с исследованием кривой влагоудержания методом испарения. Некоторое отличие теплопроводности в насыпном образце и в монолите наблюдается для суглинка в области высоких значений влажности (до 0.2 Вт/(м*К)).

Изменение $\lambda(\theta)$ в процессе иссушения наиболее слабо выражено у торфа (постепенное снижение от 0.6 до 0.2 Вт/(м*К)). Наиболее резкая кривая $\lambda(\theta)$ у песка, при этом для песка в диапазоне от 32 до 5% влажности теплопроводность изменяется равномерно (от 3.0 до 1.8 Вт/(м*К)), а потом наблюдается резкое падение теплопроводности до значений 0.4 Вт/(м*К). Наиболее интересная $\lambda(\theta)$ получена для образца смеси (суглинок, торф, песок). Для влажного образца смеси теплопроводность находится на уровне суглинка (1.3 Вт/(м*К)), а после 30% влажности она резко снижается до 0.6 Вт/(м*К) и повторяет кривую торфа. Следовательно, тепловые свойства торфа в составе смеси в сухой области кривой влагоудержания проявляются в большей степени, чем тепловые свойства других компонентов смеси.

Таким образом, влажность в наибольшей мере определяет тепловые свойства почв при заданной температуре, а количество и качественные характеристики воды играют определяющую роль в значениях теплопроводности почв и субстратов. Помимо влажно-

сти, температуры и минералогического состава, были рассмотрены и менее значимые, но важные свойства: плотность, гранулометрический состав и наличие легкорастворимых солей (рис. 4).

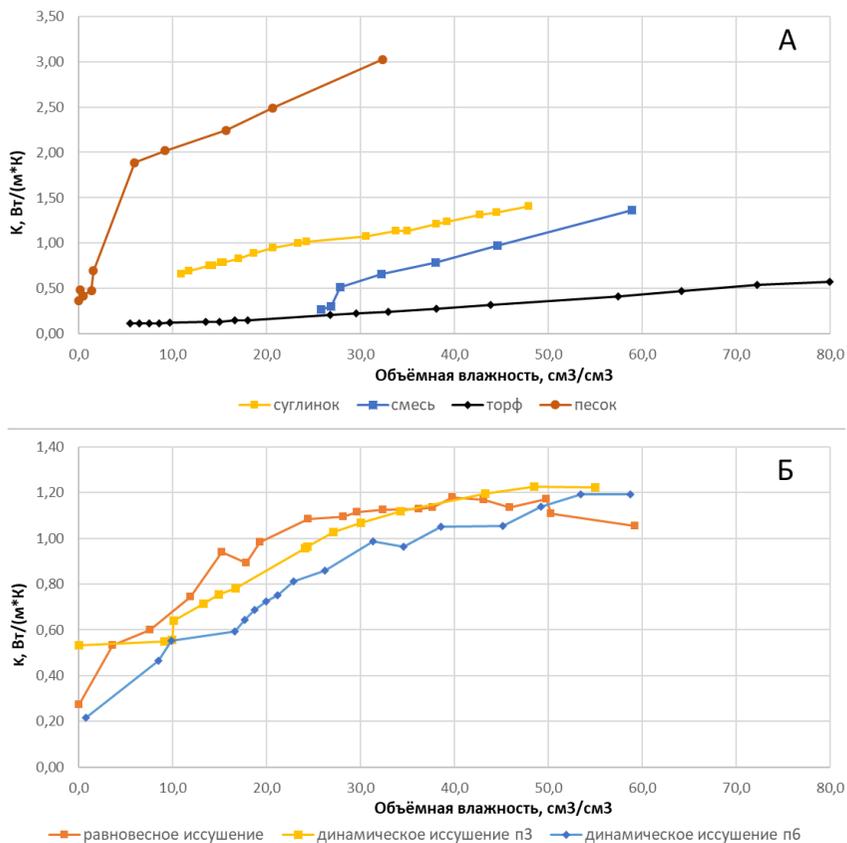


Рис. 5. Зависимости теплопроводности от объемной влажности для субстратов (А) и урбостратозема, Москва (Б).

Fig. 5. Dependences of thermal conductivity on volumetric humidity for substrates (А) and urban stratozema, Moscow (Б).

Зависимость теплопроводности от плотности почвы
Выбранные значения влажности субстратов (ПВ, КВ, ГВ)

унифицируют влияние влажности, поскольку именно категории влаги формируют зависимость $\lambda(\theta)$. При ГВ теплопроводность дерново-подзолистой почвы с низкой плотностью (1.2 г/см^3) составляет 1.142 Вт/(м*К) , а теплопроводность этой же почвы с высокой плотностью (1.5 г/см^3) составляет 1.309 Вт/(м*К) . При повышении содержания влаги в почве от ГВ до КВ теплопроводность почвы с низкой плотностью увеличивается, а теплопроводность почвы с высокой плотностью практически не изменяется с трендом к незначительному уменьшению. При КВ теплопроводности почв с низкой и высокой плотностью равны соответственно 1.194 и 1.305 Вт/(м*К) , а при полном насыщении теплопроводность дерново-подзолистой почвы с низкой плотностью равна 1.272 Вт/(м*К) , а теплопроводность образца с высокой плотностью – 1.363 Вт/(м*К) , что не является значимым различием в пределах выборки.

Влияние гранулометрического состава и удельной поверхности на теплопроводность

Анализ приведенных зависимостей $\lambda(\theta)$ позволяет заключить, что гранулометрический состав существенно влияет, и даже определяет значение теплопроводности субстратов. При крупном размере зерен (частиц почвы) доступное поровое пространство будет выше (из-за присутствия воздуха), что приведет к более низкой теплопроводности почвы. Следовательно, плотные почвы/субстраты во всем диапазоне влажности имеют более высокие значения теплопроводности. Поэтому при выборе плотности закладки субстратов в процессе конструирования почв необходимо учитывать, что менее плотные слои будут подвержены большим колебаниям температур при одинаковых погодных условиях (в статичных условиях, поскольку в процессе функционирования свойства отдельных слоев почвенных конструкций будут изменяться).

Удельная поверхность также является приоритетным свойством для описания тепловых характеристик почв/субстратов. Ранее (Гюлалыев, 2015) отмечалась зависимость температуропроводности от удельной поверхности, данные этого исследования подтвердили рост теплопроводности с увеличением удельной по-

верхности почв: вода образует пленку на поверхности частиц почвы, это снижает теплопроводность.

Зависимость теплопроводности от наличия в субстратах легкорастворимых солей

Теплопроводность суглинка снизилась (рис. 4) с увеличением концентрации солей (с 1.3 Вт/(м*К) до 1.1 Вт/(м*К)). В опыте была использована соль KBr, более 15 мСм/м, что соответствует высокой степени засоления). Это согласуется с результатами Ноборио и Макиннеса (1993) для NaCl. Основная часть брома хорошо растворима, что характеризует засоленную почву как более дисперсионный материал, обладающий высокой теплопроводностью. Для почв со значительным количеством тонких частиц (суглинок/глина) агрегация будет сильно зависеть от взаимодействия самых тонких почвенных частиц с ионами соли. Чем менее упорядочена такая структура, тем ниже теплопроводность.

Экспериментальное обеспечение прогнозных моделей

Полученные кривые зависимости $\lambda(\theta)$ для почв и субстратов можно использовать в качестве экспериментального обеспечения в моделях типа HYDRUS-1D. Наиболее полный обзор функциональных моделей для $\lambda(\theta)$ представлен в исследовании (Zhang, Wang, 2017), где рассмотрены уравнения регрессии для прогнозирования теплопроводности на основе легко измеряемых величин, а также соотношения воды и воздуха в поровом пространстве почвы. Однако для модели HYDRUS-1D не предусмотрена возможность задания $\lambda(\theta)$ иным способом, кроме как с помощью уравнений Чанга–Хортон и Кэмпбелла. Для этого необходимо аппроксимировать полученные экспериментальные кривые $\lambda(\theta)$ одной из функций и задать полученные параметры аппроксимации в качестве входных данных модели HYDRUS-1D.

В нашем исследовании в качестве примера возможного прикладного применения экспериментально определенных зависимостей $\lambda(\theta)$ эти кривые одинаково успешно аппроксимированы для всех использованных субстратов: суглинок, торф, песок, смесь (рис. 6).

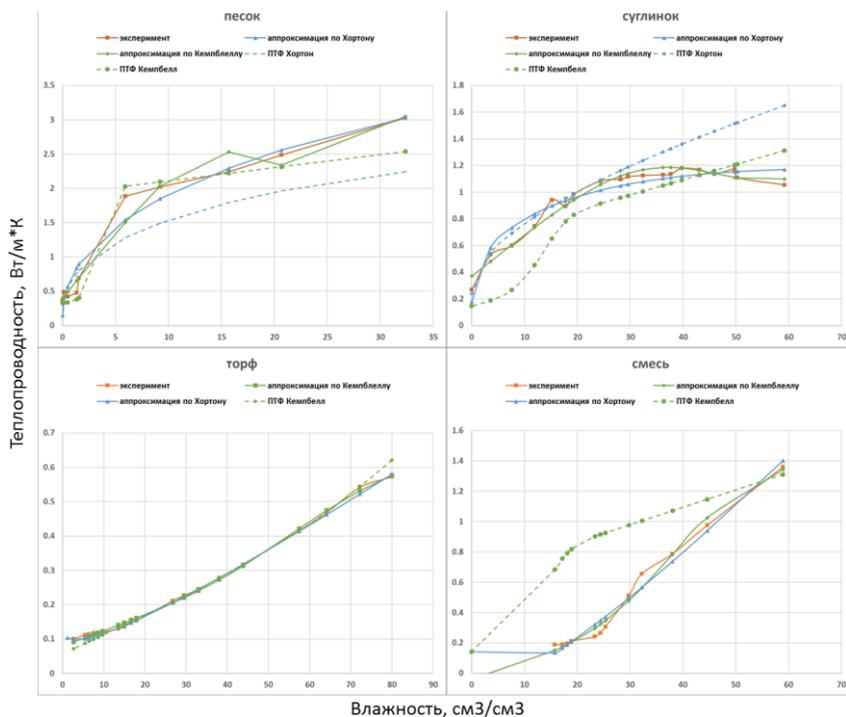


Рис. 6. Экспериментальные кривые зависимости теплопроводности от объёмной влажности, аппроксимации экспериментальных кривых уравнениями Кэмпбелла и Чанга–Хортон, а также кривые, рассчитанные с использованием педотрансферных функций (также использованы функциональные зависимости Кэмпбелла и Чанга–Хортон, рекомендованные авторами HYDRUS).

Fig. 6. Experimental curves of the thermal conductivity dependence on volumetric humidity, approximations of experimental curves by the Campbell and Chang–Horton equations (the Campbell and Chang–Horton functional dependences, recommended by the authors of HYDRUS, are also used).

Встроенные в модель педотрансферные функции позволили рассчитать зависимости $\lambda(\theta)$, которые были сопоставлены с полученными экспериментальными кривыми. Педотрансферные функции в модели HYDRUS-1D позволяют использовать зависимости $\lambda(\theta)$, опубликованные в работе (Chung, Horton, 1987), подробно

обсуждаемые во многих исследованиях (Arkhangelskaya, Gvozdko-va, 2019; Buchner et al., 2008; Bauer et al., 2012; Sakai et al., 2011).

Модель Чанга–Хортон для расчета зависимости теплопроводности от влажности почв и субстратов имеет вид:

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0.5},$$

где θ – объемная влажность почвы ($\text{см}^3/\text{см}^3$),

b_1, b_2, b_3 – эмпирические коэффициенты.

Существенным недостатком этой модели явилось то, что авторы использовали только три текстурных класса (глина, суглинок, песок). Поэтому для задачи сравнения $\lambda(\theta)$ различных, но находящихся в одном текстурном классе, почв или восстановления $\lambda(\theta)$ для органических почв и субстратов на их основе данная модель не подходит, т. е. выполнить расчет температурного режима, например, почвенной конструкции только на основе данных о гранулометрическом составе невозможно. Альтернативой является получение экспериментальных данных, которые могут быть аппроксимированы данным уравнением, а параметры аппроксимации могут быть использованы в качестве физического обеспечения модели HYDRUS-1D.

Но даже для тех субстратов (суглинок, песок), для которых расчет $\lambda(\theta)$ через педотрансферные функции по модели Чанга–Хортон возможен, не удалось получить удовлетворительный результат. Расчетные кривые значительно отличаются от экспериментальных (для суглинка, при влажности 30–60%, модель переоценила теплопроводность, для песка – недооценила теплопроводности во всем диапазоне влажности).

Уравнение Кэмпбелла использует данные о плотности почвы, содержании фракции глины (менее 0.05 мм), данные о минералогическом составе почвы (Campbell, 1994):

$$\lambda_0(\theta) = A + B\theta - (A - D)\exp[-(C\theta)^K]$$
$$A = \frac{0.57 + 1.73\theta_q + 0.93\theta_m}{1 - 0.74\theta_q - 0.49\theta_m} - 2.8\theta_n(1 - \theta_n)$$
$$B = 2.8\theta_n$$

$$C = 1 + 2.6\theta_c^{-1/2}$$

$$D = 0.03 + 0.7\theta_n^2$$

$$E = 4$$

где λ_0 – теплопроводность, Вт/(м*К);

θ – объемная влажность, м³/м³;

θ_n – объемная влажность твердого вещества, м³/м³;

θ_q – объемная влажность кварца, м³/м³;

θ_c – объемная влажность глины, м³/м³;

θ_m – объемная влажность других минералов, м³/м³.

Модель Кэмпбелла позволяет рассчитывать любые варианты городских субстратов с использованием ПТФ на основе содержания кварца и других минералов, общей пористости, плотности почвы (заданной плотности субстратов). Однако только для торфа расчет теплопроводности через ПТФ по модели Кэмпбелла прошел успешно. Для песка расчетная кривая существенно отличается от экспериментальной кривой в области влажностей выше НВ (на 0.5 Вт/(м*К)), а для суглинка наибольшая ошибка (до 0.3 Вт/(м*К)), наоборот, находится в области 0–20% объемной влажности.

Для образца смеси, включающего все три субстрата, моделирование теплопроводности по Кэмпбеллу было наименее удачным. Расчетная кривая только при ПВ совпала с экспериментальной, во всем остальном диапазоне расчетная кривая существенно завышает теплопроводность (при влажности 20% – на 0.6 Вт/(м*К)).

Таким образом, для нашей выборки образцов модель Кэмпбелла позволяет задавать теплофизические свойства почв и субстратов через ПТФ при отсутствии экспериментальных данных. Однако для нестандартных субстратов (органо-минеральные смеси) решение обратной задачи (восстановление кривой $\lambda(\theta)$) все же требует экспериментальных данных о теплопроводности почв, которые будут являться необходимым экспериментальным обеспечением при адекватной аппроксимации.

ВЫВОДЫ

1. Для получения кривых зависимости теплопроводности от влажности почв необходим ряд методических рекомендаций. В зависимости от целей и необходимой степени точности исследования возможны различные варианты использования прибора: 1) использовать монолитные образцы для исследования $\lambda(\theta)$ и фиксировать зонд в образце в течение всего периода иссушения почвенного образца, 2) задавать влажность для каждой точки на кривой зависимости $\lambda(\theta)$, или 3) увеличивать число повторностей при исследовании $\lambda(\theta)$ в одном образце, особенно для минеральных почв.

2. При исследовании влияния химико-физических свойств на величину теплопроводности, определяющих теплофизические свойства субстратов для городских конструкторземов и верхних горизонтов городских почв, выявлен ряд закономерностей:

- в монолитных почвенных образцах с более неоднородным поровым пространством теплопроводность несколько ниже по сравнению с насыпными образцами (до 0.2 Вт/(м*К)), что объясняется более быстрым переносом тепла в выровненном поровом пространстве насыпных образцов.

- теплопроводность почв и субстратов зависит от влажности в наибольшей степени. Разброс значений теплопроводности в диапазоне от гигроскопической влажности до полной влагоемкости для дерново-подзолистой почвы составляет 0.229–1.430 Вт/(м*К), для торфа разброс составляет 0.250–0.521 Вт/(м*К), для песка 0.280–2.605 Вт/(м*К), для смеси 0.234–1.568 Вт/(м*К).

- при заданной влажности почва с более низкой плотностью (1.2 г/см³) обладает меньшей теплопроводностью, чем почва с более высокой плотностью (1.5 г/см³) – 1.142–1.272 Вт/(м*К) и 1.305–1.363 Вт/(м*К) соответственно. Это согласуется с большим объемом воды или воздуха в менее плотной почве, которые имеют меньшие значения теплопроводности, чем твердая фаза минеральных почв.

- при увеличении содержания органического вещества теплопроводность почв уменьшается, что определяет как тепловые свойства высокогумусных минеральных почв (чернозема), так и орга-

нических почв (торф) и субстратов на их основе (смесь). При этом теплопроводность смешанного субстрата на основе песка : торфа : суглинка (5.9 : 1 : 4.4 по массе соответственно) в области низких значений влажности практически совпадает с зависимостью $\lambda(\theta)$ для образца торфа.

- при засолении теплопроводность минеральных почв снижается ввиду увеличения дисперсности. Так, с увеличением концентрации соли КВг до значений, соответствующих сильной степени засоления, теплопроводность снижается с 1.3 Вт/(м*К) до 1.1 Вт/(м*К).

- эти свойства влияют на разброс значений теплопроводности для зональных городских почв в диапазоне от гигроскопической влажности до полной влагоемкости: для дерново-подзолистой почвы разброс составляет 0.229–1.430 Вт/(м*К), для чернозема – 0.308–1.103 Вт/(м*К), для каштановой почвы – 0.222–1.282 Вт/(м*К).

3. Для задания физического обеспечения динамических моделей распределения тепла в почвах типа HYDRUS-1D была исследована прогнозная возможность двух уравнений зависимости теплопроводности от влажности $\lambda(\theta)$, реализованных в данной модели: Чанга–Хортон и Кэмпбелла. В демонстрационных целях, при использовании исследованной выборки образцов, ни одно из уравнений не может в полной мере описать изменение теплопроводности в зависимости от влажности в органо-минеральных субстратах на основе базовых свойств (гранулометрический состав, содержание органического вещества), что ограничивает их использование для расчета температурного режима почвенных конструкций. Но оба уравнения возможно использовать для аппроксимации экспериментальных данных по зависимости теплопроводности от влажности материалов с последующим применением в HYDRUS-1D в качестве физического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болотов А.Г.* Теплофизическое состояние почв и совершенствование инструментальной базы для его исследований: Дис... канд. с.-х. наук. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2003. 148 с.

2. Болотов А.Г., Беховых Ю.В., Семенов Г.А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 6(68). С. 37–40.
3. Грингоф И.Г., Пасечнюк Б.В. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 552 с.
4. Гюлялыев Ч.Г. Влияние влажности и удельной поверхности на температуропроводность почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 8(130). С. 71–75.
5. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении / Науч. ред. Ю.Н. Благовещенский. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. 328 с.
6. Келле А.Н. Приборы TEMPOS для измерений теплофизических параметров материалов. Руководство по эксплуатации. М.: ООО “ЛабДепо”. 2020. 38 с.
7. Мазиров М.А., Макарычев С.В., Болотов А.Г., Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., Иванов А.Л., Лёвин А.А. Теплофизические свойства и режимы в антропогенно-нарушенных почвах / под ред. С.В. Макарычева, М. А. Мазирова. М.: “Химия в сельском хозяйстве”, 2003. 153 с.
8. Сенников В.А., Ларин Л.Г., Белолобцев А.И., Коровина Л.Н. Практикум по агрометеорологии. М.: КолосС, 2006. 215 с.
9. Суленкова М.М., Умарова А.Б., Бутылкина М.А. Микроструктура почв разного генезиса и ее трансформация в составе конструкторов в условиях г. Москвы // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1265–1273.
10. Теории и методы физики почв: коллективная монография / под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
11. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C., Khdair A.I., Al-Jalil H.F. Thermal conductivity of disturbed soils under laboratory conditions // Transactions of the ASAE. 2000. Vol. 43(4). P. 855–860. DOI: [10.13031/2013.2980](https://doi.org/10.13031/2013.2980).
12. Arkhangelskaya T.A., Gvozdkova A.A. Thermal diffusivity of peat-sand mixtures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368(1). No. 012005. P. 2–7. DOI: [10.1088/1755-1315/368/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012005).
13. Bauer J.M., Kramer E., Mainzer A.K., Stevenson R., Graw T., Masiero J.R., Walker R.G., Fernandez Yan R., Meech K.J., Lisse C.M., Weissman P.R., Curti R.M., Dailey J.W., Masci F.J., Tholen D.J., Pearman G., Wright E.L. WISE/NEOWISE preliminary analysis and highlights of the 67P/Churyumov-Gerasimenko near nucleus environs // The Astrophysical Journal. 2012. Vol. 758(1). 29 p. DOI: [10.1088/0004-637X/758/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/1/18).

14. *Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V., Kokoreva A.A., Levin A.A., Patrushev V.Y.* Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368(1). P. 008–012. DOI: [10.1088/1755-1315/368/1/012008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008).
15. *Buchner J.S., Simunek J., Lee J., Rolston E.D.* Evaluation of CO₂ fluxes from an agricultural field using a process-based numerical model // Journal of Hydrology. 2008. Vol. 361(1–2). P. 131–143. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.07.035](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.035).
16. *Campbell G.S.* Soil Physics with Basic. Transport Models for Soil – Plant Systems // Developments in Soil Science. 1994. Vol. 14. P. 150.
17. *Campbell G.S., Jungbauer J.D.Jr., Bidlake W.R., Hungerford R.D.* Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity // Soil Science. 1994. Vol. 158(5). P. 307–313.
18. *Chung S.-O., Horton R.* Soil heat and water flow with a partial surface mulch // Water Resources Research. 1987. Vol. 23. Iss. 12. P. 2175–2186. DOI: [10.1029/WR023i012p02175](https://doi.org/10.1029/WR023i012p02175).
19. *Devendra N.S., Konchenapalli D.* Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity // Experimental Thermal and Fluid Science. 2000. Vol. 22. Iss. 3–4. P. 133–143. DOI: [10.1016/S0894-1777\(00\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00020-0).
20. *Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutyavin I.N., Startsev V.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D.* Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia // Catena. CATENA Verlag, Germany. 2022. Vol. 217. P. 106449.
21. *Fröb K.* Measuring and modeling of soil thermal properties and ground heat flux at two different sites at Lena Delta, Siberia: Diploma thesis, matric. number: 9762674 // Universität Leipzig; Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Potsdam. 2011. 99 p.
22. *Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Umarova A.B., Butylkina M.A., Kokoreva A.A., Ivanova A.E., Maksimova I.A., Bolotov A.G., Dunaeva E.A.* Yeast complexes in urban soils of some southern cities of Russia (Krasnodar, Maykop, Simferopol and Sochi) // Microbiology. 2020. Vol. 89. No. 5. P. 603–608.
23. *Ju W., Chen J., Black T.A., Barr A.* Modelling multi-year coupled carbon and water fluxes in a boreal aspen forest // Agricultural and Forest Meteorology. 2006. Vol. 140(1). P. 136–151. DOI: [10.1016/j.agrformet.2006.08.008](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.008).
24. *Kokoreva A.A., Dembovetskiy A.V., Ezhelev Z.S., Bolotov A.G., Stepanenko V.M., Shishkin K.V., Abramyan I.A.* Simulating water transport in porous media of urban soil // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 862. No. 1. P. 012042–012046.

25. Kroes J.G., Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Jacobs C.M.J. SWAP version 3.2. Theory description and user manual // Alterra Report 1649. Wageningen: Alterra, 2008. 262 p.
26. Lin J., Nowamooz H., Braymand S., Wolff P., Fond C. Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system // Renewable Energy. Vol. 147(15). 2018. P. 1–25. DOI: [10.1016/j.renene.2018.06.106](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.106).
27. Liu C.-H., Zhou D., Wu H. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2011. Vol. 33(12). P. 1877–1886.
28. Loukili Y., Woodbury A.D., Snelgrove K.R. SABAE-HW: An Enhanced Water Balance Prediction in the Canadian Land Surface Scheme Compared with Existing Models // Vadose Zone Journal. 2008. Vol. 7. Iss. 3. P. 865–877. DOI: [10.2136/vzj2007.0081](https://doi.org/10.2136/vzj2007.0081).
29. McKenzie N.J., Coughlan K.J., Cresswell H.P. Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation. Australia: CSIRO Publishing, 2002. 379 p.
30. Noborio K., McInnes K.J. Thermal conductivity of salt-affected soils // Soil Science Society of American Journal. 1993. Vol. 57. Iss. 2. P. 329–334. DOI: [10.2136/sssaj1993.03615995005700020007x](https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020007x).
31. O'Donnel J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., McGuire A.D. The effect of moisture content on the thermal conductivity of Moss and organic soil horizons from Black Spruce ecosystems in Interior Alaska // Soil Science. 2009. Vol. 174(12). P. 646–651. DOI: [10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8).
32. Rajeev P., Chan D., Kodikara J. Ground-atmosphere interaction modelling for long-term prediction of soil moisture and temperature // Canadian Geotechnical Journal. 2012. Vol. 49(9). DOI: [10.1139/T2012-068](https://doi.org/10.1139/T2012-068).
33. Ronan A.D., Prudic D.E., Thodal C.E., Constantz J. Field study and simulation of diurnal temperature effects on infiltration and variably saturated flow beneath an ephemeral stream // Water Resources Research. 1998. Vol. 34(9). P. 2137–2153. DOI: [10.1029/98WR01572](https://doi.org/10.1029/98WR01572).
34. Rozanski A., Sobótka M. On the interpretation of the needle probe test results: thermal conductivity measurement of clayey soils // Studia Geotechnica et Mechanica. 2013. Vol. 35. No. 1. DOI: [10.2478/sgem-2013-0015](https://doi.org/10.2478/sgem-2013-0015).
35. Sakai M., Jones S.B., Tuller M. Numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance // Water Resources Research. 2011. Vol. 47. W02547. P. 1–17. DOI: [10.1029/2010WR009866](https://doi.org/10.1029/2010WR009866).
36. Schjønning P. Thermal conductivity of undisturbed soil – Measurements and predictions // Geoderma. 2021. Vol. 402(331). DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115188](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115188).

37. Šejna M., Šimůnek J., van Genuchten M.Th. HYDRUS. User Manual. Version 5. Prague: PC-Progress, 2022. P. 88–91.
38. Simsek U., Mikailsoy F., Erdel E., Shein E.V., Bolotov A.G. Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey calcic pantofluvic fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey) // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 296–299.
39. Timlin D., Pachepsky Ya., Acock A., Simunek J. Error analysis of soil temperature simulations using measured and estimated hourly weather data with 2DSOIL // *Agricultural Systems*. 2002. Vol. 72(3). P. 215–239. DOI: [10.1016/S0308-521X\(01\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00075-0).
40. Vogel T., Dohnal M., Votrubova J. Modeling heat fluxes in macroporous soil under sparse young forest of temperate humid climate // *Journal of Hydrology*. 2011. Vol. 402(3). P. 367–376. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.03.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.030).
41. Wiesner S., Gröngroft A., Ament F., Eschenbach A. Spatial and temporal variability of urban soil water dynamics observed by a soil monitoring network // *J. Soils Sediments*. 2016. Vol. 16(11). P. 2523–2537.
42. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.H.M. Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2020. Vol. 35(3). P. 737–757. DOI: [10.1007/s00477-020-01882-1](https://doi.org/10.1007/s00477-020-01882-1).
43. Zhang N., Wang Zh. Review of soil thermal conductivity and predictive models // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 117. P. 172–183. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013).

REFERENCES

1. Bolotov A.G., *Teplofizicheskoe sostoyanie pochv i sovershenstvovanie instrumental'noi bazy dlya ego issledovaniy: Dis... kand. s.-kh. nauk* (Thermophysical state of soils and improvement of the instrumental base for its research, Cand. agricultural sci. thesis), Barnaul: Altaiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2003, 148 p.
2. Bolotov A.G., Bekhovykh Yu.V., Semenov G.A., *Opreделение teplofizicheskikh svoystv kapillyarno-poristykh tel impul'snym metodom s ispol'zovaniem tekhnologii vizual'nogo programmirovaniya* (Determination of thermophysical properties of capillary-porous bodies by pulse method using visual programming technology), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, No. 6(68), pp. 37–40.
3. Gringof I.G., Pasechnyuk B.V., *Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya* (Agrometeorology and

agrometeorological observations), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005, 552 p.

4. Gyulalyev Ch.G., Vliyanie vlazhnosti i udel'noi poverkhnosti na temperaturoprovodnost' pochv (Influence of humidity and specific surface area on soil thermal conductivity), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, No. 8(130), pp. 71–75.

5. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical statistics in soil science), Moscow: Knizhnyi dom “LIBROKOM”, 2009, 328 p.

6. Kelle A.N., *Pribory TEMPOS dlya izmerenii teplofizicheskikh parametrov materialov. Rukovodstvo po ekspluatatsii* (TEMPOS devices for measuring thermophysical parameters of materials. Operation manual), Moscow: OOO “LabDepo”, 2020, 38 p.

7. Mazirov M.A., Makarychev S.V., Bolotov A.G., Trofimov I.T., Bekhovych Yu.V., Sizov E.G., Ivanov A.L., Levin A.A., *Teplofizicheskie svoystva i rezhimy v antropogenno-narushennykh pochvakh* (Thermophysical properties and regimes in anthropogenically disturbed soils), Moscow: “Khimiya v sel'skom khozyaistve”, 2003, 153 p.

8. Sennikov V.A., Larin L.G., Belolyubtsev A.I., Korovina L.N., *Praktikum po agrometeorologii* (Workshop on agrometeorology), Moscow: KolosS, 2006, 215 p.

9. Suslenkova M.M., Umarova A.B., Butylkina M.A., Mikrostruktura pochv raznogo genezisa i ee transformatsiya v sostave konstruktozemov v usloviyakh g. Moskvy (Microstructure of Soils of Different Geneses and Its Transformation in Constructozems of Moscow), *Pochvovedenie*, 2018, No. 10, pp. 1265–1273.

10. Shein E.V., Karpachevskii L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: “Grif i K”, 2007, 616 p.

11. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C., Khedair A.I., Al-Jalil H.F., Thermal conductivity of disturbed soils under laboratory conditions, *Transactions of the ASAE*, 2000, Vol. 43(4), pp. 855–860, DOI: [10.13031/2013.2980](https://doi.org/10.13031/2013.2980).

12. Arkhangelskaya T.A., Gvozdkova A.A., Thermal diffusivity of peat-sand mixtures, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, Bristol, UK, England, 2019, Vol. 368(1), No. 012005, pp. 2–7, DOI: [10.1088/1755-1315/368/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012005).

13. Bauer J.M., Kramer E., Mainzer A.K., Stevenson R., Graw T., Masiero J.R., Walker R.G., Fernandez Yan R., Meech K.J., Lisse C.M., Weissman P.R., Curti R.M., Dailey J.W., Masci F.J., Tholen D.J., Pearman G., Wright E.L., WISE/NEOWISE preliminary analysis and highlights of the 67P/Churyumov-Gerasimenko near nucleus environs, *The Astrophysical Journal*, 2012, Vol. 758(1), 29 p., DOI: [10.1088/0004-637X/758/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/1/18).

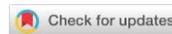
14. Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V., Kokoreva A.A., Levin A.A., Patrushev V.Y., Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 368(1), pp. 008–012, DOI: [10.1088/1755-1315/368/1/012008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008).
15. Buchner J.S., Simunek J., Lee J., Rolston E.D., Evaluation of CO₂ fluxes from an agricultural field using a process-based numerical model, *Journal of Hydrology*, 2008, Vol. 361(1–2), pp. 131–143, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.07.035](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.035).
16. Campbell G.S., Soil Physics with Basic Transport Models for Soil – Plant Systems, *Developments in Soil Science*, 1994, Vol. 14, 150 p.
17. Campbell G.S., Jungbauer J.D.Jr., Bidlake W.R., Hungerford R.D., Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity, *Soil Science*, 1994, Vol. 158(5), pp. 307–313.
18. Chung S.-O., Horton R., Soil heat and water flow with a partial surface mulch, *Water Resources Research*, 1987, Vol. 23. Iss. 12, pp. 2175–2186, DOI: [10.1029/WR023i012p02175](https://doi.org/10.1029/WR023i012p02175).
19. Devendra N.S., Konchenapalli D., Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, Vol. 22, Iss. 3–4, pp. 133–143, DOI: [10.1016/S0894-1777\(00\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00020-0).
20. Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutyavin I.N., Startsev V.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D., Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia, *Catena*, CATENA Verlag, Germany, 2022, Vol. 217, pp. 106449.
21. Fröb K., *Measuring and modeling of soil thermal properties and ground heat flux at two different sites at Lena Delta, Siberia: Diploma thesis*, matric. number: 9762674, Universität Leipzig; Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Potsdam, 2011, 99 p.
22. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Umarova A.B., Butylkina M.A., Kokoreva A.A., Ivanova A.E., Maksimova I.A., Bolotov A.G., Dunaeva E.A., Yeast complexes in urban soils of some southern cities of Russia (Krasnodar, Maykop, Simferopol and Sochi), *Microbiology*, 2020, Vol. 89, No. 5, pp. 603–608.
23. Ju W., Chen J., Black T.A., Barr A., Modelling multi-year coupled carbon and water fluxes in a boreal aspen forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, Vol. 140(1), pp. 136–151, DOI: [10.1016/j.agrformet.2006.08.008](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.008).
24. Kokoreva A.A., Dembovetskiy A.V., Ezhelev Z.S., Bolotov A.G., Stepanenko V.M., Shishkin K.V., Abramyan I.A., Simulating water transport

- in porous media of urban soil, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 862, No. 1, pp. 012042–012046.
25. Kroes J.G., Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Jacobs C.M.J., *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*, Alterra Report 1649, Wageningen, Alterra, 2008, 262 p.
26. Lin J., Nowamooz H., Braymand S., Wolff P., Fond C., Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system, *Renewable Energy*, 2018, Vol. 147(15), pp. 1–25, DOI: [10.1016/j.renene.2018.06.106](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.106).
27. Liu C.-H., Zhou D., Wu H, Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils, *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, Vol. 33(12), pp. 1877–1886.
28. Loukili Y., Woodbury A.D., Snelgrove K.R., SABAE-HW: An Enhanced Water Balance Prediction in the Canadian Land Surface Scheme Compared with Existing Models, *Vadose Zone Journal*, 2008, Vol. 7, Iss. 3, pp. 865–877, DOI: [10.2136/vzj2007.0081](https://doi.org/10.2136/vzj2007.0081).
29. McKenzie N.J., Coughlan K.J., Cresswell H.P, *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*, Australia, CSIRO Publishing, 2002, 379 p.
30. Noborio K., McInnes K.J., Thermal conductivity of salt-affected soils, *Soil Science Society of American Journal*, 1993, Vol. 57, Iss. 2, pp. 329–334, DOI: [10.2136/sssaj1993.03615995005700020007x](https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020007x).
31. O'Donnell J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., McGuire A.D., The effect of moisture content on the thermal conductivity of Moss and organic soil horizons from Black Spruce ecosystems in Interior Alaska, *Soil Science*, 2009, Vol. 174(12), pp. 646–651, DOI: [10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8).
32. Rajeev P., Chan D., Kodikara J., Ground–atmosphere interaction modelling for long-term prediction of soil moisture and temperature, *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, Vol. 49(9), DOI: [10.1139/T2012-068](https://doi.org/10.1139/T2012-068).
33. Ronan A.D., Prudic D.E., Thodal C.E., Constantz J., Field study and simulation of diurnal temperature effects on infiltration and variably saturated flow beneath an ephemeral stream, *Water Resources Research*, 1998, Vol. 34(9), pp. 2137–2153, DOI: [10.1029/98WR01572](https://doi.org/10.1029/98WR01572).
34. Rozanski A., Sobótka M. On the interpretation of the needle probe test results: thermal conductivity measurement of clayey soils, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2013, Vol. 35, No. 1, DOI: [10.2478/sgem-2013-0015](https://doi.org/10.2478/sgem-2013-0015).
35. Sakai M., Jones S.B., Tuller M., Numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance, *Water Resources Research*, 2011, Vol. 47, W02547, pp. 1–17, DOI: [10.1029/2010WR009866](https://doi.org/10.1029/2010WR009866).

36. Schjønning P., Thermal conductivity of undisturbed soil – Measurements and predictions, *Geoderma*, 2021, Vol. 402(331), DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115188](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115188).
37. Šejna M., Šimůnek J., van Genuchten M.Th., HYDRUS. User Manual. Version 5, PC-Progress, Prague, Czech Republic, 2022, pp. 88–91.
38. Simsek U., Mikailsoy F., Erdel E., Shein E.V., Bolotov A.G., Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey calcic pantofluvic fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 296–299.
39. Timlin D., Pachepsky Ya., Acock A., Simunek J., Error analysis of soil temperature simulations using measured and estimated hourly weather data with 2DSOIL, *Agricultural Systems*, 2002, Vol. 72(3), pp. 215–239, DOI: [10.1016/S0308-521X\(01\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00075-0).
40. Vogel T., Dohnal M., Votrubova J., Modeling heat fluxes in macroporous soil under sparse young forest of temperate humid climate, *Journal of Hydrology*, 2011, Vol. 402(3), pp. 367–376, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.03.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.030).
41. Wiesner S., Gröngroft A., Ament F., Eschenbach A. Spatial and temporal variability of urban soil water dynamics observed by a soil monitoring network, *J. Soils Sediments*, 2016, Vol. 16(11), pp. 2523–2537.
42. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.H.M., Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, Vol. 35(3), pp. 737–757, DOI: [10.1007/s00477-020-01882-1](https://doi.org/10.1007/s00477-020-01882-1).
43. Zhang N., Wang Zh., Review of soil thermal conductivity and predictive models, *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, Vol. 117, pp. 172–183, DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-167-187



Ссылки для цитирования:

Широян М.М., Умарова А.Б., Федотова А.В., Бутылкина М.А. Удельная поверхность и микроструктура поверхности твердой фазы почвенных субстратов разного генезиса // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 167-187. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-167-187

Cite this article as:

Shiroyan M.M., Umarova A.B., Fedotova A.A., Butylkina M.A., Specific surface area and microstructure of the surface of soil solid substrates of different genesis, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 167-187, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-167-187

Благодарность:

Определение удельной поверхности по азоту выполнено на “Аналитическом комплексе для определения текстурных характеристик дисперсных систем” (Meso 222, Vapor 100, 3P Instruments, Германия, 2021), приобретенном по Программе развития Московского государственного университета М.В. Ломоносова. Исследование микростроения субстратов проводилось в центре коллективного пользования “Электронная микроскопия в науках о жизни” МГУ им. М.В. Ломоносова (УНУ “Трехмерная электронная микроскопия и спектроскопия”). Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” (номер ЦИТИС 121040800146-3).

Acknowledgments:

Nitrogen specific surface area was determined by means of the “Analytical complex for determination of texture characteristics of dispersed systems” (Meso 222, Vapor 100, 3P Instruments, Germany, 2021), purchased within the framework of the Development Programme of the Lomonosov Moscow State University. The study of substrate microstructure was carried out at the Shared Research Facility “Electron microscopy in life sciences” at Moscow State University (Unique Equipment “Three-dimensional electron microscopy and spectroscopy”). The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Physical bases of ecological functions of soils: monitoring, forecasting and management technologies” (CITIS number 121040800146-3).

Удельная поверхность и микроструктура поверхности твердой фазы почвенных субстратов разного генезиса

© 2024 г. М. М. Широян^{1*}, А. Б. Умарова^{1**}, А. В. Федотова²,
М. А. Бутылкина¹

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

*<https://orcid.org/0000-0003-1303-8078>,

e-mail: suslenkovamaria@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-2124-8657>, e-mail: a.b.umarova@gmail.com.

²Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и
защитного лесоразведения Российской академии наук
(ФНЦ агроэкологии РАН), Россия,
400062, г. Волгоград, Университетский проспект, 97.

Поступила в редакцию 30.12.2024, после доработки 17.01.2024,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Изучены сорбционные характеристики песка, торфа, горизонта $A_{\text{пах}}$ урбанозема г. Москвы и смеси данных субстратов во взаимосвязи с топографией поверхности их твердой фазы, исследованной методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Наибольшей способностью сорбировать азот обладает горизонт $A_{\text{пах}}$, весьма низкие значения сорбции азота имеет торфяной субстрат. Иная картина взаимного расположения изотерм сорбции субстратов наблюдается в случае использования паров воды в качестве сорбирующегося газа. Высокими значениями сорбированной влаги во всем исследуемом диапазоне относительной влажности выделяется торф. Это ведет к различиям при ранжировании субстратов по величинам удельной поверхности в порядке убывания ее значений. Так, удельная поверхность по воде в ряду торф/гор. $A_{\text{пах}}$ / смесь / песок составила: 420 / 72 / 45 / 4 м²/г соответственно. Удельная поверхность по азоту снижалась в иной последовательности: 8.31 / 2.41 / 1.45 / 0.55 м²/г для гор. $A_{\text{пах}}$, смеси, торфа, песка соответственно. Анализ микроструктурных характеристик методом СЭМ при различных увеличениях выявил наиболее развитую, шероховатую поверхность пахотного горизонта. Он оказался геометрически наиболее разнообразен даже при увеличениях 20 000. Разнообразие и неоднородность рельефа поверхности раздела фаз ведет к возникновению гистерезиса кривых сорбции/десорбции. Его выраженность по диапазону концентрации паров азота, в котором

обнаруживается гистерезис, и по максимальной ширине петли гистерезиса также оказалась наибольшей в горизонте $A_{\text{пах}}$. Очень низкая удельная поверхность по азоту торфа, близкая песчаному субстрату, связана с наличием органических пленок, драпирующих и выравнивающих поверхность частиц торфа, что было выявлено при анализе изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии. Сорбция воды показала их высокую гидрофильность, что привело к высоким значениям влажности субстрата во всем исследуемом диапазоне относительной влажности воздуха.

Ключевые слова: гидросорбция; десорбция азота; сканирующая электронная микроскопия; гистерезис кривых сорбции; торф; песок.

Specific surface area and microstructure of the surface of soil solid substrates of different genesis

© 2024 M. M. Shiroyan^{1*}, A. B. Umarova^{1**}, A. V. Fedotova²,
M. A. Butylkina¹

¹*Lomonosov Moscow State University,
Build. 12, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-1303-8078>,
e-mail: suslenkovamaria@gmail.com,*

***<https://orcid.org/0000-0003-2124-8657>, e-mail: a.b.umarova@gmail.com.*

²*Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and
Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences,
97 Universitetskiy Prospekt, Volgograd 400062, Russian Federation.*

Received 30.12.2024, Revised 17.01.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: The sorption characteristics of sand, peat, the arable layer of Moscow urbanozem and a mixture of these substrates were studied in conjunction with the surface topography of their solid phase, studied by scanning electron microscopy (SEM). The arable layer has the greatest ability to absorb nitrogen, and the peat substrate showed very low values of the sorbed gas. A different picture of the mutual arrangement of substrate sorption isotherms is observed when water vapour is used as a sorbing gas. Peat is distinguished by high values of sorbed moisture in the entire studied range of relative humidity. This leads to differences in the ranking of substrates by specific surface area in descending order of its values. So, the specific surface area by water sorption in the series: peat / arable layer / mixture / sand was: 420 / 72 / 45 / 4 m²/g, respectively. The given surface was ranked according to nitrogen sorption in a different sequence: 8.31 / 2.41 / 1.45 / 0.55 for the

series: arable layer, mixture, peat and sand, respectively. The analysis of microstructural characteristics by the SEM method at various magnifications revealed the most developed, rough surface in the arable layer. It turned out to be geometrically the most diverse, even at magnification of $\times 20\,000$. The variety and heterogeneity of the relief of the interface of the phases leads to the appearance of hysteresis of the sorption/desorption curves. Its severity in the range of nitrogen vapor concentration in which hysteresis is detected, and in the maximum width of the hysteresis loop, also turned out to be the most significant in the arable layer. The very low nitrogen specific surface of peat, which is close to a sandy substrate, is associated with the presence of organic films draping and leveling the surface of peat particles, which was revealed by analyzing images obtained by scanning electron microscopy. The sorption of water showed their high hydrophilicity, which led to high values of substrate humidity in the entire studied range of relative humidity.

Keywords: hydrosorption; nitrogen desorption; scanning electron microscopy; hysteresis of sorption curves; peat; sand.

ВВЕДЕНИЕ

Почва – это многокомпонентная система, состоящая из разнообразных по генезису и свойствам органических, органоминеральных и минеральных частиц, в той или иной мере связанных друг с другом и образующих очень сложную гетерогенную границу поверхности раздела твердой / жидкой или газообразной фаз. Именно поверхность твердой фазы почв является основной площадкой множества реакций в почве (Heister, 2014; Totsche et al., 2010), определяющих ее функционирование (Glushakova et al., 2020; Yu et al., 2020; Simsek et al., 2019). Одной из ее характеристик выступает удельная поверхность почв, значения которой зависят от множества факторов (Jozefaciuk, 2011): емкости катионного обмена (Ersahin et al., 2006), содержания органического вещества (Petersen et al., 1996; Смагин и др., 2004), гранулометрического, минералогического состава (Воронин, Витязев, 1971; Витязев и др., 1983; Nepper et al., 2006; Jahanban et al., 2018). Рядом авторов показана прямая зависимость удельной поверхности от содержания илистой фракции и обратная зависимость от содержания песчаной фракции в гранулометрическом составе почв (Ratner-Zohar et al., 1983; Puckett et al., 1985; Ben-Dor, Banin, 1995). Основой для расчета удельной поверхности дисперсных тел, в том чис-

ле почвы, является изотерма сорбции каких-либо газов. Выбор сорбируемого вещества определяет значения удельной поверхности, обусловленные не только размером молекул газа, но и спецификой их взаимодействия с геометрически и энергетически очень неоднородной поверхностью раздела фаз. В настоящее время наиболее распространенным является расчет удельной поверхности по изотермам, полученным методами: 1) низкотемпературной сорбции азота, 2) сорбции паров воды над насыщенными растворами солей, 3) сорбции паров этиленгликоля (Теория и методы..., 2006; Heister, 2014; de Jong, 1999; Rudzinski, Everett, 1992). От выбранного метода будет зависеть, какая характеристика сорбционной способности почвы будет более показательно описана. Полярные сорбаты, такие как этиленгликоль и вода, при определении удельной поверхности дают более высокие значения, чем неполярные вещества, такие как азот, из-за неспособности N_2 проникать в межслойные пространства и микропоры, которые определяют “внутреннюю” площадь поверхности (de Jong, 1999). Ввиду этого разные методы будут чувствительны к изменениям разных свойств почв. Например, высокое содержание органического вещества будет занижать значения удельной поверхности по азоту. Удельная поверхность по воде хорошо коррелирует с содержанием органического вещества. В свою очередь удельная поверхность, измеренная методом низкотемпературной сорбции азота, лучше коррелирует с содержанием илистой фракции (de Jong, 1999; Niskanen, Mäntylähti, 1988).

Таким образом, сорбция воды будет зависеть не только от геометрических характеристик, а в большей степени – от химического и минералогического состава поверхности твердой фазы, определяющего энергетическую составляющую ее взаимодействия с диполями воды. Сорбция азота (N_2) вследствие нейтральности молекул газа будет зависеть от рельефа поверхности раздела фаз, обусловленного гранулометрическим составом и драпирующими пленками разного генезиса на поверхности частиц (Умарова и др., 2019). Особенности взаимодействия различных газов с твердой фазой почв определяют форму и расположение кривых сорбции и ведут к различиям в значениях удельной поверхности разных почв.

Еще одной характеристикой удельной поверхности является гистерезис кривых адсорбции и десорбции сорбатов, основанный на разных физических механизмах данных процессов, связанных с формой пор и строением порового пространства (Giesche et al., 1989; Niskanen, Mäntylähti, 1988). Гистерезис кривых сорбций может позволить рассчитать распределение пор по размеру в субстратах, охарактеризовать геометрию порового пространства (Aharoni, 2002; Giesche et al., 1989).

Актуальность работы обусловлена комплексным подходом к изучению свойств поверхности твердой фазы почвенных субстратов разного генезиса с использованием классических и современных методов исследований.

Целью данной работы было исследовать особенности сорбции воды и азота почвенными субстратами разного генезиса во взаимосвязи с их химическими, физическими свойствами и микроструктурой поверхности твердой фазы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали почвенные субстраты разного генезиса:

1) Горизонт $A_{\text{пах}}$, отобранный в 2020 г. на территории почвенного стационара МГУ (GPS: 55.706187 N; 37.5396461 E) и представляющий собой верхний горизонт урбостратозема средне-мощного слабо оглеенного среднесуглинистого на техногенных отложениях, подстилаемых покровным суглинком. Выбор данного образца обусловлен его весьма классическими характеристиками физических и химических свойств для ряда слабоизмененных пахотных и парковых почв подзоны южной тайги.

2) Песок карьерный, с преобладающей фракцией мелкого песка. Данный субстрат представляет вариант грубодисперсного материала, широко используемый в мелиоративных, строительных и озеленительных целях.

3) Торф низинный обогащенный пакетированный фирмы “Селигер-Агро”. Его особенностью является высокое содержание органического углерода, способность хорошо удерживать влагу.

4) Смесь вышеуказанных субстратов. Данный субстрат получен путем перемешивания вышеуказанных, соотношение кото-

рых по абсолютно сухой массе в смеси равно: $A_{\text{пах}} / \text{торф} / \text{песок} - 4.4 / 1 / 5.9$ соответственно. Данное соотношение рассчитано с учетом равнозначности вклада объема каждого почвенного субстрата в смешанный образец для оценки их влияния на удельную поверхность.

Методы исследования и пробоподготовка. Плотность твердой фазы определяли пикнометрическим методом в трехкратной повторности, общее содержание углерода – методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе АН-7529М (Теория и методы..., 2007), гранулометрический состав – методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц Mastersizer 3000E (Malvern, UK) с ультразвуковой пробоподготовкой.

Для анализа сорбционных и микроструктурных свойств образцы перетирались резиновым пестиком и просеивались через сито размером 1 мм.

Определение изотерм сорбции воды проводили путем постепенного иссушения насыщенных образцов в трехкратной повторности путем их последовательного достижения сорбционного равновесия над насыщенными растворами солей в закрытых эксикаторах (Теория и методы..., 2007). Расчет полной удельной поверхности по воде осуществляли по БЭТ, а внутренней и внешней по Фарреру (Теория и методы..., 2007).

Определение кривых сорбции азота определяли статическим объемным методом низкотемпературной сорбции азота на аналитическом комплексе, состоящем из 3P Meso 222 и 3P Vapor 100. Расчет полной удельной поверхности по азоту осуществлялся по БЭТ автоматическим программным обеспечением аналитического комплекса (Руководство по эксплуатации..., 2021).

Графики изотерм сорбции для удобства сравнения разных образцов представлены в виде средних значений для трех повторностей в каждой точке измерения.

Микроструктуру поверхности субстратов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Quattro S (Thermo Fisher Scientific, USA). Анализ проводили в режиме регистрации вторичных электронов (ESEM) при ускоряющем напряжении $HV = 20 \text{ кВ}$, давлении $P = 500 \text{ Па}$, рабочем расстоянии $WD = 10 \text{ мм}$ (Сусленкова и др., 2018). Съемка велась при

увеличениях от $\times 1\ 000$ до $\times 80\ 000$ с трехкратной повторностью образцов, в общей сумме по 15 полям зрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения основных физических и химических свойств субстратов закономерно различались в соответствии с их генезисом (табл. 1).

Образец горизонта $A_{\text{пах}}$ характеризовался наибольшим количеством ила (2.8%) и физической глины (36.4%) с концентрацией общего углерода около 3%. В песке содержание ила и физической глины было закономерно наименьшим – 0.4 и 4.4% соответственно, а концентрация углерода около 0.3%. Самое высокое содержание углерода (53%) было выявлено в торфе. Значение емкости катионного обмена убывало в ряду торф $\rightarrow A_{\text{пах}} \rightarrow$ песок, и составило 119.5, 25.5 и 6.4 мг-экв/100 г почвы соответственно. При этом следует отметить, что торф обладает низким значением плотности твердой фазы, следовательно, данное количество обменных катионов распределено в большем объеме субстрата по сравнению с $A_{\text{пах}}$ и песком.

Таблица 1. Основные физические и химические свойства субстратов
Table 1. Main physical and chemical characteristics of substrates

Субстрат	гор. $A_{\text{пах}}$	торф	песок	смесь
$\rho_s, \text{ г/см}^3$	2.51 ± 0.02	1.00 ± 0.02	2.67 ± 0.05	2.35 ± 0.03
физ. глина, %	36.43	-	4.43	21.90
ил, %	2.78	-	0.4	0.87
$C_{\text{общ}}, \%$	3.0	53.0	0.3	6.0
ЕКО, мг-экв/100 г почвы	25.5	119.5	6.4	-

Графики сорбции воды оказались очень схожи с кривыми, полученными для ранее исследованных субстратов (Умарова,

2019): гор. $A_{\text{пах}}$ того же урбанозема, образец которого был отобран в 2012 г., торфа низинного фирмы “Селигир-Агро” партии 2012 г., песка карьерного, главное отличие которого от исследуемого в настоящей статье – высокая окарбоначенность.

Все изотермы имеют сигмовидную форму (рис. 1), с выпуклым участком в области низких значений относительного давления паров воды ($p/p_0 < 0.35$), при которых происходит формирование мономолекулярного слоя, и вогнутым участком в области с $p/p_0 > 0.8$, характеризующим капиллярную конденсацию. Центральная часть кривых имеет форму, близкую к линейной. Подобные формы кривых для почв описаны в литературе (Харитонов и др., 2009).

Высокой сорбционной способностью выделяется торф (рис. 1), в котором влажность образца стремительно увеличивается при повышении относительной влажности воздуха. Схожие форма и расположение изотерм сорбции воды оказались для субстратов смеси и гор. $A_{\text{пах}}$. Весьма низкую способность удерживать воду во всем диапазоне p/p_0 имеет песок.

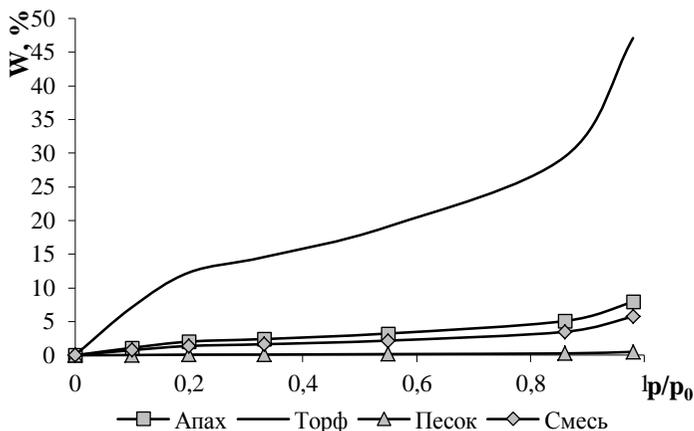


Рис. 1. Графики десорбции воды субстратами разного генезиса.
Fig. 1. Water desorption graphs for substrates of different genesis.

Рассмотрим изотермы сорбции азота для тех же образцов. Необходимо обратить внимание на принципиальное различие методов определений, заключающееся в том, что сорбция воды почвенными образцами над насыщенными растворами солей с разным парциальным давлением позволяет определять массу воды, сорбированную почвой при той или иной влажности воздуха. Определение сорбции азота проводится путем измерения изменения давления газа в заданном объеме сосуда с почвенным образцом. По сути, мы имеем не массовую величину сорбированного газа, а объемную. Однако допущения, связанные с использованием уравнения БЭТ и Фаррера, позволяют рассчитывать проекцию молекул сорбирующихся веществ на единицу площади сорбента в обоих методах, что при соотношении к массе навески почвы дает возможность вычислить удельную площадь поверхности.

Традиционно для воды съемка ведется в режиме десорбции, т. к. сильное иссушение почвы влияет на необратимую коагуляцию многих почвенных коллоидов (Солопов, 2010).

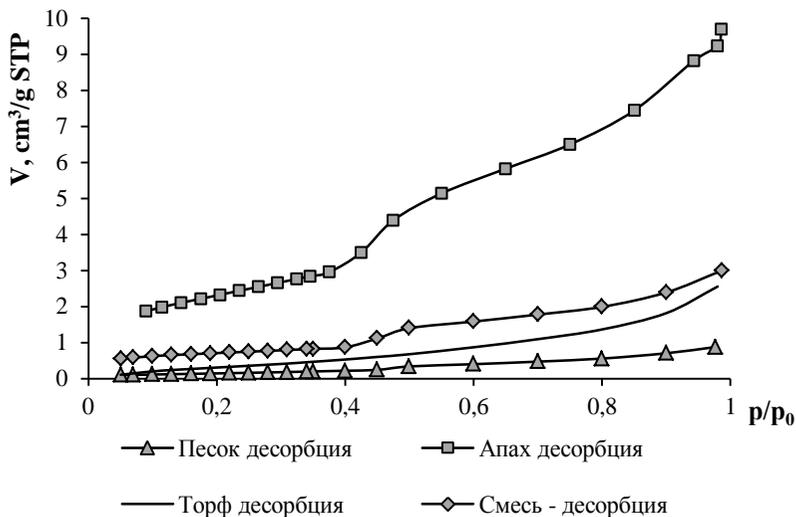


Рис. 2. Графики десорбции азота субстратами разного генезиса.
Fig. 2. Nitrogen desorption graphs for substrates of different genesis.

Проведем сравнение изотерм десорбции паров воды и азота почвенными субстратами (рис. 1 и 2). Вследствие неполярности молекулы азота значения площади удельной поверхности дисперсных систем по азоту, как правило, меньше (Сапожников, 1982; Шеин, 2005), а графики сорбции расположены ниже. Главное отличие этих кривых от графиков сорбции воды заключается в резком изменении их взаимного расположения. Так, сильно выделяется образец пахотного горизонта, изотерма сорбции азота которого расположена значительно выше остальных кривых. Для образцов $A_{\text{пах}}$ и смеси кривые отличаются формой: в области $p/p_0 < 0.4$ кривые имеют линейные участки, далее при p/p_0 от 0.4 до 0.5 – приобретают ступенчатый характер, а при дальнейшем повышении p/p_0 кривые становятся слегка вогнутой формы.

Согласно классическим представлениям о структурной организации почв (Воронин, 1984; Шеин, 2005) диапазон p/p_0 0.35–0.4 – это переход от аппроксимации кривой сорбции уравнением БЭТ к использованию уравнения Фаррера, в котором увеличение влажности, в первую очередь, обусловлено сорбцией на внешней поверхности. Такой ступенчатый характер кривой сорбции азота в узком диапазоне может свидетельствовать о высокой микроструктурности горизонта $A_{\text{пах}}$, что ведет к проявлению процессов капиллярной конденсации уже в средней части кривой сорбции гор. $A_{\text{пах}}$. Данный образец повлиял и на форму кривой смеси.

Весьма равномерный и слабо выраженный рост объема сорбированного азота на поверхности твердой фазы наблюдался для торфяного образца. Его изотерма расположена не только ниже изотермы гор. $A_{\text{пах}}$, но и ниже смеси. Это может свидетельствовать о меньшей геометрической неоднородности поверхности торфа. Причем его близкое расположение к изотерме песка в диапазоне низких значений относительного давления газа позволяет предположить геометрическое сходство их поверхностей раздела фаз, а рост скорости сорбции при $p/p_0 > 0.8$ – об увеличении вклада капиллярной конденсации газа.

Расчет полной удельной поверхности был проведен для воды и азота методом БЭТ, а расчет внешней и внутренней для воды – по Фарреру (табл. 2). Самое высокое значение удельной поверхности ($420 \text{ м}^2/\text{г}$) характерно для торфа, самое низкое ($3.93 \text{ м}^2/\text{г}$) –

для песка, промежуточные значения занимают гор. $A_{\text{пак}}$ и смесь (72.06 и 45.56 м²/г соответственно).

Таблица 2. Удельная поверхность субстратов
Table 2. Specific surface area of substrates

Субстрат		гор. $A_{\text{пак}}$	торф	песок	смесь
$S_{\text{H}_2\text{O}}$, м ² /г	$S_{\text{полн}}$	72.06 ± 2.72	420.23 ± 44.30	3.93 ± 0.66	45.56 ± 3.46
	$S_{\text{внеш}}$	15.97 ± 0.81	52.45 ± 2.59	0.30 ± 0.03	5.28 ± 0.30
	$S_{\text{внут}}$	56.09 ± 2.51	367.77 ± 41.77	3.62 ± 0.69	40.27 ± 3.73
$S_{\text{полнN}_2}$, м ² /г		8.31 ± 0.40	1.45 ± 0.14	0.55 ± 0.02	2.41 ± 0.44

Наибольшая удельная поверхность торфа определяется не столько геометрией поверхности твердой фазы, сколько ее высокой сорбционной способностью по отношению к воде, обнаруживаемой при анализе в режиме десорбции. Отметим то, что для всех субстратов, включая песок, внутренняя поверхность значительно превышает внешнюю. Согласно Воронину (1994), внутренняя поверхность – это полости, поры, межслойные пространства, диаметр которых меньше их глубины. Это значит, что в объеме, обрамляемом внутренней поверхностью, плотность нескомпенсированного заряда выше. Это ведет к большей энергии взаимодействия воды с твердой фазой почвы в этом объеме и большим значениям внутренней удельной поверхности.

Максимальные значения полной удельной поверхности по азоту получены для гор. $A_{\text{пак}}$ и составили в среднем 8.31 м²/г, наименьшее – для песка (0.55 м²/г), промежуточные – для торфа и смеси (1.45 и 2.41 м²/г соответственно). Проведенное исследование сорбционных характеристик почв с использованием полярного водяного пара и электростатически нейтрального азота дает основание предположить, что молекулы азота без какого-либо предпочтения способны проникать в тонкие поры, которые, по видимому, являются более открытыми в образце гор. $A_{\text{пак}}$.

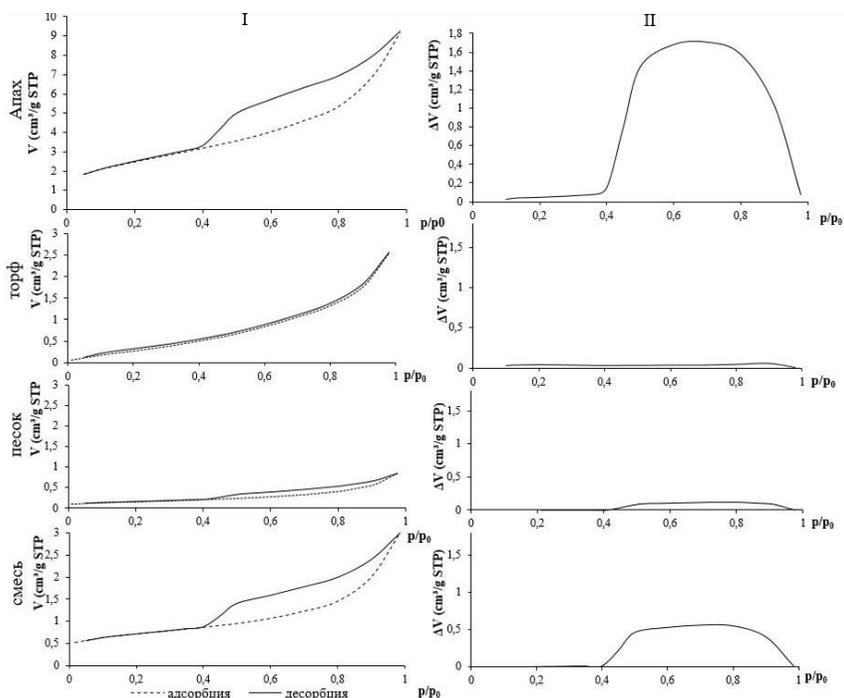


Рис. 3. Графики I – адсорбции и десорбции азота, II – гистерезис сорбции азота субстратами разного генезиса.

Fig. 3. Graphs I – nitrogen adsorption and desorption, II – nitrogen sorption hysteresis of substrates of different genesis.

Съемка изотерм сорбции азота осуществлялась в непрерывном режиме насыщение–десорбция. Для всех исследованных субстратов кривая десорбции азота лежит выше, чем кривая адсорбции, поэтому для них в той или иной мере характерен гистерезис изотерм. На рисунке 3 представлены изотермы сорбции и десорбции азота и разница между ними, позволяющая графически оценить степень расхождения кривых для каждого образца. Во всех субстратах, за исключением $A_{\text{лпак}}$, гистерезис начинается со значений $0.4 p/p_0$ и продолжается до $0.98 p/p_0$. В гор. $A_{\text{лпак}}$ несовпадение кривых отмечается со значений $0.1 p/p_0$, максимальная разница

между ними составила $1.7 \text{ м}^3/\text{г}$. Такое поведение изотерм сорбции азота может быть объяснено микроморфологическим строением субстратов разного генезиса (рис. 4). Образцы гор. $A_{\text{пах}}$ и смеси, в которую включен данный субстрат, имеют выраженную микрооструктуренность. Отметим, что для смешанного образца закономерно ветви адсорбции и десорбции не так сильно расходятся, как для $A_{\text{пах}}$, составив в максимальном значении $0.5 \text{ м}^3/\text{г}$.

Кривые адсорбции и десорбции азота практически совпадают для торфа. При рассмотрении изображений поверхности, полученных методом СЭМ на больших увеличениях (рис. 4), видно, что образец торфа представляет собой единую, хотя и неровную поверхность, покрытую пленкой предположительно органического происхождения, на что указывает ее свечение при съемке. Таким образом, близкое расположение кривых сорбции и десорбции азота в торфяном субстрате обусловлено в целом весьма низким значением площади поверхности торфа за счет слоя органического вещества, драпирующего поверхность частиц собственно торфа. Частицы песка не обладают выраженной микрооструктуренностью и микропористостью, что видно на снимках поверхности как на малых, так и на больших увеличениях. Это отражается на форме и размере петли гистерезиса: кривые адсорбции и десорбции азота имеют лишь небольшие расхождения в интервале p/p_0 от 0.4 до 0.98.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования показали наличие прямой взаимосвязи содержания углерода и полной удельной поверхности по воде и обратной взаимосвязи содержания углерода и удельной поверхности по азоту. Увеличение гистерезиса кривых сорбции по азоту характеризует более выраженную микрооструктуренность субстратов. Наибольшая микрооструктуренность вызывает расхождение кривых адсорбции и десорбции азота в диапазоне p/p_0 от 0.4 до 1.

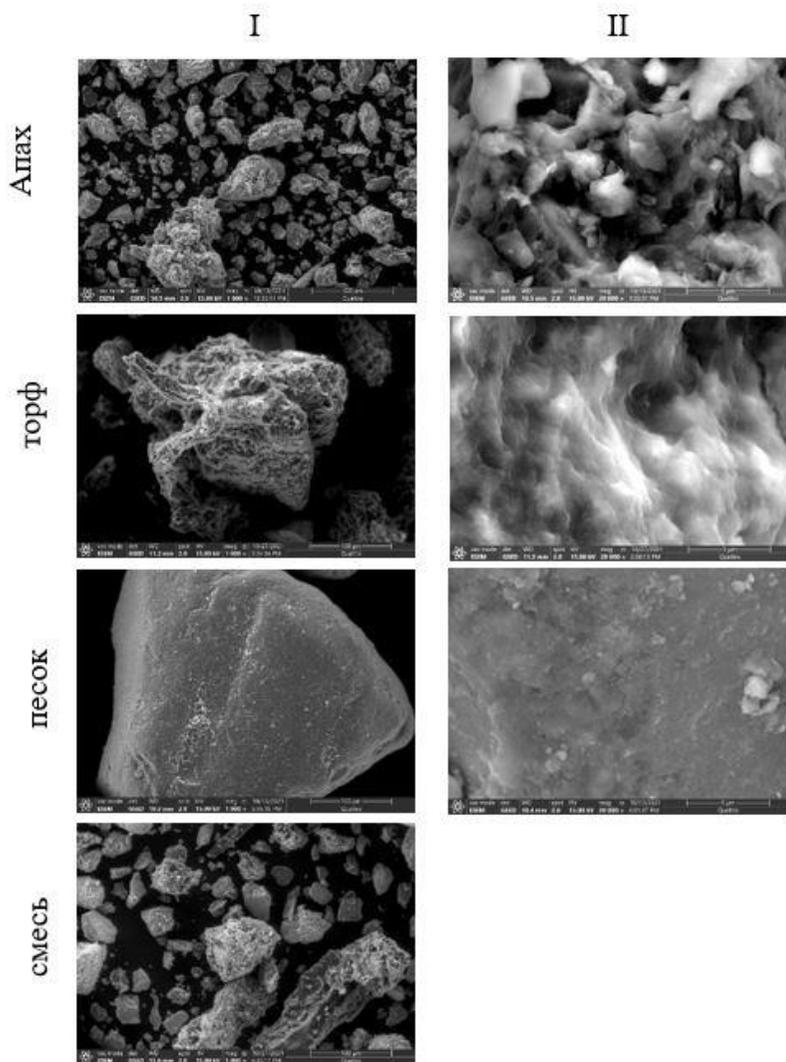


Рис. 4. Микростроение субстратов разного генезиса при увеличениях: I – 1 000×, II – 20 000×.

Fig. 4. Microstructure of substrates of different genesis at magnification: I – 1 000×, II – 20 000×.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витязев В.Г., Чижикова Н.П., Шевченко А.В.* Удельная поверхность и состав минералов илистых фракций подзолистых почв // Известия ТСХА. 1983. Вып. 3. С. 98–104.
2. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
3. *Воронин А.Д., Витязев В.Г.* К оценке величины внешней и внутренней удельных поверхностей твердой фазы почв по изотерме десорбции паров воды // Почвоведение. 1971. № 10. С. 50–57.
4. Руководство по эксплуатации программного обеспечения 3P meso 222. Анализатор удельной поверхности и пористости. Версия ПО 20.05.xx // 3P Instruments GmbH&Co. KG. 2021.
5. *Сапожников П.М.* Удельная поверхность почвы, ее изменение при почвообразовательных процессах и связь с физическими свойствами: Автореф. дис. ... к. с.-х. н. 06.01.03 – Агрофизика. М.: МГУ, 1982. 28 с.
6. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Назарова Т.В., Кирюшова А.Б., Машика А.В., Еремينا А.М.* Влияние органического вещества на водоудерживающую способность почв // Почвоведение. 2004. № 3. С. 312–321.
7. *Солопов С.Г.* Влияние дисперсности на структуру и физико-механические свойства торфа в связи с задачей получения качественного кускового топлива из залежей с пониженной влажностью // Труды Инсторфа. 2010. № 1(54). С. 55–77.
8. *Сусленкова М.М., Умарова А.Б., Бутылкина М.А.* Микроструктура почв разного генезиса и ее трансформация в составе конструкторземов в условиях г. Москвы // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1265–1273. DOI: [10.1134/S1064229318100125](https://doi.org/10.1134/S1064229318100125).
9. Теории и методы физики почв / под ред. *Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского*. М., Тула: Гриф и К, 2007. 616 с.
10. *Умарова А.Б., Сусленкова М.М., Бутылкина М.А., Салимгареева О.А., Кокорева А.А., Ежелев З.С., Гасина А.И.* Гидросорбционные и микроструктурные характеристики почвенных субстратов разного генезиса и их изменение в составе конструкторземов // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1346–1355. DOI: [10.1134/S0032180X19110121](https://doi.org/10.1134/S0032180X19110121).
11. *Шейн Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
12. *Харитоновна Г.В., Манучаров А.С., Смагин А.В., Витязев В.Г., Дембовецкий А.В.* Адсорбция паров воды почвами и почвенными агрегатами. Тула: Гриф и К, 2009. 100 с.

13. *Aharoni C.* Interaction between adsorption and condensation processes in a pore and its effect on hysteresis // *Chemical Engineering Communications*. 2002. Vol. 184(4). P. 429–435.
14. *Ben-Dor E., Banin A.* Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties // *Soil Science Society of America Journal*. 1995. No. 59. P. 364–372.
15. *Ersahin S., Gunal H., Kutlu T., Yetgin B., Coban.* Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution // *Geoderma*. 2006. Vol. 136. P. 588–597.
16. *Farrar D.M.* The use of vapor-pressure and moisture-content measurements to deduce the internal and external surface area of soil particles // *J. Soil. Sci.* 1963. Vol. 14. No. 2. P. 33–321.
17. *Giesche H., Unger K., Muller U., Esser U.* Hysteresis in nitrogen sorption and mercury porosimetry on mesoporous model adsorbents made of aggregated monodisperse silica spheres // *Colloids and Surfaces*. 1989. Vol. 37. P. 93–113.
18. *Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Umarova A.B. et al.* Yeast complexes in urban soils of some southern cities of Russia (Krasnodar, Maykop, Simferopol and Sochi) // *Microbiology*. 2020. Vol. 89. No. 5. P. 603–608.
19. *Heister K.* The measurement of the specific surface area of soils by gas and polar liquid adsorption methods – Limitations and potentials // *Geoderma*. 2014. Vol. 216. P. 75–87. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.015).
20. *Hepper E.N., Buschiazzo D.E., Hevia G.G., Urioste A., Anton L.* Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents // *Geoderma*. 2006. Vol. 135. P. 216–223.
21. *Jahanban L., Ebrahimi E., Moradi S., Fallah M., Geiratie Arani L., Mohajer R.* Estimation of soil specific surface area using some mechanical properties of soil by artificial neural networks // *Environ Monit Assess*. 2018. Vol. 190. P. 614. DOI: [10.1007/s10661-018-6980-0](https://doi.org/10.1007/s10661-018-6980-0).
22. *de Jong E.* Comparison of three methods of measuring surface area of soils // *Canadian Journal of Soil Science*. 1999. Vol. 79. P. 345–351. DOI: [10.4141/S98-069](https://doi.org/10.4141/S98-069).
23. *Jozefaciuk G.* Surface properties and related phenomena in soils and plants // *Encyclopedia of agrophysics*. Springer, 2011. P. 877–886.
24. *Niskansen R., Mantylahti V.* Determination of soil specific surface area by water vapor adsorption III Comparison of surface areas determined by water vapor and nitrogen gas adsorption // *J. of Agricultural Science in Finland*. 1988. Vol. 60. P. 73–79.
25. *Petersen L.W., Moldrup P., Jacobsen O.H., Rolston D.E.* Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties // *Soil Science*. 1996. No. 161. P. 9–21. DOI: [10.1097/00010694-199601000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-199601000-00003).

26. Puckett W.E., Dane J.H., Hajek B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties // Soil Science Society of America Journal. 1985. No. 49. P. 831–836.
27. Ratner-Zohar Y., Banin A., Chen Y. Oven drying as pretreatment for surface-area determination of soils and clays // Soil Science Society of America Journal. 1983. No. 47. P. 1056–1058.
28. Rudzinski W., Everett D.H. Adsorption of gases on heterogeneous surfaces. London: Academic, 1992. Chapters 5–10.
29. Simsek U., Mikailsoy F., Erdel E. et al. Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey calcic pantofluvic fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey) // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 296–299.
30. Totsche K.U., Rennert T., Gerzabek M.H., Kogel-Knabner I., Smalla K., Spiteller M., Vogel H.-J. Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2010. Vol. 173. P. 88–99.
31. Yu D., Zha Y., Shi L. et al. Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2020. No. 35(3). P. 737–757. DOI: [10.1007/s00477-020-01882-1](https://doi.org/10.1007/s00477-020-01882-1).

REFERENCES

1. Vityazev V.G., Chizhikova N.P., Shevchenko A.V., Udel'naya poverkhnost' i sostav mineralov ilistykh fraktsii podzolistykh pochv (Specific surface area and mineral composition of silty fractions of podzolic soils), *Izvestiya TSKhA*, No. 3, 1983, pp. 98–104.
2. Voronin A.D., *Strukturno-funktional'naja gidrofizika pochv* (Structural and functional soil hydrophysics), Moscow: MGU, 1984, 204 p.
3. Voronin A.D., Vityazev V.G., K otsenke velichiny vneshnei i vnutrennei udel'nykh poverkhnostei tverdoi fazy pochv po izoterme desorbtsii parov vody (To estimate the magnitude of the external and internal specific surfaces of the solid phase of soils by the isotherm of water vapor desorption), *Pochvovedenie*, 1971, No. 10, pp. 50–57.
4. Rukovodstvo po ekspluatatsii programmnoogo obspecheniya 3P meso 222. Analizator udel'noi poverkhnosti i poristosti. Versiya PO 20.05.xx (Operating instructions for the 3P meso 222 software. Specific surface area and porosity analyzer. Software version 20.05.xx), 3P Instruments, GmbH&Co, KG, 2021.
5. Sapozhnikov P.M., *Udel'naya poverkhnost' pochvy, ee izmenenie pri pochvoobrazovatel'nykh protsessakh i svyaz' s fizicheskimi svoystvami: Avtoref. dis. ... k. s.-kh. n.* (The specific surface area of the soil, its change

during soil formation processes and the relationship with physical properties, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, MGU, 1982, 28 p.

6. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nazarova T.V., Kiryushova A.B., Mashika A.V., Eremina A.M., Vliyanie organicheskogo veshchestva na vodouderzhivayushchuyu sposobnost' pochv (The effect of organic matter on the water-holding capacity of soils), *Pochvovedenie*, 2004, No. 3, pp. 312–321.

7. Solopov S.G., Vliyanie dispersnosti na strukturu i fiziko-mekhanicheskie svoystva torfa v svyazi s zadachei polucheniya kachestvennogo kuskovogo topliva iz zalezhei s ponizhennoi vlazhnost'yu (The effect of dispersion on the structure and physico-mechanical properties of peat in connection with the task of obtaining high-quality lump fuel from deposits with low humidity), *Trudy Instorfa*, 2010, No. 1(54), pp. 55–77.

8. Suslenkova M.M., Umarova A.B., Butylkina M.A., Microstructure of soils of different genesis and its transformation in the composition of structural soils in the conditions of Moscow, *Pochvovedenie*, 2018, No. 10, pp. 1265–1273, DOI: [10.1134/S1064229318100125](https://doi.org/10.1134/S1064229318100125).

9. Shein E.V., Karpachevskiy L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow, Tula: Grif i K, 2007, 616 p.

10. Umarova A.B., Suslenkova M.M., Butylkina M.A., Salimgareeva O.A., Kokoreva A.A., Ezhelev Z.S., Gasina A.I., Gidrosorbtsionnye i mikrostrukturnye kharakteristiki pochvennykh substratov raznogo genezisa i ikh izmenenie v sostave konstruktozemov (Hydrosorption and microstructural characteristics of soil substrates of different genesis and their changes in the composition of structural soils), *Pochvovedenie*, 2019, No. 11, pp. 1346–1355, DOI: [10.1134/S0032180Kh19110121](https://doi.org/10.1134/S0032180Kh19110121).

11. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil Physics Course), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 432 p.

12. Kharitonova G.V., Manucharov A.S., Smagin A.V., Vityazev V.G., Dembovetskii A.V., *Adsorbtsiya parov vody pochvami i pochvennymi agregatami* (Adsorption of water vapor by soils and soil aggregates), Tula: Grif i K, 2009, 100 p.

13. Aharoni C., Interaction between adsorption and condensation processes in a pore and its effect on hysteresis, *Chemical Engineering Communications*, 2002, Vol. 184(4), pp. 429–435.

14. Ben-Dor E., Banin A., Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties, *Soil Science Society of America Journal*, 1995, No. 59, pp. 364–372.

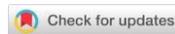
15. Ersahin S., Gunal H., Kutlu T., Yetgin B., Coban, Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution, *Geoderma*, 2006, No. 136, pp. 588–597.

16. Farrar D.M., The use of vapor-pressure and moisture-content measurements to deduce the internal and external surface area of soil particles, *J. Soil. Sci.*, 1963, Vol. 14, No. 2, pp. 33–321.
17. Giesche H., Unger K., Muller U., Esser U., Hysteresis in nitrogen sorption and mercury porosimetry on mesoporous model adsorbents made of aggregated monodisperse silica spheres, *Colloids and Surfaces*, 1989, Vol. 37, pp. 93–113.
18. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Umarova A.B. et al., Yeast complexes in urban soils of some southern cities of Russia (Krasnodar, Maykop, Simferopol and Sochi), *Microbiology*, 2020, Vol. 89, No. 5, pp. 603–608.
19. Heister K., The measurement of the specific surface area of soils by gas and polar liquid adsorption methods – Limitations and potentials, *Geoderma*, 2014, No. 216, pp. 75–87, DOI: [10/1016/j.geoderma.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.015).
20. Hepper E.N., Buschiazzo D.E., Hevia G.G., Urioste A., Anton L., Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents, *Geoderma*, 2006, No. 135, pp. 216–223.
21. Jahanban L., Ebrahimi E., Moradi S., Fallah M., Geiratie Arani L., Mohajer R., Estimation of soil specific surface area using some mechanical properties of soil by artificial neural networks, *Environ. Monit Assess*, 2018, No. 190, pp. 614, DOI: [10.1007/s10661-018-6980-0](https://doi.org/10.1007/s10661-018-6980-0).
22. de Jong E., Comparison of three methods of measuring surface area of soils, *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, Vol. 79, pp. 345–351, DOI: [10.4141/S98-069](https://doi.org/10.4141/S98-069).
23. Jozefaciuk G., Surface properties and related phenomena in soils and plants, *Encyclopedia of agrophysics*, Springer, 2011, pp. 877–886.
24. Niskansen R., Mantylahti V., Determination of soil specific surface area by water vapor adsorption III Comparison of surface areas determined by water vapor and nitrogen gas adsorption, *J. of Agricultural Science in Finland*, 1988, Vol. 60, pp. 73–79.
25. Petersen L.W., Moldrup P., Jacobsen O.H., Rolston D.E., Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties, *Soil Science*, 1996, No. 161, pp. 9–21, DOI: [10.1097/00010694-199601000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-199601000-00003).
26. Puckett W.E., Dane J.H., Hajek B.F., Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties, *Soil Science Society of America Journal*, 1985, No. 49, pp. 831–836.
27. Ratner-Zohar Y., Banin A., Chen Y., Oven drying as pretreatment for surface-area determination of soils and clays. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, No 47, pp.1056–1058.
28. Rudzinski W., Everett D.H., *Adsorption of gases on heterogeneous surfaces*, London: Academic, 1992, Chapters 5–10.

29. Simsek U., Mikailsoy F., Erdel E. et al., Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey calcic pantofluvic fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 296–299.
30. Totsche K.U., Rennert T., Gerzabek M.H., Kogel-Knabner I., Smalla K., Spiteller M., Vogel H.-J., Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2010, No. 173, pp. 88–99.
31. Yu D., Zha Y., Shi L. et al., Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, No. 35(3), pp. 737–757, DOI: [10.1007/s00477-020-01882-1](https://doi.org/10.1007/s00477-020-01882-1).

УДК 631.471; 631.45

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-188-230



Ссылки для цитирования:

Аветов Н.А., Коптелов А.Г., Лозбенев Н.И., Соловьев Д.А., Шишконокова Е.А. Эколого-хозяйственная оценка состояния кормовых угодий бореальных речных пойм в нефтедобывающем регионе (на примере поймы реки Колвы, Усинский район, Республика Коми) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 188-230. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-188-230

Cite this article as:

Avetov N.A., Koptelov A.G., Lozbenev N.I., Solovyov D.A., Shishkonakova E.A., Ecological and agricultural assessment of the state of forage lands of boreal river floodplains in the oil-producing region (case study in the floodplain of the Kolva River, Usinsky district, Komi Republic), Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 188-230, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-188-230

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке ООО “ЛУКОЙЛ-Коми” (с 01.12.2023 – ООО “ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ”), а также в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 121040800147-0 и темы ФГБНУ ФИЦ “Почвенного института им. В.В. Докучаева” № 0439-2022-0011.

Acknowledgments:

The research was carried out with financial support of ООО “LUKOIL-Komi” (from 01.12.2023 – ООО LUKOIL-PERM), and within the framework of State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 121040800147-0 and the theme of Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute” No. 0439-2022-0011.

Эколого-хозяйственная оценка состояния кормовых угодий бореальных речных пойм в нефтедобывающем регионе (на примере поймы реки Колвы, Усинский район, Республика Коми)

© 2024 г. Н. А. Аветов^{1*}, А. Г. Коптелов², Н. И. Лозбенев^{3**},
Д. А. Соловьев^{3***}, Е. А. Шишконокова^{3****}

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

*<https://orcid.org/0000-0003-2679-5166>, e-mail: awetowna@mail.ru.

²ООО “ЛУКОЙЛ-Коми”

(с 01.12.2023 – ООО “ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ”), Россия,
169712, Усинск, ул. Нефтяников, 31.

³ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

**<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: nlozbenev@mail.ru,

***<https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>, e-mail: solovev@esoil.ru,

****<https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>,

e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru.

Поступила в редакцию 17.06.2023, после доработки 05.07.2023,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Пойменные кормовые угодья Печорского бассейна (Усинский район республики Коми) испытывают комплексное антропогенное воздействие, связанное как с сельскохозяйственной активностью, так и с загрязнением нефтепродуктами, поступающими вместе с паводковыми водами. Проведена эколого-хозяйственная оценка почвенно-растительного покрова поймы Колвы, используемой в качестве сенокоса (правобережная часть) и пастбища (левобережная часть). Почвенные комбинации основной части обследованной поймы включают аллювиальные дерновые, дерново-луговые и луговые почвы. Морфологические признаки глееобразования в луговых почвах наблюдаются в нижней части почвенного профиля и отличаются умеренной выраженностью. Почвы в основном характеризуются благоприятными агрохимическими и морфологическими свойствами за исключением участков, подверженных пастбищной дигрессии. Растительный покров центрально-приусловой части пойменного массива правого берега представлен в основном бобово-злаково-разнотравными сообществами, формирующимися как в межгрядных понижениях, так и на плоских гривах. На высокой пойме левого берега распространены бобово-злаково-разнотравные луга, разнотравно-клеверные и щучковые луга, в приусловой части левобережья – хвощево-белокопытневые, клеверно-злаковые и злаковые сообщества. Несмотря на сравнительно высокие показатели продуктивности и присутствие ценных в кормовом отношении видов злаков и бобовых, качественные характеристики сена, получаемого из трав сенокоса, отклоняются от оптимальных из-за участия в травостоях малопитательных, малопривлекательных, сорных и ядовитых видов. На

пастбище в результате пастбищной дигрессии происходит снижение видового разнообразия при доминировании щучки дернистой и малочисленных видов разнотравья. В наиболее нарушенных местах общее проективное покрытие растительностью снижается до 50%. Почвенный покров территории поймы Колвы в настоящее время не загрязнен углеводородами, за исключением нескольких пятен нефтепродуктов общей площадью 6 м². Влияние нефтезагрязнения на растительный покров поймы Колвы не проявляется. Фоновые значения содержания нефтепродуктов в почвах несколько выше в левобережной части по сравнению с таковыми в правобережной.

Ключевые слова: пастбищная дигрессия; нефтезагрязнение почв; аллювиальные почвы; растительность поймы; картография почв и растительности.

Ecological and agricultural assessment of the state of forage lands of boreal river floodplains in the oil-producing region (case study in the floodplain of the Kolva River, Usinsky district, Komi Republic)

© 2024 N. A. Avetov^{1*}, A. G. Koptelov², N. I. Lozbenev^{3**},
D. A. Solovyov^{3***}, E. A. Shishkonakova^{3****}

¹*Lomonosov Moscow State University,*

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0003-2679-5166>, e-mail: awetowna@mail.ru.*

²*LUKOIL-Komi (from 01.12.2023 – LUKOIL-PERM),*

31 Neftyanikov Str., Usinsk 169712, Russian Federation.

³*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,*

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

***<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: nlozbenev@mail.ru,*

****<https://orcid.org/0009-0004-3590-754X>, e-mail: solovev@esoil.ru,*

*****<https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>,*

e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru.

Received 17.06.2023, Revised 05.07.2023, Accepted 07.02.2024

Abstract: Floodplain forage lands of the Pechora basin (Usinsky district of the Komi Republic) are experiencing a complex anthropogenic impact associated with both agricultural activity and pollution with petroleum products coming with flood waters. An ecological and agricultural assessment of the soil-vegetation cover of the Kolva floodplain used as hayfield (right-bank part) and

pasture (left-bank part) was carried out. Soil combinations of the main part of the surveyed floodplain include alluvial sod, sod-meadow and meadow soils. Morphological signs of gley formation in meadow soils are observed in the lower part of the soil profile and are expressed moderately. Soils are characterized generally by favorable agrochemical and morphological properties, with the exception of areas subjected to pasture digression. The vegetation cover of the central and near-river part of the floodplain massif of the right bank is mainly represented by legume-cereal-grass communities formed both in inter-ridge depressions and on flat ridges. On the high floodplain of the left bank, legume-cereal-grass meadows, grass-clover and tufted hairgrass meadows are common, horsetail–butterbur, clover-cereal and cereal communities are common in the near-river part of the left bank. Despite the relatively high productivity and the presence of valuable forage species of cereals and legumes, the qualitative characteristics of hay deviate from optimal ones due to the participation of low-nutritious, unattractive, weedy and poisonous species in the herbage. On the pasture, as a result of pasture digression, there is a decrease in species diversity with the dominance of tufted hairgrass and low-value species of various grasses. In the most disturbed areas, the total projective vegetation coverage is reduced to 50%. The soil cover of the studied territory of the Kolva floodplain is currently not contaminated with hydrocarbons, with the exception of a few spots of petroleum products with a total area of 6 m². The effect of oil pollution on the vegetation cover of the Kolva floodplain is not manifested. Background values of the content of petroleum products in soils are slightly higher in the left-bank part compared to the right-bank part.

Keywords: pasture digression; oil pollution of soil; alluvial soils; floodplain vegetation; soil and vegetation mapping.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях промышленного освоения Севера поймы рек оказываются одними из самых уязвимых для техногенного воздействия ландшафтов (Тишков, 1996). Особое значение при этом на Европейском Севере приобретает влияние нефтедобывающей промышленности, развитие которой в 1970–1980-е годы совпало по времени с интенсификацией сельского хозяйства в Нечерноземной зоне. В частности, в рамках создания кормовой базы животноводства на севере таежной зоны большое внимание в этот период уделялось использованию пойменных сенокосов и пастбищ, в том числе и пойменных лугов Печорского бассейна, кото-

рые, несмотря на довольно ограниченные площади, представляют собой ценные сельскохозяйственные земли с наиболее продуктивными и плодородными почвами в республике Коми (Лаптева и др., 2008). Однако царившие в последние годы советской власти (эпоха позднего “застоя” и “перестройки”) бесхозяйственность и пренебрежение вопросами экологической безопасности привели к ряду серьезных аварий на предприятиях нефтедобывающего комплекса, сопровождающихся разливами нефти и последующим ее попаданием в русла рек. Одно из наиболее резонансных событий катастрофического масштаба произошло в августе 1994 г. на Возейском месторождении Коминефти, в результате которого в русло Колвы, а в последующем и в экосистемы пойм рек Печорского бассейна (Колва, Уса, Печора), поступили рекордные количества сырой нефти, составляющие по разным оценкам от 100 до 300 тысяч тонн.

Дальнейшее сосуществование в бассейне Печоры продуктивных пойменных кормовых угодий и нефтедобывающих предприятий, несмотря на предпринимаемые меры по предотвращению аварийных разливов и попадания нефти в русла рек, обуславливает необходимость разработки мероприятий по контролю над состоянием почвенно-растительного покрова пойм, прежде всего в локациях, наиболее близких к действующим месторождениям и нефтепроводам. Необходимо одновременно подчеркнуть, что использование пойменных земель в сельскохозяйственных целях само по себе также несет определенные риски их деградации, которые требуют проведения соответствующих эколого-хозяйственных оценок. Уже в 1970–1980-е годы были установлены многие негативные тенденции в землепользовании на пойменных лугах Севера, среди которых необходимо отметить: отсутствие в течение многих лет поверхностного улучшения лугов (Рочев, 1981), доминирование щучки дернистой (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.) и в целом интенсивная синатропизация растительности лугов вследствие высокой сельскохозяйственной активности (Мартыненко, 1989), внедрение злостных сорняков, в первую очередь, лютиков и чемерицы Лобеля (*Veratrum lobelianum* Bernh.) (Опарина и др., 1987), бессменный выпас скота без организации загонной пастбы и пастбищеоборота (Пуртов,

1987), закороченность, вытаптывание, перетравливание пастбищ (Ларин и др., 1975), беспорядочная езда транспорта (Шилов, 1986), прогрессирующее зарастание лугов кустарниками и лесом (Конюшков, Якушев, 1974). Следует, однако, отметить, что при разработке обобщенных подходов к оценке деградации почв и земель в России основное внимание в последние десятилетия уделялось зональным пахотным почвам (Карманов и др., 2013; Молчанов и др., 2015; Krasilnikov et al., 2016), в то время как пойменные земли в этом отношении практически выпали из рассмотрения.

Проводимые в XXI в. исследования пойменных земель лесной зоны в России и за рубежом касаются главным образом оценки трансформации их отдельных свойств. Так, была выявлена деградация физического состояния аллювиальных почв бассейна Оки при использовании их под пашню и пастбище (Уткаева и др., 2009; Зайдельман и др., 2013), показаны изменения микробиологических характеристик аллювиальных почв при различных видах землепользования в пойме Северной Двины (Кутузова и др., 2009), установлены особенности распределения полициклических ароматических углеводородов в почвах пойм Саара и Мозеля (Германия) в результате атмосферного загрязнения и воздействия угледобычи (Pies et al., 2007). В последнее время определенное внимание уделяется вопросам влияния аллювиальных почв разных угодий на уровень эмиссии парниковых газов (Moore et al., 2018; Ansari et al., 2023).

Для проведения экологической оценки нефтезагрязненных земель таежной зоны (в том числе и пойменных) с целью их последующей рекультивации ранее были разработаны рекомендации применительно к территории Среднего Приобья в границах ХМАО-Югры (Аветов и др., 2012). Они предусматривали оценку состояния почв, растительности, гидрологии, характера проявления нефтезагрязнения и других видов нарушений на подлежащих рекультивации участках. Однако характер нефтезагрязнения в западносибирских поймах, по нашим наблюдениям, принципиально иной, чем на Печорском Севере: нефть поступает в поймы непосредственно в результате локальных разливов из проходящих по ней нефтепроводов и загрязняет при этом господствующие здесь аллювиальные болотные иловато-торфяно-глеевые почвы, почти

не используемые в сельском хозяйстве.

Вместе с тем научно-технологический прогресс обусловил активное развитие подходов к картографированию и оценке состояния земель с использованием цифровых технологий пространственного анализа. Разновременные данные дистанционного зондирования способствуют более быстрому и качественному определению как границ природных комплексов (Книжников и др., 2004; Савин и др., 2019), так и их состояния вследствие техногенного воздействия (Wang et.al., 2023) на локальном (Бузмаков и др., 2023; Al-Shammary et.al., 2018) и региональном уровнях (Московченко, 2020; Орлов, 2006; Воробьев, Очирова, 2018). В меньшей степени они применяются для оценки состояния пойменных ландшафтов, подверженных антропогенному воздействию и деградации.

Основной целью данной работы мы поставили комплексную оценку состояния почвенно-растительного покрова пойменных кормовых угодий Печорского Севера (на примере поймы реки Колвы) с точки зрения как экологических, так и хозяйственных критериев, позволяющих выявить не только экологическое состояние, но и эффективность освоения пойменных земель в качестве сенокосов и пастбищ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований были выбраны кормовые угодья поймы реки Колвы. Река Колва является правым притоком второго порядка р. Печоры. Колва, так же как и р. Уса, в которую впадает, протекает с севера на юг. Обследованные участки расположены в окрестностях села Колва в муниципальном округе Усинск республики Коми (рис. 1) и охватывают как левобережную, так и правобережную ее части общей площадью 483 га. Пойма правого берега используется в качестве сенокоса, на левобережном участке организовано пастбище крупного рогатого скота.

В 2022 г. в соответствии с целями работы были исследованы почвы и растительность поймы, при этом повышенное внимание уделялось ее частям, потенциально наиболее подверженным нефтезагрязнению – приустьевой зоне и примыкающим к ней секторам центральной поймы. Участки поймы также посещались и

были осмотрены одним из авторов в 1997 г.

Для проведения комплексной эколого-хозяйственной оценки было осуществлено почвенное и геоботаническое картографирование поймы, составлена карта нарушенности поймы, выполнены морфологические описания 42 почвенных разрезов (Розанов, 2004), проведено 47 геоботанических описаний (Полевая геоботаника, 1964), 14 разрезов достигали глубины 100 см и более (до 146 см), 28 разрезов – 50–100 см. На лугах сенокосных угодий отбирались укосы трав, которые разбирались на группы по хозяйственной ценности (бобовые – злаки – разнотравье – осоки) для определения продуктивности лугов в зеленой и воздушно-сухой массе.

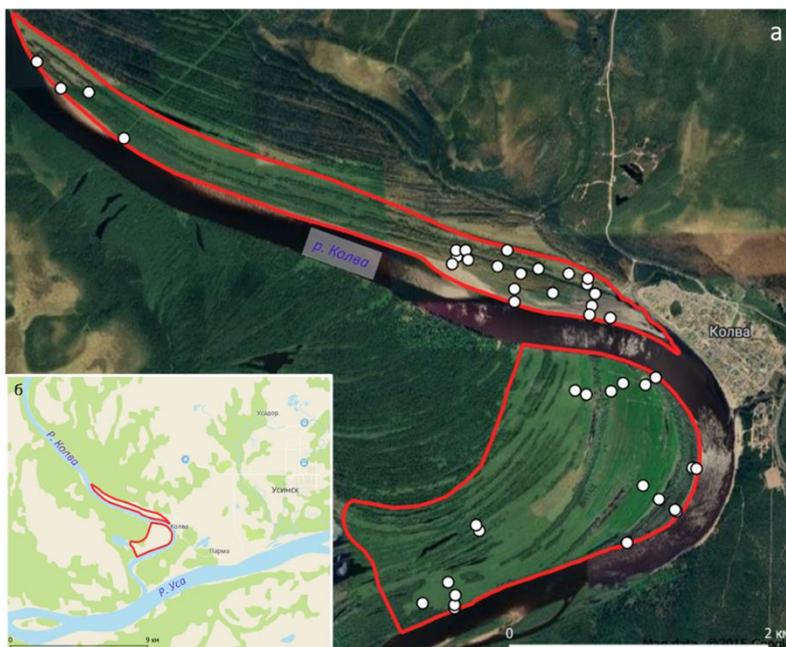


Рис. 1. Ключевой участок с точками полевых описаний (а) и его положение относительно значимых объектов (б).

Fig. 1. The study area with points of field landscape descriptions (а) and its position relative to significant objects (б).

Названия растений приводятся согласно сводке С.К. Черепанова (1995) и электронному ресурсу Плантариум.

Составление карт опиралось на общие принципы традиционной почвенной съемки (Евдокимова, 1987) и цифрового почвенно-ландшафтного картографирования (Сорокина, 2006). Для их составления использованы космические снимки разных лет с метровым разрешением, доступные в сервисе Google Earth, и результаты беспилотной съемки, проведенной в июле 2022 г. Все тематические карты подготовлены в открытой геоинформационной системе Quantum GIS.

Границы почвенных контуров и фитоценозов на снимках с БПЛА и разновременных космических снимках устанавливались по прямым и косвенным признакам: характеру фототона отражательной поверхности, теням, и ландшафтному рисунку (Дешифрирование..., 1982; Книжников и др., 2004). В пределах каждого контура были выполнены почвенные и геоботанические описания. Степень нарушенности по результатам съемки с БПЛА определялась по специфическому фототону и рисунку. Четко выявляются участки пойм, подверженные эрозии, однако обнаружение загрязненных нефтепродуктами площадей не представилось возможным из-за незначительности явления.

В качестве базовой классификации почв была выбрана классификация аллювиальных почв лесной зоны академика Г.В. Добровольского (1968, 1991), которая в ее наиболее полной версии применялась также в Атласе почв Республики Коми (2010).

Химико-аналитические исследования поверхностных почвенных проб (в слое 0–20 см) включали количественные определения содержания нефтепродуктов (флуометрическим методом на анализаторе жидкости “Флюорат-02”), органического вещества почвы, подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Кроме того, был определен показатель pH в солевой вытяжке по методу ЦИНАО.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическая характеристика аллювиальных почв

Сингенетический характер почвообразования в значительной мере обуславливает основные морфологические черты аллю-

виальных почв в пойме Колвы. Выступая конкурентом гумусонакопления в поверхностном слое почвы, регулярная седиментация пойменного аллювия приводит одновременно как к росту мощности гумусового горизонта, так и ограничению его гумусированности. По этой причине гумусовый горизонт слабо выражен в почвенном профиле по окраске и структуре и в большинстве случаев представлен переходным горизонтом АС. В свою очередь, мощность АС (Ад + АС под луговыми сообществами) варьирует в широких пределах. В дерновых почвах (11 профилей) она изменяется от 6 до 30 см при Ме 10 см, в дерново-луговых (8 профилей) – от 5 до 43 см при Ме 12.5, луговых (9 профилей) – от 5 до 37 см при Ме 18 см. На рисунках 2, 3, 4, 5 представлены фотографии разрезов аллювиальных дерновых, дерново-луговых, луговых и слабо-развитых почв и мест их заложения. Структура горизонтов АС имеет определенное сходство для всех подтипов почв и в большинстве случаев определяется как порошисто-мелкоореховатая, порошисто-комковатая, мелкоореховато-комковатая, комковатая. Качество структуры как правило слабое. Иногда нижняя часть горизонта имеет комковато-глыбистую структуру (разрез 21). Примерно в половине случаев в горизонте АС обнаруживается выраженная слоистость сложения. Окраска горизонта, вероятно, мало связана с содержанием гумуса и в значительно большей мере обуславливается исходными параметрами пойменного аллювия, в первую очередь его гранулометрическим составом: желто-бурые оттенки свойственны песчано-супесчаному материалу, серо-бурые – суглинистому. В ряде случаев на окраску оказывает влияние ожелезнение и слабое поверхностное оглеение, встречающееся у всех подтипов аллювиальных почв и проявляющееся в виде бурых и охристо-бурых пятен на сером или буро-сером фоне.

Ниже горизонта АС залегают толщи слоистого практически бесструктурного пойменного аллювия. Диагностическое значение для аллювиальных почв в нижней части профиля имеет грунтовое оглеение, признаки которого присущи луговым и дерново-луговым подтипам.

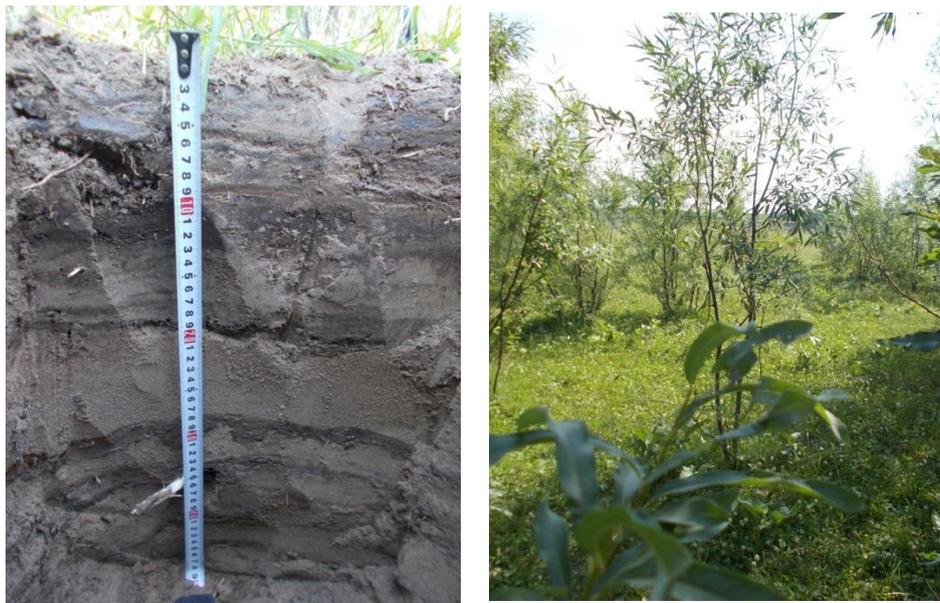


Рис. 2. Разрез аллювиальной дерновой среднесуглинистой почвы (разрез 24) и место заложения. Левый берег р. Колвы, пастбище. Центральная пойма, выровненный участок. Ивняк разнотравно-злаково-клеверный. Координаты: 65°58'11" N; 57°19'32" E.

Fig. 2. Soil pit of alluvial sod loamy soil (soil pit No. 24) and the site picture. Left bank of the Kolva River, pasture. Central floodplain, levelled area. Willow, various grasses, cereals, clover. Coordinates: 65°58'11" N; 57°19'32" E.



Рис. 3. Разрез аллювиальной дерново-луговой среднесуглинистой почвы (разрез 25) и место заложения. Левый берег р. Колвы, пастбище. Центральная равнинная часть поймы. Ивняк разнотравно-злаково-клеверный. Координаты: 65°58'10" N; 57°19'56" E.

Fig. 3. Soil pit of alluvial sod-meadow loamy soil (soil pit No. 25) and the site picture. Left bank of the Kolva River, pasture. Central part of the floodplain. Willow, various grasses, cereals, clover. Coordinates: 65°58'10" N; 57°19'56" E.



Рис. 4. Разрез аллювиальной луговой почвы (разрез 1) и место заложения. Правый берег р. Колвы, сенокос. Центральная сегментно-гривистая пойма, межгривное понижение. Разнотравно-злаковый луг. Координаты: 65°57'46" N; 57°20'10" E.

Fig. 4. Soil pit of alluvial meadow soil (soil pit No. 1) and the site picture. Right bank of the Kolva River, hayfield. Central floodplain with segmental ridges, depression between ridges. Meadow with various grasses and cereals. Coordinates: 65°57'46" N; 57°20'10" E.



Рис. 5. Разрез аллювиальной слабообразованной супесчаной почвы (разрез 15) и место заложения. Правый берег р. Колвы, прирусловой вал, склон к Колве. Ивняк вейниково-разнотравный. Координаты: 65°56'53" N; 57°18'56" E.

Fig. 5. Soil pit of alluvial underdeveloped sandy loam soil (soil pit No. 15) and the site picture. Right bank of the Kolva River, levee ridge, slope to the Kolva River. Willow reedgrass, various grasses. Coordinates: 65°56'53" N; 57°18'56" E.

У лугового подтипа оглеенные горизонты залегают в пределах метрового слоя, в то время как у дерново-лугового проявление слабого оглеения или ожелезнения приурочено к нижней части профиля (от 80 см и ниже). Ни у дерновых, ни у луговых почв не был вскрыт уровень почвенно-грунтовых вод.

Аллювиальные слаборазвитые почвы (предпочвенные образования в трактовке Т.В. Афанасьевой (1986)) в пойме Колвы почти лишены морфологических признаков почвообразования.

Тем не менее, эти почвы отличаются весьма высоким плодородием, выражающимся в развитии на приустьевом валу густых ивняковых зарослей с мощным травостоем и, соответственно, значительным проникновением корневых систем в верхние слои почвы.

Аллювиальные болотные иловато-глеевые почвы отличаются от луговых сильно выраженным с поверхности глееобразованием и присутствием почвенно-грунтовых вод в верхней части профиля.

Состояние почвенного покрова пойменных кормовых угодий

Строение (структура) почвенного покрова исследованных участков определяется в первую очередь характерной геоморфологией массивов поймы сегментно-гривистого типа (Аветов, Балабко, 1992, 1994). Полностью сформированный массив сегментного типа выделяется в правобережной части поймы Колвы (южный участок, см. карты), в то время как левобережный – северный – участок представляет собой массив в начальной стадии образования, к которому со стороны надпойменной террасы примыкает (и отделяется от него протокой) территория высокой поймы, очевидно, оставшаяся от прошлых фаз меандрирования русла Колвы. Эта высокая притеррасная пойма превышает в среднем на два метра участок молодой поймы.

К особенностям планово-высотных параметров рельефа сегментного пойменного массива следует отнести два обобщенных тренда: первый заключается в увеличении гипсометрических уровней и ширины грив вверх по течению потока, формирующего пойменный массив, второй – в постепенном росте гипсометриче-

ских уровней и размеров грив от тыловой части массива к прирусловой (Чернов, 1983). Составленная почвенная карта поймы Колвы показывает, что строение почвенного покрова полностью отвечает этим закономерностям в пространственном изменении рельефа внутри сегментного массива (рис. 6). К наиболее повышенной прирусловой части пойменного массива приурочены наименее гидроморфные почвенные комбинации (сочетания), состоящие из аллювиальных дерновых почв (Ад) на гривах и дерново-луговых (Адл) в межгривных понижениях.

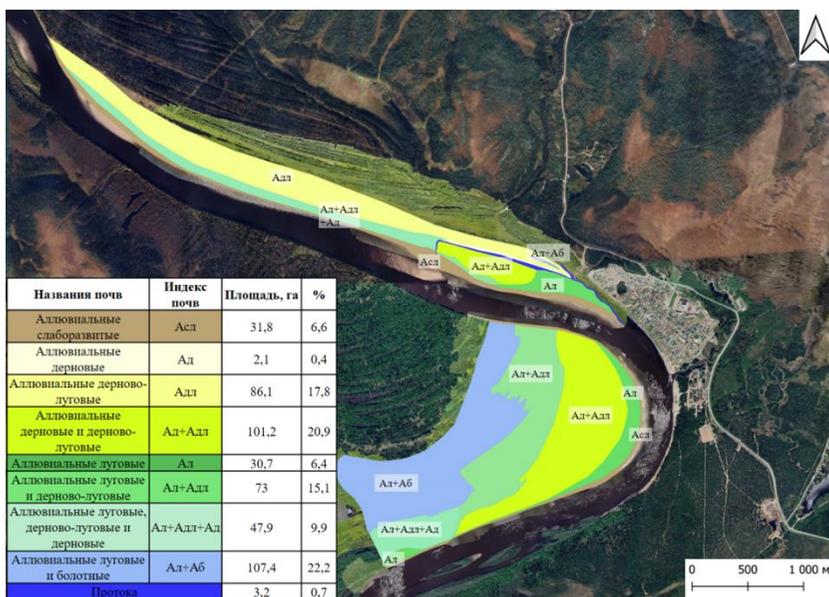


Рис. 6. Почвенная карта ключевого участка.
Fig. 6. Soil map of the study area.

Значительно более гидроморфным по своему составу является почвенный покров тыловой части массива, образованный сочетаниями луговых (Ал) и болотных иловато-глеевых почв (Аб). Промежуточный характер по степени гидроморфности носят почвенные комбинации центральной части сегментного массива; в нижнем по течению секторе, пространственно смещенном в сто-

рону прирусловой части, господствуют сочетания дерновых, луговых и дерново-луговых почв. Разновысотное положение отдельных участков или элементов рельефа поймы позволяет получать корма за счет повышенной продуктивности травостоев в засушливые годы на почвах понижений, а во влажные – на почвах, покрывающих повышения (Овчаренко, 1987). Аллювиальные слаборазвитые почвы (Асл) занимают прирусловой вал. Таким образом, согласно разработанной типологии пойменных земель (Аветов, Балабко, 1992), данный пойменный массив по составу почвенного покрова относится к среднегидроморфному типу с доминированием типа аллювиальных луговых почв, включающему подтипы собственно луговых и дерново-луговых почв.

По гранулометрическому составу дифференциация почвенного покрова пойменного сегментного массива соответствует хорошо известным представлениям о седиментогенезе в поймах (Шраг, 1969). Супесчано-песчаный состав свойственен верхним горизонтам почв прирусловой зоны. Небольшие по площади ареалы болотных почв, в свою очередь, имеют тяжелосуглинистый состав. На основной по площади части массива почвы относятся к легкосуглинистым и среднесуглинистым разновидностям.

Левый берег Колвы имеет более простую структуру почвенного покрова. К прирусловому формирующемуся пойменному массиву примыкает высокая пойма, превышающая его в среднем на два метра, на которой доминируют аллювиальные дерново-луговые почвы. Этот подтип почв считается наиболее продуктивным среди аллювиальных почв Печорского Севера, поскольку он обладает оптимальными водно-физическими свойствами (Лаптева и др., 2008). Небольшая гидроморфность, проявляющаяся в нижней части профилей дерново-луговых почв, вероятно, обусловлена гидрологической разгрузкой грунтовых вод с вышележащей по рельефу надпойменной террасы. В центральной части левобережной молодой поймы господствуют сочетания дерновых, дерново-луговых и луговых почв. К прирусловой полосе поймы приурочены аллювиальные слаборазвитые почвы.

Пространственная дифференциация почв по гранулометрическому составу на левобережном участке, как и в случае правобережной поймы, отвечает общепринятым представлениям: аллю-

виальные слаборазвитые почвы прирусловой зоны характеризуются песчаным составом, в то время как почвы центральной поймы – разнообразным составом в зависимости от локальных условий накопления пойменной фации аллювия. Разновидности почв центральной поймы, таким образом, варьируют от супесчаных до среднесуглинистых, причем дерново-луговые почвы высокой поймы обнаруживают тенденцию к облегчению гранулометрического состава за счет большого количества супесчаного материала в верхнем горизонте. Этим почвам присущ в основном супесчано-легкосуглинистый состав верхних горизонтов.

Аллювиальные почвы поймы Колвы в целом хорошо обеспечены элементами питания по существующим оценочным шкалам (Кауричев и др., 1986). По содержанию подвижного фосфора почвы в основном относятся к IV–V группам (высокообеспеченные) (табл. 1, 2). По-видимому, одним из факторов благоприятного режима фосфорного питания растений луговых сообществ выступает довольно невысокая гидроморфность почв, даже у наиболее “влажных” луговых почв ограниченная проявлением слабого оглеения в поверхностном метровом слое почвенного профиля. В противоположность этому, аллювиальные луговые почвы поймы Оби с морфологически сильно выраженным глеевым процессом в верхней части профиля крайне слабо обеспечены подвижными формами фосфора из-за образования нерастворимых фосфатов железа и алюминия (Аветов и др., 2008).

Содержанию доступного растениям калия присущи несколько иные закономерности распределения по территории поймы. С одной стороны, почвы поймы правого берега, занимающие сегментно-гривистый массив, хорошо обеспечены калием, соответствуя IV–VI группам обеспеченности. С другой стороны, почвы поймы левого берега имеют весьма контрастный характер содержания калия: средняя и высокая обеспеченности свойственны почвам центральной поймы, при этом в прирусловой ее части, как слаборазвитые почвы песчаного гранулометрического состава, так и почвы со сформированным профилем суглинистого состава отличаются принадлежностью к группам очень низкой и низкой обеспеченности.

Таблица 1. Агрохимические свойства и содержание нефтепродуктов в верхнем 20-сантиметровом слое аллювиальных почв поймы правого берега Колвы (сенокос)

Table 1. Agrochemical properties and oil product content in the upper 20 cm layer of alluvial soils of the floodplain on the right bank of the Kolva River (hayfield)

Разрез	Тип/подтип почвы	НП, мг/г	pH _{KCl}	Массовая доля орг. в-ва (гумуса)	Фосфор подвиж., мг/кг	Калий подвиж., мг/кг
1	2	3	4	5	6	7
ба	Слаборазвитая (Асл)	0.015	6.02	не опр.	не опр.	не опр.
6б		0.021	6.00	не опр.	не опр.	не опр.
6в		0.015	5.82	не опр.	не опр.	не опр.
15а		0.008	5.08	не опр.	не опр.	не опр.
15б		0.086	5.30	не опр.	не опр.	не опр.
15в		0.077	5.92	не опр.	не опр.	не опр.
33		0.057	5.97	не опр.	не опр.	не опр.
34		0.065	6.12	не опр.	не опр.	не опр.
38		0.031	6.00	не опр.	не опр.	не опр.
3		Дерновая (Ад)	0.007	4.66	2.3	171.00
5	0.010		5.00	2.4	251.00	119.95
18	0.006		4.24	5.0	81.00	115.22
37	0.010		4.94	3.3	155.0	181.24

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Разрез	Тип/подтип почвы	НП, мг/г	pH_{KCl}	Массовая доля орг. в-ва (гумуса)	Фосфор подвиж., мг/кг	Калий подвиж., мг/кг
1	2	3	4	5	6	7
2	Дерново-луговая (Адл)	0.007	4.60	4.0	130.00	101.97
4		0.010	4.88	3.1	198.00	132.36
16		0.012	4.56	3.9	127.00	193.13
36		0.027	5.23	3.8	169.00	244.46
1	Луговая (Ал)	0.010	4.83	2.9	188.00	103.89
17		0.006	4.55	4.0	124.00	236.32
19		0.005	4.22	4.1	121.00	202.1
32		0.051	5.98	не опр.	не опр.	не опр.
35		0.093	6.14	не опр.	не опр.	не опр.
14	Болотная иловато-глиекая (Аб)	0.008	4.72	не опр.	не опр.	не опр.

Таблица 2. Агрохимические свойства и содержание нефтепродуктов в верхнем 20-сантиметровом слое аллювиальных почв поймы левого берега Колвы (пастбище)

Table 2. Agrochemical properties and oil product content in the upper 20 cm layer of alluvial soils of the floodplain on the left bank of the Kolva River (pasture)

Разрез	Тип/подтип почвы	НП, мг/г	pH _{KCl}	Массовая доля орг. в-ва (гумуса)	Фосфор подвиж., мг/кг	Калий подвиж., мг/кг
1	2	3	4	5	6	7
12а	Слаборазвитая (Асл)	0.012	5.91	0.5	236.00	39.82
12б		0.007	5.55	0.4	247.00	29.16
12в		0.005	6.23	0.4	217.00	26.05
13		0.031	5.60	0.5	279.00	39.42
20		0.016	5.16	0.8	232.00	47.73
23		0.074	6.20	0.8	214.00	399.18
39		0.042	5.72	0.9	272.00	47.46
40		0.155	5.65	0.8	286.00	40.83
42		0.816	5.86	1.4	238.00	65.49
7а	Дерновая (Ад)	0.008	4.93	не опр.	не опр.	не опр.
7б		0.044	4.81	не опр.	не опр.	не опр.
7в		0.184	5.48	не опр.	не опр.	не опр.
21		0.098	5.48	3.4	167.00	14.80
24		0.055	5.55	1.7	212.00	64.46
26а		0.113	5.33	не опр.	не опр.	не опр.

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Разрез	Тип/подтип почвы	НП, мг/г	pH _{KCl}	Массовая доля орг. в-ва (гумуса)	Фосфор подвиж., мг/кг	Калий подвиж., мг/кг
1	2	3	4	5	6	7
26б	Дерновая (Ад)	0.015	5.00	не опр.	не опр.	не опр.
26в		0.063	4.82	не опр.	не опр.	не опр.
29		0.057	5.95	2.4	222.00	115.81
30		0.067	5.65	2.4	210.00	162.72
31		0.070	5.51	3.9	178.00	193.50
9	Дерново-луговая (Адл)	0.006	4.30	2.3	161.00	89.22
25		0.052	5.36	1.3	228.00	129.27
27		0.004	4.47	1.4	204.00	78.73
41		0.007	4.67	2.3	185.00	111.75
10	Луговая (Ал)	0.075	5.44	2.5	172.00	182.69
11		0.057	4.95	1.3	243.00	68.48
22		0.381	4.89	3.4	162.00	118.17
28а		0.045	5.03	не опр.	не опр.	не опр.
28б		0.158	4.78	не опр.	не опр.	не опр.
28в		0.139	4.92	не опр.	не опр.	не опр.
8	Болотная иловато-глеевая (Аб)	0.022	4.20	не опр.	не опр.	не опр.

Таким образом, основные массивы кормовых угодий поймы Колвы в отношении содержания питательных элементов в корнеобитаемом слое почвы обладают весьма благоприятными агрохимическими свойствами, а почвы с низким содержанием калия четко пространственно обособлены в прирусловой полосе левого берега.

Содержание органического вещества (гумуса) в верхнем 20-сантиметровом слое аллювиальных почв (за исключением аллювиальных болотных почв) отличается в общем высокими значениями, учитывая достаточно ограниченный агроклиматический потенциал приполярных районов Европейского Севера России. Для большинства почв характерны величины, превышающие уровень 2% (табл. 1, 2). Они согласуются с данными Е.М. Лаптевой по аллювиальным почвам бассейна Печоры, представленными в Атласе почв Республике Коми (2010), в соответствии с которыми содержание гумуса в их гумусовых горизонтах колеблется в пределах от 2.7 до 7.7%. При этом слабая выраженность гумусового горизонта морфологически по окраске и структуре, возможно, объясняется не только высокой аллювиальностью (значительным поступлением пойменного аллювия в ходе паводков), но и преобладанием светлоокрашенного органического вещества в составе гумуса.

Почвы с относительно низким содержанием гумуса (< 2%) в основном приурочены к прирусловой части поймы. К ним, в том числе, относятся аллювиальные слаборазвитые почвы (разрезы 12, 13, 20, 23, 39, 40, 42). В связи с этим обращает на себя внимание низкое содержание органического вещества (1.4%) в дерново-луговой почве, вскрытой разрезом 27 в центральной пойме левого бережья. Причиной этого может быть значительная нарушенность поверхности почвы скотобойными тропами и в целом пастбищная дигрессия, обуславливающая разрушение дернины и уплотнение верхнего почвенного горизонта, что в конечном итоге приводит к замедлению процессов гумификации и аккумуляции органического вещества.

Выявляемая по показателю $pH_{КС1}$ кислотность верхнего слоя почв для большинства обследованных разрезов находится в области умеренно кислых и слабокислых значений (4.5–6). Повышенной кислотностью (4.2–4.5) отличаются лишь три исследованных

образца из профилей дерново-луговых почв (разрезы 9, 27) и болотной иловато-глеевой почвы (разрез 8) (табл. 1, 2). Если болотные почвы всегда отличаются повышенной кислотностью, то установленная локальная аномалия для дерново-луговых почв, вероятно, вызвана антропогенным воздействием. В этом случае низкие показатели $pH_{КС1}$ могут быть связаны с уже отмеченной выше пастбищной дигрессией, признаки которой в виде скотобойных троп и уплотнения почвы наблюдались нами как раз в районе данных разрезов. Тем не менее, природа подкисления, по видимому, близка для всех названных почв и обусловлена прежде всего развитием оглеения (Мартынов, 2019). Различие заключается лишь в том, что в болотной почве речь идет о сильном природном оглеении, в то время как в нарушенных при пастбищной дигрессии дерново-луговых почвах поверхностное оглеение развивается вследствие переуплотнения. По мнению Г.В. Добровольского и А.Н. Тюрюканова (1962), повышению гидроморфности аллювиальных почв особенно способствует неумеренная пастьба в ранневесеннее и позднесеннее время.

По результатам выполненных агрохимических исследований в целом можно судить об удовлетворительном агроэкологическом состоянии почв поймы Колвы на обследованных участках. Невысокие значения содержания гумуса и подвижного калия в слаборазвитых почвах прирусловой зоны левобережной поймы объясняются начальным характером почвообразования на песчаном аллювии. В то же время несколько пониженное из-за пастбищной дигрессии качество дерново-луговых почв (подкисление, снижение содержания гумуса и подвижного калия) свойственно только отдельным участкам их почвенного контура в левобережной пойме.

Состояние растительности пойменных кормовых угодий

Строение растительного покрова, так же как и в случае почвенного покрова, имеет определенные различия на левом и правом берегу поймы Колвы, обусловленные как природными (прежде всего почвенно-геоморфологическими), так и антропогенными факторами (видом кормовых угодий).

Сегментно-гривистый пойменный массив правого берега четко разделяется на более низкую тыловую часть и центрально-прирусловую часть с повышенными гипсометрическими уровнями поверхности (рис. 7). Первая из названных частей массива занята комплексами, состоящими из злаково-разнотравных лугов на гривах и в межгривных понижениях высокого уровня, ивняков злаковых и разнотравных в понижениях среднего уровня и древесно-разнотравно-осоковых болот в понижениях самого низкого уровня. В относительно повышенном северо-восточном секторе указанный растительный комплекс несколько упрощает свою пространственную структуру за счет выпадения болотного компонента. В свою очередь, растительный покров центрально-прирусловой части пойменного массива представлен в основном бобово-злаково-разнотравными сообществами, формирующимися как в межгривных понижениях, так и на плоских гривах. Несколько обособляется в связи с этим северный сектор рассматриваемой части пойменного массива: здесь на гривах господствуют разнотравно-хвощево-злаковые фитоценозы, а в межгривных понижениях – хвощево-щучковые сообщества.

На прирусловом валу и в прилегающей к нему полосе сегментного массива правого берега распространены ивняки злаковые и разнотравные, причем наиболее высокие фрагменты прируслового вала и его склона, обращенного к руслу реки, отличаются развитием на них ивняков вейниковых. Природоохранная ценность прирусловых ивняков повышается в связи с находками в ареалах этих сообществ куртин цинны широколистной (*Cinna latifolia* (Trevir. ex Göpp.) Griseb.) – злака, занесенного в Красную Книгу Республики Коми.

Все луга правобережной поймы используются в качестве сенокосов, в то время как ивовые заросли исключены из сельскохозяйственного оборота.

Левобережная пойма Колвы, как уже указывалось выше, отличается наличием двух геоморфологических ступеней, имеющих разницу в высоте около 2 м. На высокой пойме (преимущественно на дерново-луговых почвах) образуются бобово-злаково-разнотравные, разнотравно-клеверные и щучковые луга, причем последние наиболее приближены к селу Колва, и, таким образом,

испытывают наибольшую пастбищную нагрузку, что и объясняет доминирование здесь щучки на фоне выраженной пастбищной дигрессии. Пониженная, более молодая, часть левобережной поймы подразделяется, в свою очередь, на центральную и прирусловую. Для центральной поймы характерны разнотравно-клеверные луга (доминант клевер ползучий (*Trifolium repens* L.)). В прирусловой части они уступают место комплексным сообществам, включающим хвощево-белокопытеневые, клеверно-злаковые и злаковые фитоценозы. Эти же луга свойственны и местообитаниям пологого, слабо выраженного прируслового вала.

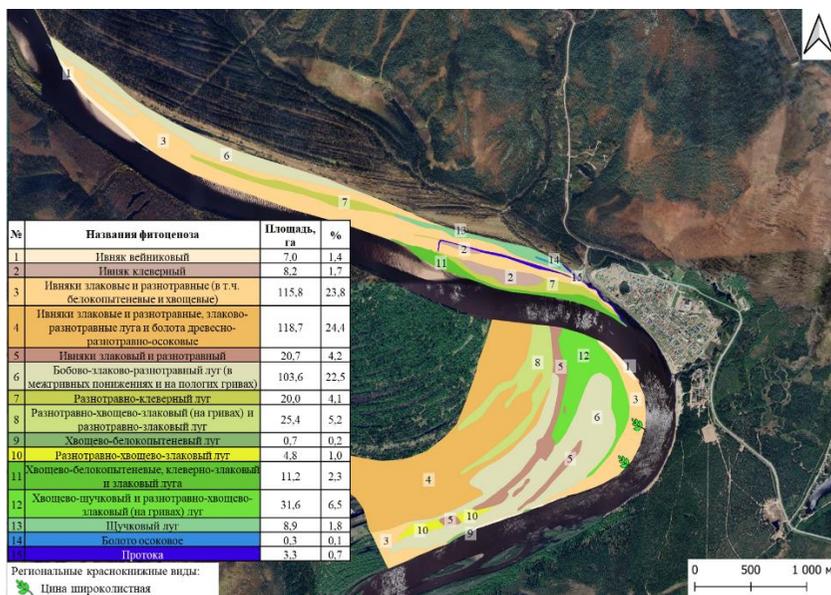


Рис. 7. Геоботаническая карта ключевого участка.

Fig. 7. The geobotanical map of the study area.

Большую роль на левобережной части поймы Колвы играют ивовые леса, превышающие по площади луговые формации и образующие широкий спектр фитоценозов за счет разнообразия травяного яруса. Они представлены ивняками злаковыми, разнотрав-

ными, белокопытеновыми, хвощевыми, клеверными. Ивняки при этом занимают и прирусловую, и центральную зоны поймы, распространяясь в том числе и на высокую пойму. В отличие от ивняков правобережной поймы, они вовлечены в сельскохозяйственный оборот и используются под пастбища, так же как и прилегающие к ним выделы с луговой растительностью.

Техногенное воздействие нефтедобычи на пойменные земли

Пойма р. Колвы в последние десятилетия неоднократно подвергалась риску нефтяного загрязнения, связанному с распространением углеводородных поллютантов по руслу реки в результате аварийных разливов в ее верховьях.

Наиболее частыми признаками нефтезагрязнения, которые встретились в ходе настоящих работ, были темно-бурые следы на коре ив (в подавляющем большинстве – у ивы корзиночной) (рис. 8). Указанные признаки остаточного загрязнения растительности возникали, очевидно, вследствие осаждения нефтепродуктов, находящихся в виде пятен на поверхности вод, движущихся по пойме во время весеннего половодья. Эти признаки наблюдались спорадически почти на всем протяжении прирусловых ивняков в правобережной части поймы, а также ивняковых зарослей на левом берегу, приуроченных главным образом к центральной пойме Колвы. Чаще всего следы нефтезагрязнения имели лишь отдельно стоящие деревья или небольшие группы из нескольких стволов ив, что свидетельствует об ограниченных размерах нефтяных (битумных) пятен на поверхности паводковых вод, вряд ли превышающих несколько метров. Пятна нефтепродуктов на коре деревьев (кустарников) не представляют никакой угрозы сельскохозяйственным угодьям. Во-первых, они крайне незначительны по своей площади и, во-вторых, никак не взаимодействуют в силу пространственной изолированности с луговыми травостоями, используемыми в качестве кормов на пастбищах и сенокосах поймы Колвы.

Визуально различимые признаки нефтезагрязнения на поверхности аллювиальных почв крайне ограничены по масштабам. В самом верхнем (по течению) участке обследованной левобереж-

ной поймы Колвы (рис. 9), в районе разреза 42, наблюдалась прерывистая полоса пятен замазученности длиной около 100 м и общей площадью загрязнения около 5 м². Кроме того, в нескольких случаях были выявлены контуры площадью от 0.001 м² до 0.1 м² каждый, составляющие в совокупности не более 0.25 м². Наиболее крупное из них площадью 0.1 м² было обнаружено у разреза 24. Прочие мелкие пятна на поверхности почвы были отмечены поблизости от разрезов 21, 28, 33, 34. По своим размерам они сопоставимы с пятнами, образующимися в результате подтеков горяче-смазочных жидкостей из сенокосной техники, участвующей в уборке трав на правобережной пойме.



Рис. 8. Работник сельского хозяйства села Колва демонстрирует темно-бурые пятна на стволах ив в прирусловой пойме р. Колвы.

Fig. 8. An agricultural worker of the village Kolva demonstrates dark brown spots on the trunks of willows in the floodplain of the Kolva River near the riverbed.

Крайне незначительная степень загрязнения аллювиальных почв поймы Колвы нефтепродуктами подтверждается и химико-аналитическими исследованиями (табл. 1, 2). Ни один из проанализированных образцов (за пределами визуально различимых пятен нефтепродуктов) не превысил допустимого уровня, установленного для аллювиальных почв, согласно Постановлению Правительства республики Коми № 449 от 23.08.2017 «О внесении изменений в постановление Правительства республики Коми № 268 от 20.11.2007 “О нормативах допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах после проведения рекультивации и иных восстановительных работ на территории Республики Коми”», т. е. значения содержания нефтепродуктов не достигали 1000 мг/кг. При этом максимальная величина этого показателя (816 мг/кг), как и следовало ожидать, исходя из данных полевого осмотра, была получена для смешанной пробы, отобранной непосредственно в районе разреза 42, где и наблюдались наиболее крупные пятна замазученности. Все остальные концентрации нефтепродуктов в почве были значительно меньше. Так, уровня содержания нефтепродуктов от 100 до 816 мг/кг достигли только почвы пяти разрезов (разрезы 7(в), 22, 26(а), 28(б,в), 40) в левобережной пойме. В то же время почвы правобережной поймы можно рассматривать в качестве полностью очищенных от любых остаточных загрязнений. Даже наибольшая величина содержания нефтепродуктов составляет здесь всего 93 мг/кг, что более чем в 10 раз ниже допустимого уровня. Возможно, что определенную защитную роль сыграла покрытая ивовым лесом прирусловая часть поймы с прирусловым валом, не позволяющая нефтепродуктам проникать вглубь пойменного массива во время половодья.

Отдельно были определены концентрации нефтепродуктов непосредственно в двух замазученных пятнах (с глубиной взятия образца 0–3 см), отобранных в районах разрезов 21 и 33. Результаты анализов свидетельствуют о значениях, превышающих допустимый уровень в 4–5 раз и достигающих соответственно 4 167 и 4 951 мг/кг. Иными словами, нефтезагрязнение аллювиальных почв поймы Колвы, выявляемое визуально по пятнам замазученности на их поверхности, по своей площади совпадает с загрязне-

нием в законодательном (нормативном) понимании.

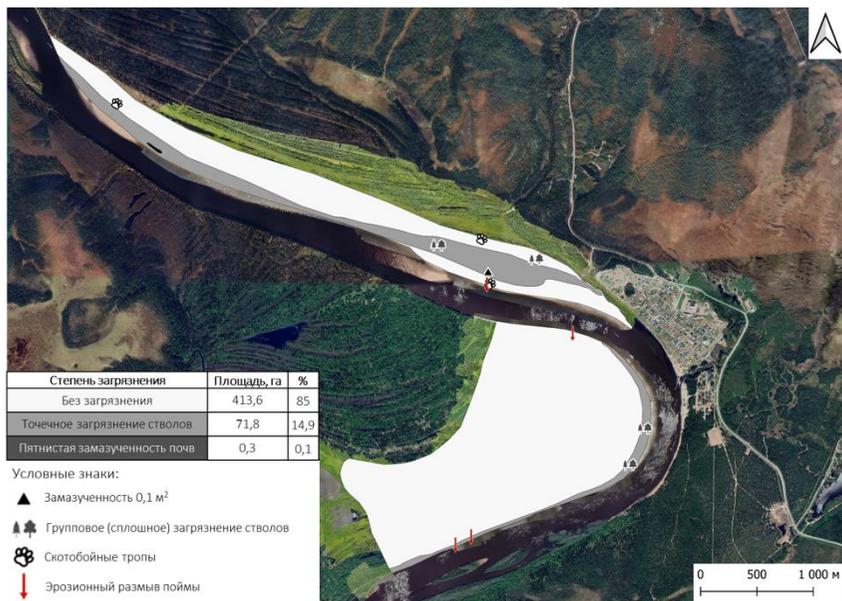


Рис. 9. Карта нарушенности ключевого участка.

Fig. 9. The map of disruption of the study area.

Таким образом, практически весь почвенный покров исследуемой территории поймы Колвы в настоящее время не загрязнен нефтью и нефтепродуктами. Мелкие замазученные пятна (общей площадью около 6 м²) могут быть легко устранены путем реализации комплексных мероприятий по рекультивации земель.

Влияние нефтезагрязнения на растительный покров поймы Колвы, по-видимому, не проявляется. В частности, на обследованной территории сохраняют свое присутствие представители семейств бобовые, губоцветные, крестоцветные, которые расцениваются в качестве наиболее уязвимых к воздействию нефтезагрязнения (Игошева, 1988).

Сельскохозяйственное воздействие на пойменные земли

Наиболее значимый вид нарушений, как было установлено в процессе почвенных и геоботанических исследований, представляет собой пастбищная дигрессия (рис. 9). Этот вид нарушений имеет как почвенные, так и геоботанические аспекты.

Признаки нарушения почв в результате повышенной пастбищной нагрузки были обнаружены в нескольких местообитаниях левобережной поймы, в том числе в районе разрезов 9, 20, 27 и 41. Из них разрезы 9, 27 и 41 приходятся на контур аллювиальных дерново-луговых почв, занимающий довольно узкую полосу в центральной пойме (рис. 6). При этом состав почв в местах разрезов характеризовался как супесчаный (разрезы 9, 27), так и легкосуглинистый (разрез 41). Во всех случаях данные участки ареала дерново-луговых почв имели характерный микрорельеф скотобойных троп с выемками, сопряженными с поврежденной дерниной, и с микроповышениями, часто занятыми плотнокустовыми растениями, прежде всего щучкой дернистой. Кроме того, из-за уплотнения в их поверхностных (гумусовых) горизонтах развиваются процессы переувлажнения и обусловленного им поверхностного оглеения, проявляющегося морфологически в неоднородной окраске окисных и закисных зон. Пастбищная дигрессия приводит также и к ухудшению агрохимических свойств почв: повышается кислотность (разрезы 9, 27), уменьшается содержание гумуса (разрез 27).

Основной деградационный признак слабообразованных песчаных почв прирусловой поймы Колвы (разрез 20) заключается в разрушении формирующейся дернины на фоне образования мелких скотобойных рытвин. Необходимо подчеркнуть, что признаки пастбищной дигрессии в виде скотобойного микрорельефа в этой части поймы наблюдались нами и во время обследования в 1997 г.

Луговая растительность в условиях пастбищной дегрессии также претерпевает негативные изменения. Если на сенокосе в среднем на ключевых площадках отмечено по 23 вида трав, то на пастбище этот показатель составил 16. Существенно различается и видовой состав сообществ. Для лугов правобережья характерно обилие разнотравья и значительное участие в сложении травостоя

хороших в кормовом отношении злаков – лисохвоста лугового (*Alopecurus pratensis* L.), костреца безостого (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), пырея ползучего (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.), канареечника тростниковидного (*Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert). В левобережной части основной компонент наиболее посещаемых скотом участков пастбищ – кочкарный плотнокустовой злак – щучка дернистая. Примечательно, что местами его кочки стравлены. Видимо, это происходит в начале вегетационного сезона, когда листья щучки еще молодые и сравнительно нежные. После вступления в фазу колошения щучка теряет привлекательность для крупного рогатого скота, что, в свою очередь, значительно снижает ценность для выпаса участков лугов с ее доминированием. Этот вид, кроме того, препятствует развитию более ценных видов злаков и бобовых с менее глубокой корневой системой. Его значительное участие в травостое пастбищ рассматривается как фактор деградации кормовых угодий (Мартыненко, 1989).

В наиболее поврежденных местообитаниях пастбища состав травостоя ограничивается 11–13 видами, злаки стравлены до высоты 5–7 см. Напочвенный покров таких участков формируется преимущественно из клевера ползучего, щучки, хвоща полевого (*Equisetum arvense* L.), полевицы побегообразующей (*Agrostis stolonifera* L.) и малоценных в хозяйственном отношении видов разнотравья. В районе разреза 27 микрорельеф луга изменен наиболее сильно – местами скотобойные рытвины трансформировались в потяжины, образовавшиеся по ходу движения скота, служащие предвестниками развития эрозии. Общее проективное покрытие растительностью в этой части пастбища значительно снижено и составляет менее 50%. Присутствие манжетки обыкновенной (*Alchemilla vulgaris* L.s.l.) и подорожника большого (*Plantago major* L.) индицирует переуплотнение почв.

На сравнительно сбалансированных в кормовом отношении участках сенокоса в составе травостоя преобладают ценные в кормовом отношении злаки, доля сорных и вредных для скота трав невелика. На фоне средних достаточно высоких значений урожайности (48.6 ц/га) лугов правобережья выделяются травостои с существенно более низкими показателями (22.4 ц/га), приуроченные

к долговременно заливаемым пониженным местообитаниям с доминированием полевицы побегообразующей. В местообитаниях с наиболее высокой продуктивностью (80.0–88.8 ц/га) значительную роль, кроме злаков и горошков, играет крупнотравье, среди которого преобладают купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), борщевик сибирский (*Heracleum sibiricum* L.), бодяк разнолистный (*Cirsium heterophyllum* (L.) Hill), таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.). Данные виды плохо и неравномерно сохнут, их грубые стебли малопривлекательны для крупного рогатого скота, а листья у крупных видов семейства зонтичных в сене растрескиваются (Ларин и др., 1956). На ряде участков сенокоса заметный вклад в сложение травостоя вносят ядовитые травы – лютики золотистый (*Ranunculus auricomus* L.) и едкий (*R. acris* L.), а также чемерица Лобеля. Местами значительно участие малопитательного вида – хвоща полевого. Поэтому, несмотря на сравнительно высокие показатели продуктивности и присутствие ценных в кормовом отношении видов злаков и бобовых, качественные характеристики сена отклоняются от оптимальных.

Наконец, еще одним видом нарушенности почвенно-растительного покрова, помимо нефтезагрязнения и пастбищной дигрессии, является эрозионный размыв прирусловой поймы. Хотя этот вид деградации не получил значительного развития, в связи с его потенциальной опасностью целесообразна организация наблюдения за очагами первоначальной эрозии, отмеченными на карте нарушенности почв и растительности (рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что состояние сельскохозяйственных пойменных угодий в районе поселка Колва – пастбищ на левобережье и сенокосов на правом берегу – в целом удовлетворительно.

На западе обследованной левобережной поймы Колвы была обнаружена полоса из отдельных пятен замасоченности длиной около 100 м и общей площадью загрязнения около 5 м² (см. карту нарушенности на рис. 9). Кроме того, в нескольких случаях были выявлены контуры площадью от 0.001 м² до 0.1 м² каждый, составляющие в совокупности не более 0.25 м². Химико-

аналитические исследования при этом установили, что за пределами указанных пятен замазученности значения содержания нефтепродуктов в поверхностном горизонте почвы 0–20 см не превышают установленных для аллювиальных почв нормативов (1 г/кг) и, следовательно, должны рассматриваться в качестве незагрязненных. Следы нефтепродуктов на стволах деревьев сами по себе не могут привести к каким-либо негативным последствиям для почв и кормовых трав, поскольку они пространственно изолированы от них. Правобережная часть поймы менее уязвима для нефтезагрязнения, поскольку в качестве механического барьера в этом случае выступает прирусловой вал, покрытый густыми ивняками. Соответственно, фоновые значения содержания нефтепродуктов здесь в целом ниже, чем на левобережной пойме.

Пастбищная дигрессия связана с избыточным выпасом скота на некоторых участках левобережной поймы. В основном ее последствия заключаются в следующем:

1. На поверхности почвы образуются скотобойные рытвины (скотобойные тропы), одновременно происходят нарушение целостности покрова дернового горизонта почвы (A_d) и уплотнение нижележащего гумусового горизонта (A или AC).

2. В гумусовом горизонте из-за уплотнения и вызванного им понижения водопроницаемости развивается поверхностный глеевый процесс, в свою очередь, приводящий к некоторому ухудшению агроэкологических свойств почв.

3. Трансформируется видовой состав луговых сообществ. В числе неблагоприятных тенденций особенно важна доминирующая роль щучки дернистой, которую она играет в луговых сообществах пастбища.

Проведенные исследования показывают, что сельскохозяйственные земли находятся в достаточно стабильном состоянии. Так, массовое внедрение в травостои щучки дернистой наблюдалось на Печорском Севере уже в середине XX в. (Хантимер, 1959), а в 1997 г., по нашим наблюдениям, она господствовала в сообществах пастбищных лугов, расположенных поблизости села Колва. Тогда же были отмечены и другие признаки пастбищной дигрессии (скотобойные тропы, нарушение дернины).

Сенокосные угодья поймы по своей продуктивности и уров-

ню засоренности в целом соответствуют состоянию пойменных земель региона. В качестве рекомендаций землепользователям можно предложить такие меры по улучшению сенокосов, как снижение доли ядовитых растений, выявленных в ходе обследования, а также борьбу с луговыми сорняками, снижающими качество сена, путем регулярного подкашивания наиболее засоренных участков в течение вегетационного сезона с целью недопущения их обсеменения. При соответствующих возможностях на переуплотненных и деградированных участках пастбищ и сенокосов рекомендуется провести комплекс мероприятий поверхностного улучшения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А.* Методические подходы к оценке нефтезагрязненных земель Среднего Приобья // Проблемы агрохимии и экологии. 2012. № 3. С. 56–61.
2. *Аветов Н.А., Балабко П.Н.* Типология и районирование сегментно-гвивистой поймы реки Чулым // Биологические науки. 1992. № 5. С. 109–114.
3. *Аветов Н.А., Балабко П.Н.* Типология пойм. Развитие взглядов и современное состояние проблемы // Почвоведение. 1994. № 9. С. 22–27.
4. *Аветов Н.А., Булгаков Д.С., Шишконокова Е.А.* Агроэкологическая характеристика почв Среднего Приобья // Плодородие. 2008. № 4. С. 39–41.
5. Атлас почв Республики Коми. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2010. 356 с.
6. *Афанасьева Т.В.* Морфологическая диагностика долгопоемных почв гумидных ландшафтов // Почвоведение. 1986. № 5. С. 18–26.
7. *Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С., Игошева Е.А., Абдулманова И.Ф.* Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180–193. DOI: [10.31897/PMI.2023.22](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22).
8. *Воробьев А.Е., Очирова Д.В.* Особенности космического мониторинга геоэкологического состояния территории разрабатываемых месторождений нефти и газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 1(52). С. 177–184.

9. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Методика и результаты. М.: Наука; Берлин: Академи-ферлаг, 1982. 84 с.
10. *Добровольский Г.В.* Генезис, эволюция и охрана почвенного покрова пойм Нечерноземной зоны РСФСР // Научные основы оптимизации и воспроизводства плодородия аллювиальных почв Нечерноземной зоны РСФСР. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1991. С. 3–14.
11. *Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во Московского ун-та, 1968. 296 с.
12. *Добровольский Г.В., Тюрюканов А.Н.* Почвы поймы Москвы-реки // Пойменные почвы Русской равнины. М.: Изд-во Московского ун-та, 1962. С. 9–40.
13. *Евдокимова Т.И.* Почвенная съемка. М.: Изд-во Московского ун-та, 1987. 268 с.
14. *Зайдельман Ф.Р., Беличенко М.В., Бибин А.С.* Деградация и восстановление почв поймы р. Москва за последние 50 лет // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1377–1386.
15. *Игошева Н.И.* Влияние нефтяных загрязнений на структуру и продуктивность пойменных лугов среднего течения Оби // Экология нефтегазового комплекса. I Всесоюзная конф. г. Надым. М., 1988. С. 143–145.
16. *Карманов И.И., Булгаков Д.С., Шишконокова Е.А.* Система оценки природно-антропогенных воздействий на изменение плодородия почв пахотных земель на основе почвенно-агроэкологического индекса // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 65–83. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-65-83](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-65-83).
17. *Кауричев И.С., Панов Н.П., Стратонович М.В.* и др. Практикум по почвоведению. М.: Агропромиздат, 1986. 336 с.
18. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия, 2004.
19. *Конюшков Н.С., Якушев Д.В.* Пойменные луга СССР // Пастбища и сенокосы СССР М.: Колос, 1974. С. 282–300.
20. *Кутузова Р.С., Воробьев Н.И., Гамова М.В., Попова Л.В., Круглов Ю.В.* Микробиологическая характеристика дерновых почв центральной поймы Северной Двины // Почвоведение. 2009. № 2. С. 244–254.
21. *Лаптева Е.М., Виноградова Ю.А., Познянская Л.В.* Плодородие и продуктивность пойменных почв Республики Коми // Плодородие. 2008. № 2. С. 43–44.
22. *Ларин И.В., Агабабян Ш.М., Работнов Т.А.* и др. Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР. М.-Л.: Гос.сельхозиздат, 1950–1956, тт. 1–3.

23. *Ларин И.В., Бегучев П.П., Работнов Т.А., Леонтьева И.П.* Луговоеводство и пастбищное хозяйство. Л.: Колос, 1975. 528 с.
24. *Мартыненко В.А.* Флористический состав кормовых угодий европейского Северо-Востока СССР. Л.: Наука, 1989. 136 с.
25. *Мартынов А.В.* Варьирование показателей кислотности в почвах поймы реки Амур // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С.57–76. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-57-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-57-76).
26. *Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Яковлев А.С., Булгаков Д.С., Макаров О.А.* Отечественные подходы к оценке степени деградации почв и земель // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1394–1406.
27. *Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Идрисов И.Р.* Оценка техногенной нарушенности нефтяных месторождений Среднего Приобья с использованием спутниковых снимков // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 5. С. 53–61.
28. *Овчаренко И.Я.* Основные направления рационального использования пойменных лугов Сибири и Дальнего Востока // Проблемы освоения пойм северных рек. М.: Агропромиздат, 1987. С. 94–102.
29. *Опарина А.И., Кузнецов Ю.И., Бабенко С.Е.* Особенности улучшения и использования пойменных лугов Европейского Севера // Проблемы освоения пойм северных рек. М.: Агропромиздат, 1987. С. 113–116.
30. *Орлов В.И.* Динамическая география. М.: Научный мир, 2006. 596 с.
31. Полевая геоботаника. Т. 3. М.-Л.: Наука, 1964. 530 с.
32. Растения и лишайники России и сопредельных стран – Плантариум. URL: <http://plantarium.ru> (дата обращения 01.06.2023).
33. *Пуртов Г.М.* Кормовые угодья Обь-Иртышской поймы и перспективы их освоения // Проблемы освоения пойм северных рек. М.: Агропромиздат, 1987. С. 35–40.
34. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
35. *Рочев П.А.* Вопросы кормопроизводства на Печорском Севере // Кормопроизводство на Крайнем Севере. М.: Колос, 1981. С. 14–23.
36. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
37. *Сорокина Н.П.* Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Почвенный ин-т, 2006. 159 с.
38. *Тишков А.А.* Антропогенная трансформация флоры и экологическая политика на Севере. Вместо предисловия // Флора антропогенных местообитаний Севера. М.: ИГРАН, 1996. С. 5–15.

39. *Уткаева В.Ф., Скворцова Е.Б., Сапожников П.М., Щепотьев В.Н.* Изменение агрофизических свойств почв пойм при различных антропогенных нагрузках // Почвоведение. 2009. № 2. С. 167–177.
40. *Хантимер И.С.* Материалы к изучению лугов поймы р. Печоры // Луга Коми АССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 175–266.
41. *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб, 1995. 992 с.
42. *Чернов А.В.* Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во Московского ун-та, 1983. 198 с.
43. *Шилов М.П.* Состояние, использование, оптимизация и охрана естественных сенокосов и пастбищ Нечерноземной зоны РСФСР // Продуктивность сенокосов и пастбищ. Новосибирск: Наука, 1986. С. 85–90.
44. *Шраг В.И.* Пойменные почвы, их мелиорация и сельскохозяйственное использование. М.: Россельхозиздат, 1969. 270 с.
45. *Al-Shammari A., Levin E., Shults R.* Oil spills detection by means of UAS and low-cost airborne thermal sensors // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. IV–5. P. 293–301.
46. *Ansari J., Davis M.P., Anderson S.H., Eivazi F., Bardhan S.* Greenhouse gas emission from row crop, agroforestry, and forested land use systems in floodplain soils // Water, Air & Soil Pollution. 2023. Vol. 234. P. 227.
47. *Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F.* Assessing soil degradation in northern Eurasia // Geoderma Regional. 2016. No. 7. P. 1–10.
48. *Moore B.D., Kaur G., Motavalli P.P., Zurweller B.A., Svoma B.M.* Soil greenhouse gas emission from agroforestry and other land uses under different moisture regimes in lower Missouri River floodplain soils: a laboratory approach // Agroforestry Systems. 2018. Vol. 92. P. 335–348.
49. *Pies C., Yang Y., Hoffman T.* Distribution of Polycyclic Hydrocarbons (PAHs) in Floodplain Soils of the Mosel and Saar River // Journal of Soils and Sediments. 2007. Vol. 7. P. 216–222.
50. *Wang J., Zhen J., Hu W., Chen S., Lizaga I., Zeraatpisheh M., Yang X.* Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective // International Soil and Water Conservation Research. 2023. DOI: [10.1016/j.iswcr.2023.03.002](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002).

REFERENCES

1. Avetov N.A., Arzamazova A.V., Kinzhaev R.R., Trofimov S.Ya., Shishkonakova E.A., Metodicheskie podkhody k otsenke neftezagryaznennykh zemel' Srednego Priob'ya (Methodological approaches

- to the assessment of oil-contaminated lands in the Middle Ob' region), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2012, No. 3, pp. 56–61.
2. Avetov N.A., Balabko P.N., Tipologiya i raionirovanie segmentno-grivistoi poimy reki Chulym (Typology and zoning of the segmented ridge floodplain of the Chulym River), *Biologicheskie nauki*, 1992, No. 5, pp. 109–114.
3. Avetov N.A., Balabko P.N., Tipologiya poim. Razvitie vzglyadov i sovremennoe sostoyanie problem (Typology of floodplains. Development of views and the current state of the problem), *Pochvovedenie*, 1994, No. 9, pp. 22–27.
4. Avetov N.A., Bulgakov D.S., Shishkonakova E.A., Agroekologicheskaya kharakteristika pochv Srednego Priob'ya (Agroecological characteristics of soils in the Middle Ob region), *Plodorodie*, 2008, No. 4, pp. 39–41.
5. *Atlas pochv Respubliki Komi* (Atlas of Soils of the Komi Republic). Syktyvkar: Komi respublikanskaya tipografiya, 2010, 356 p.
6. Afanas'eva T.V., Morfologicheskaya diagnostika dolgopodemnykh pochv gumidnykh landshaftov (Morphological diagnostics of long-flooded soils in humid landscapes), *Pochvovedenie*, 1986, No. 5, pp. 18–26.
7. Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Kuchin L.S., Igosheva E.A., Abdulmanova I.F., Primenenie bespilotnoi aerofotos'emki dlya diagnostiki tekhnogennoi transformatsii prirodnoi sredy pri ekspluatatsii neftyanogo mestorozhdeniya (The use of unmanned aerial photography for diagnosing the technogenic transformation of the natural environment during the operation of an oil field), *Zapiski Gornogo instituta*, 2023, Vol. 260, pp. 180–193, DOI: [10.31897/PMI.2023.22](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22).
8. Vorob'ev A.E., Ochirova D.V., Osobennosti kosmicheskogo monitoringa geokologicheskogo sostoyaniya territorii razrabatyvaemykh mestorozhdenii nefi i gaza v Arktike (Features of space monitoring of the geocological state of the territory of developed oil and gas fields in the Arctic), *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka*, 2017, No. 1(52), pp. 177–184.
9. *Deshifrirovaniye mnogoazonal'nykh aerokosmicheskikh snimkov: Metodika i rezul'taty* (Interpretation of multizone aerospace images: Methodology and results), Moscow: Nauka, Berlin: Akademi-ferlag, 1982, 84 p.
10. Dobrovol'skii G.V., Genesis, evolyutsiya i okhrana pochvenno go pokrova poim Nechernozemnoi zony RSFSR (Genesis, evolution and protection of the soil cover of the floodplains of the Non-Chernozem zone of the RSFSR), In: *Nauchnye osnovy optimizatsii i vosproizvodstva plodorodiya allyuvial'nykh pochv Nechernozemnoi zony RSFSR* (Scientific basis for optimization and reproduction of fertility of alluvial soils of the Non-Chernozem zone of the RSFSR), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1991, pp. 3–14.
11. Dobrovol'skii G.V., *Pochvy rechnykh poim tsentra Russkoi ravniny* (Soils of river floodplains in the center of the Russian Plain), Moscow: Izd-vo

Moskovskogo un-ta, 1968, 296 p.

12. Dobrovolskii G.V., Tyuryukanov A.N., Pochvy poimy Moskvy-reki (Soils of the floodplain of the Moscow River), In: *Poimennye pochvy Russkoi ravniny* (Floodplain soils of the Russian Plain), Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 1962, pp. 9–40.

13. Evdokimova T.I., *Pochvennaya s'emka* (Soil survey), Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 1987, 268 p.

14. Zaidel'man F.R., Belichenko M.V., Bibin A.S., Degradatsiya i vosstanovlenie pochv poimy r. Moskva za poslednie 50 let (Degradation and restoration of soils of the floodplain of the river Moscow over the past 50 years), *Pochvovedenie*, 2013, No. 11, pp. 1377–1386.

15. Igosheva N.I., Vliyanie neftnykh zagryaznenii na strukturu i produktivnost' poimennykh lugov srednego techeniya Obi (Influence of oil pollution on the structure and productivity of floodplain meadows of the middle course of the Ob), *Ekologiya neftegazovogo kompleksa* (Ecology of the Oil and Gas Complex), Proc. 1st All-Russian Conference, Nadym, 3–5 October, 1988, Moscow, 1988, pp. 143–145.

16. Karmanov I.I., Bulgakov D.S., Shishkonakova E.A., An assessment system of natural and anthropogenic effects on changes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 65–83, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-65-83](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-65-83).

17. Kaurichev I.S., Panov N.P., Stratonovich M.V. et al., *Praktikum po pochvovedeniyu* (Workshop on soil science), Moscow: Agropromizdat, 1986, 336 p.

18. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V., *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy* (Aerospace methods of geographical research), Moscow: Akademiya, 2004.

19. Konyushkov N.S., Yakushev D.V., Poimennye luga SSSR (Floodplain meadows of the USSR), In: *Pastbishcha i senokosy SSSR* (Pastures and hayfields of the USSR), Moscow: Kolos, 1974, pp. 282–300.

20. Kutuzova R.S., Vorob'ev N.I., Gamova M.V., Popova L.V., Kruglov Yu.V., Mikrobiologicheskaya kharakteristika dernovykh pochv tsentral'noi poimy Severnoi Dviny (Microbiological characteristics of soddy soils of the central floodplain of the Northern Dvina), *Pochvovedenie*, 2009, No. 2, pp. 244–254.

21. Lapteva E.M., Vinogradova Yu.A., Poznyanskaya L.V., Plodorodie i produktivnost' poimennykh pochv Respubliki Komi (Fertility and productivity of floodplain soils of the Komi Republic), *Plodorodie*, 2008, No. 2, pp. 43–44.

22. Larin I.V., Agababyan Sh.M., Rabotnov T.A. et al., *Kormovye rasteniya senokosov i pastbishch SSSR* (Forage plants of hayfields and pastures of the USSR), Moscow–Leningrad: Gos.sel'khozizdat, 1950–1956, Vol. 1–3.

23. Larin I.V., Beguchev P.P., Rabotnov T.A., Leont'eva I.P., *Lugovodstvo i*

pastbishchnoe khozyaistvo (Grassland and pasture farming), Leningrad: Kolos, 1975, 528 p.

24. Martynenko V.A., *Floristicheskii sostav kormovykh ugodii evropeiskogo Severo-Vostoka SSSR* (Floristic composition of forage lands in the European North-East of the USSR), Leningrad: Nauka, 1989, 136 p.

25. Martynov A.V., Variation of acid values in floodplain soils of the Amur River), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 98, pp. 57–76, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-57-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-57-76).

26. Molchanov E.N., Savin I.Yu., Yakovlev A.S., Bulgakov D.S., Makarov O.A., Otechestvennye podkhody k otsenke stepeni degradatsii pochv i zemel' (Domestic approaches to assessing the degree of soil and land degradation), *Pochvovedenie*, 2015, No. 11, pp. 1394–1406.

27. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Idrisov I.R., Otsenka tekhnogennoi narushennosti neftyanykh mestorozhdenii Srednego Priob'ya s ispol'zovaniem sputnikovykh snimkov (Assessment of technogenic disturbance of oil fields in the Middle Ob region using satellite images), *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, No. 5, pp. 53–61.

28. Ovcharenko I.Ya., Osnovnye napravleniya ratsional'nogo ispol'zovaniya poimennykh lugov Sibiri i Dal'nego Vostoka (The main directions of the rational use of floodplain meadows in Siberia and the Far East), In: *Problemy osvoeniya poim severnykh rek* (Problems of development of floodplains of northern rivers), Moscow: Agropromizdat, 1987, pp. 94–102.

29. Oparina A.I., Kuznetsov Yu.I., Babenko S.E., Osobennosti uluchsheniya i ispol'zovaniya poimennykh lugov Evropeiskogo Severa (Features of improvement and use of floodplain meadows of the European North), In: *Problemy osvoeniya poim severnykh rek* (Problems of development of floodplains of northern rivers), Moscow: Agropromizdat, 1987, pp. 113–116.

30. Orlov V.I., *Dinamicheskaya geografiya* (Dynamic geography), Moscow: Nauchnyi mir, 2006, 596 p.

31. *Polevaya geobotanika* (Field Geobotany), Vol. 3, Moscow–Leningrad: Nauka, 1964, 530 p.

32. Rasteniya i lishainiki Rossii i sopredel'nykh stran (Plants and lichens of Russia and neighboring countries), URL: <http://plantarium.ru> (accessed 01.06.2023).

33. Purtov G.M., Kormovye ugod'ya Ob'-Irtyskoi poimy i perspektivy ikh osvoeniya (Forage lands of the Ob-Irtysk floodplain and prospects for their development), In: *Problemy osvoeniya poim severnykh rek* (Problems of development of floodplains of northern rivers), Moscow: Agropromizdat, 1987, pp. 35–40.

34. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Akademicheskii proekt, 2004, 432 p.

35. Rochev P.A., Voprosy kormoproizvodstva na Pechorskom Severe (Issues of forage production in the Pechora North), In: *Kormoproizvodstvo na Krainem Severe* (Forage production in the Far North), Moscow: Kolos, 1981, pp. 14–23.
36. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennye trendy i problemy pochvennoi kartografii (Modern trends and problems of soil cartography), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.
37. Sorokina N.P., *Metodologiya sostavleniya krupnomasshtabnykh agroekologicheskii orientirovannykh pochvennykh kart* (Methodology for the compilation of large-scale agro-environmentally oriented soil maps), Moscow: Pochvennyi in-t, 2006, 159 p.
38. Tishkov A.A., Antropogennaya transformatsiya flory i ekologicheskaya politika na Severe. Vmesto predisloviya (Anthropogenic transformation of flora and environmental policy in the North. Instead of a preface), In: *Flora antropogennykh mestoobitaniy Severa* (Flora of anthropogenic habitats of the North), Moscow: IGRAN, 1996, pp. 5–15.
39. Utkaeva V.F., Skvortsova E.B., Sapozhnikov P.M., Shchepot'ev V.N., Izmenenie agrofizicheskikh svoystv pochv poim pri razlichnykh antropogennykh nagruzkakh (Changes in the agrophysical properties of floodplain soils under various anthropogenic loads), *Pochvovedenie*, 2009, No. 2, pp. 167–177.
40. Khantimer I.S., Materialy k izucheniyu lugov poimy r. Pechory (Materials for the study of meadows of the floodplain of the river Pechory), In: *Luga Komi ASSR* (Meadows of the Komi ASSR), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1959, pp. 175–266.
41. Cherepanov S.K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv* (Vascular plants of Russia and neighboring countries), St. Petersburg, 1995, 992 p.
42. Chernov A.V., *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* (Geomorphology of lowland river floodplains), Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 1983, 198 p.
43. Shilov M.P., Sostoyanie, ispol'zovanie, optimizatsiya i okhrana estestvennykh senokosov i pastbishch Nechernozemnoi zony RSFSR (State, use, optimization and protection of natural hayfields and pastures of the Nonchernozem zone of the RSFSR), In: *Produktivnost' senokosov i pastbishch* (Productivity of hayfields and pastures), Novosibirsk: Nauka, 1986, pp. 85–90.
44. Shrag V.I., *Poimennye pochvy, ikh melioratsiya i sel'skokhozyaistvennoe ispol'zovanie* (Floodplain soils, their melioration and agricultural use), Moscow: Rossel'khozizdat, 1969, 270 p.
45. Al-Shammari A., Levin E., Shults R., Oil spills detection by means of UAS and low-cost airborne thermal sensors, *ISPRS Annals of*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, Vol. IV–5, pp. 293–301.

46. Ansari J., Davis M.P., Anderson S.H., Eivazi F., Bardhan S., Greenhouse gas emission from row crop, agroforestry, and forested land use systems in floodplain soils, *Water, Air & Soil Pollution*, 2023, Vol. 234, pp. 227.

47. Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F., Assessing soil degradation in northern Eurasia, *Geoderma Regional*, 2016, No. 7, pp. 1–10.

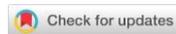
48. Moore B.D., Kaur G., Motavalli P.P., Zurweller B.A., Svoma B.M., Soil greenhouse gas emission from agroforestry and other land uses under different moisture regimes in lower Missouri River floodplain soils: a laboratory approach, *Agroforestry Systems*, 2018, Vol. 92, pp. 335–348.

49. Pies C., Yang Y., Hoffman T., Distribution of Polycyclic Hydrocarbons (PAHs) in Floodplain Soils of the Mosel and Saar River, *Journal of Soils and Sediments*, 2007, Vol. 7, pp. 216–222.

50. Wang J., Zhen J., Hu W., Chen S., Lizaga I., Zeraatpisheh M., Yang X., Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective, *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, DOI: [10.1016/j.iswcr.2023.03.002](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002).

УДК 630*43:631.485:574 (571.56-191.2)

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-231-275



Ссылки для цитирования:

Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Оконешникова М.В., Филиппов Н.В. Влияние крупных лесных пожаров 2021 года на растительность и почвы на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 231-275. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-231-275

Cite this article as:

Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Okoneshnikova M.V., Filippov N.V., The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 231-275, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-231-275

Благодарность:

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 0297-2021-0026, ЕГИСУ НИОКТР №АААА-А21-121012190036-6.

Acknowledgments:

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0026, reg. No. АААА-А21-121012190036-6).

Влияние крупных лесных пожаров 2021 года на растительность и почвы на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии

© 2024 г. Р. В. Десяткин^{1*}, М. Х. Николаева^{1**},
А. З. Иванова^{1***}, А. Р. Десяткин^{1,2****},
М. В. Оконешникова^{1*****}, Н. В. Филиппов^{1*****}

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия,
677980, Якутск, пр. Ленина, 41,

* <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, e-mail: rvdes@ibpc.ysn.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-0160-2295>, e-mail: mayan34@yandex.ru,

*** <http://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: maddalexia@mail.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, e-mail: desyatkinar@rambler.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, e-mail: mvok@yandex.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, e-mail: finiva88@mail.ru.

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Россия,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

Поступила в редакцию 20.07.2023, принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Изучено влияние катастрофических лесных пожаров 2021 г. на растительный покров и почвы средней тайги на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии. Полученные результаты показали кардинальную динамику видового разнообразия и продуктивности напочвенного покрова лиственничных и сосновых лесов в естественном состоянии и на горелых участках. Запас надземной фитомассы травяно-кустарничкового покрова в контрольном лиственничнике и сосняке более чем в 5 и 10 раз соответственно превышает таковой на горях. Проведенные работы выявили влияние лесных пожаров на морфологическое строение (формирование пирогенного слоя, проявление пиро- и криотурбаций), глубину протаивания, водный режим мерзлотных почв под лиственничными и сосновыми лесами и на горях однотипных лесов на легких почвообразующих породах криолитозоны в первый год после сильных пожаров. Почвы в районе исследования представлены преимущественно мерзлотными подзолами иллювиально-железистыми. Выявлено увеличение глубины залегания многолетнемерзлых пород в данных почвах, поднятие уровня верховодки, уменьшение кислотности в верхней части профиля. Было обнаружено интенсивное золообразование вследствие горения опада и подстилки. Дана характеристика современного состояния растительного и почвенного покрова.

Ключевые слова: гарь; запас надземной фитомассы; мерзлотные почвы; морфологические признаки; физико-химические свойства; трансформация.

The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia

© 2024 R. V. Desyatkin^{1*}, M. Ch. Nikolaeva^{1**},
A. Z. Ivanova^{1***}, A. R. Desyatkin^{1,2****},
M. V. Okoneshnikova^{1*****}, N. V. Filippov^{1*****}

¹Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS,
41 Lenin Ave., Yakutsk 677980, Russian Federation,

* <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, e-mail: rvdes@ibpc.vsn.ru,
** <https://orcid.org/0000-0002-0160-2295>, e-mail: mayan34@yandex.ru,
*** <http://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: madalexia@mail.ru,
**** <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, e-mail: desyatkinar@rambler.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, e-mail: mvok@yandex.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, e-mail: finiva88@mail.ru.

²Melnikov permafrost institute, SB RAS,
36. Merzlotnaya Str., Yakutsk 677010, Russian Federation.

Received 20.07.2023, Accepted 07.02.2024

Abstract: The influence of catastrophic forest fires in 2021 on the vegetation cover and soils of the middle taiga on the territory of distribution of light soil-forming rocks of Central Yakutia has been studied. Obtained results showed the cardinal dynamics of species diversity and productivity of the larch and pine forests surface vegetation in their natural state and in burnt areas. The stock of grass-shrub cover aboveground phytomass on the control larch and pine forests is higher for 5 and 10 times than that in the burnt areas, respectively. The work carried out revealed the effect of forest fires on the morphological structure (formation of pyrogenic layer, manifestation of pyro- and cryoturbations), the depth of thawing, the water regime of permafrost soils under larch and pine forests on control and burnt sites in the first year after strong fires. The soils in the study area are predominantly permafrost illuvial-ferruginous podzols. The study revealed an increase in the permafrost table depth of these soils, an increase in the level of ground water, and a decrease in acidity in the upper part of the profile. Intense ash formation was found due to the burning of litter. The characteristic of the current state of vegetation and soil cover is given.

Keywords: burned area; above-ground phytomass stock; permafrost soils; morphological features; physical and chemical properties; transformation.

ВВЕДЕНИЕ

Якутия относится к регионам с повышенной плотностью пожаров и высокой горимостью лесов. В 2021 г. на территории республики выгорело более 8 млн га леса при лесопокрытой площади около 131 млн га, что сделало их самыми масштабными в настоящее время и значительно увеличило площадь гарей с полностью уничтоженным древостоем. О роли огня как фактора отбора растений в подлеске, травяно-кустарничковом и лишайниково-моховом покровах мерзлотной области даны сведения у многих

исследователей. Назывались растения, популяции, которые проявляют доминирующее положение при послепожарной сукцессии зарастания гарей – иван-чай, вейник Лангсдорфа (Сукачев, 1912; Аболин, 1929; Тюлина, 1957; Чугунова, 1964), из кустарников – ольха кустарниковая, береза тощая и кустарниковая, рододендрон даурский (Тюлина, 1962; Щербаков, 1964). Сведения о лесовозобновлении на гарях в среднетаежной подзоне Якутии опубликованы в работах якутских лесоведов (Исаев, 1993, 2000; Тимофеев и др., 1994; Исаев и др., 2004, Лыткина, 2005а, 2005б, 2010).

Пирогенез является одной из главных причин, изменяющих морфологические и физические свойства лесных почв в коротком промежутке времени (Добровольский, 2002; Зайдельман, Шваров, 2002; Дымов и др., 2014; Краснощеков, 2014). При сильных пожарах выгорают подстилка, органогенные горизонты, корни и внутрипочвенный детрит, резко нарушается направление процессов накопления и преобразования органики (Прокушкин и др., 2011). При близком залегании многолетней мерзлоты уничтожение растительности и подстилки огнем нарушает гидротермический режим почв и приводит к увеличению глубины протаивания, иссушению или переувлажнению почвы (Sofronov et al., 2000). Эти процессы в конкретных условиях корректируются в зависимости от положения в микро-, мезо- и макрорельефе, как правило, сопровождаются уменьшением транспирационного расхода влаги, повышением фильтрации влаги вследствие деградации подстилки и увеличением плотности грунта (Карпель, Короходкина, 1979; Тарабукина, 2003; Тарабукина, Саввинов, 1990; Чевычелов, 2002; Desyatkin et al., 2022). В условиях криолитозоны пожары нарушают мерзлотный режим и приводят к активизации криогенной деградации почв, что требует разработки особых подходов их охраны и исследований (Тарабукина, Шумилов, 2009; Мергелов, 2015; Desyatkin A. et al., 2021).

Послепожарные изменения в почвах на легких породах в пределах криолитозоны не изучены, имеются данные по пирогенным почвам сосняков вне мерзлотной области (Дымов и др., 2014; Шахматова, 2015; Ильичев и др., 2011; Валевиц, Мерзляков, 2021; и др.). Почвы Коми, Бурятии, Западной Сибири, сформированные на легких породах, в профиле имеют пирогенную полициклич-

ность. В этих регионах после уничтожения лесной подстилки и маломощного органогенного горизонта при лесных пожарах, почвообразование фактически запускается заново, обуславливая в будущем слоистое строение профиля. Оно связано с тем, что почвы без защитной функции растительности и ее корневой системы не устойчивы к склоновой (Габбасова и др, 2019) и ветровой эрозии (Desyatkin et al., 2021), склонны к интенсивному переотложению.

Исследование влияния пожара на физико-химические свойства почвы (рН, гумус, обменные основания, степень насыщенности) на настоящий момент приводит к достаточно неоднозначным, иногда даже противоположным результатам (Цибарт, Геннадиев, 2008). При изучении пирогенных почв Якутии различными исследователями отмечалось как уменьшение, так и увеличение содержания органического углерода на разных этапах постпирогенного функционирования (Мергелов, 2015), увеличение обменного кальция и магния, увеличение доли фракции крупной пыли из-за дезинтеграции песка (Чевычелов, Шахматова, 2018), увеличение рН (Тарабукина, 2003; Тарабукина, Саввинов, 1990).

В настоящей статье приводятся результаты изучения влияния огневой активности на трансформацию растительности и мерзлотных почв на легких породах Центральной Якутии. Полученные материалы представляют собой банк данных для проведения мониторинга происходящих изменений в растительности и почвах с первого года после выгорания при восстановительной сукцессии растительности изучаемой территории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования с геоморфологической точки зрения находится в пределах Центрально-Якутской аллювиальной равнины с преобладанием современных криогенных и эоловых процессов и входит в Приленско-Виллойский район Среднесибирской перигляциальной области (Унифицированная ..., 2010). Почвообразующие породы представлены древнеаллювиальными песками, супесями и легкими суглинками русловой и прирусловой фации, часто осложненными вторичными эоловыми формами рельефа (Катасонова, Толстов, 1963; Бойцов, Шепелев, 1976). Повсеместно развиты сглажено-бугристые эоловые формы рельефа, хорошо

закрепленные лесной растительностью. Мониторинговые участки для контроля влияния крупных пожаров на лесные экосистемы заложены в окрестностях с. Асыма Горного района РС (Я) (рис. 1).

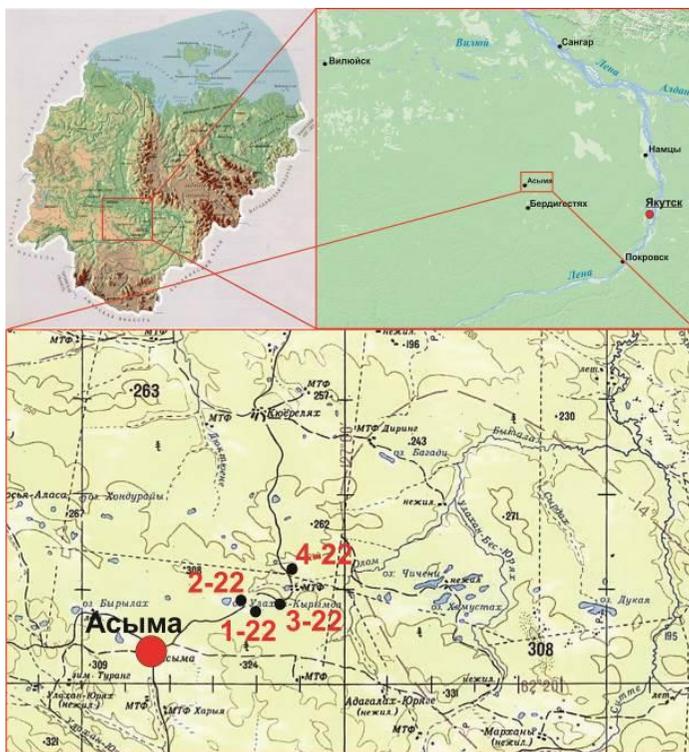


Рис. 1. Район исследований.
Fig. 1. Research area.

В июне 2022 г. по результатам рекогносцировочных исследований выбраны 4 контрольных мониторинговых участка (рис. 2): площадка 1 – контроль на нетронутом пожаром багульниково-брусничном лиственничнике; площадка 2 – горелый участок однотипного леса (лиственничная гарь 2021 г.); площадка 3 – контроль на нетронутом огнем участке в сосновом толочнянково-

бруснично-лишайниковом лесу; площадка 4 – горелый участок
однотипного леса (сосновая гарь 2021 г.).



Площадка 1

Площадка 2



Площадка 3

Площадка 4

Рис. 2. Общий вид контрольных площадок.

Fig. 2. General view of control sites.

Изученная территория по лесорастительному районированию относится к Центральному Якутскому аласно-среднетаежному округу (Щербаков, 1975). По геоботаническому районированию исследованная территория относится к Центрально-Якутской среднетаежной подпровинции, которая характеризуется при общем преобладании лиственничных лесов, преимущественно брусничных и багульниковых, развитием крупных массивов сосновых лесов (Андреев и др., 1987). На всех мониторинговых участках проведены описания растительности, учет надземной фитомассы травяного покрова проведен методом укосов на стандартных площадках размером 1×1 м в 3-кратной повторности в начале второй половины июля. Растительные образцы высушены до воздушно-сухого состояния, разобраны по видам, определена масса каждого вида. Описания травянистой растительности выполнены с использованием шкалы облия Браун-Бланке. Названия видов даны согласно конспекту флоры Азиатской России (Конспект ..., 2012). Изучение запасов и состава опада проведено с отбором образцов на контрольных участках и гарях с помощью рамок 50×50 см в 3-кратной повторности.

По почвенно-географическому районированию исследованная территория относится к Центрально-Якутской почвенной провинции холодных мерзлотных почв Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной почвенно-климатической области (Национальный ..., 2011). По почвенной карте – это в основном зона распространения палевых типичных и осолоделых почв, но в действительности на изученной территории также широко распространены почвы, сформированные на кислых песчаных породах эолово-аллювиального происхождения. В районе закладки мониторинговых площадок почвенный покров представлен песчаными мерзлотными подзолами иллювиально-железистыми под лиственничными лесами и боровыми слабоподзоленными почвами под сосняками (Единый ..., 2014).

Почвенные исследования в полевых условиях проводились в июле, августе, сентябре 2022 г., разрезы закладывались на каждой контрольной площадке с целью изучения полных профилей почв. На каждой площадке заложены и детально описаны разрезы до верхней границы многолетнемерзлых пород или верховодки, про-

изведен отбор образцов по генетическим горизонтам. Для изучения состава и свойств почв были выполнены стандартные аналитические исследования: гранулометрический состав (пирофосфатный метод в модификации Качинского), рН водный, содержание гумуса по Тюрину с титриметрическим окончанием, обменные катионы, гидролитическая кислотность (Аринушкина, 1970; Качинский, 1958). В почвах также определялись две формы железа: аморфная – методом Тамма, и несиликатная – методом Мера-Джексона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Площадка 1, лиственничник багульниково-брусничный (контроль)

Разрез 1-22 (62°23'56.0" N, 126°48'18.4" E), заложен 02.08.2022 г. Центральная часть Лено-Виллюйского водораздела, в 9 км северо-восточнее от села Асыма, в южной части бассейна ручья Кырымда, притока третьего порядка р. Ситте. Нетронутый пожарами багульниково-брусничный лиственничник. Древостой из *Larix cajanderi* (сомкнутость крон 0.6), средняя высота 10–12 м. В подлеске единично *Salix bebbiana*, высота 30 см. *Betula platyphylla* сомкнутость 0.2, высота 3–5 м. В подросте единично отмечена *Pinus sylvestris*, высота до 70 см. Описание травяно-кустарничкового покрова приведено в таблице 1. Лишайниково-моховый покров с покрытием 70%, из них *Dicranum undulatum* – 50%, *Cladonia stellaris* – 15%, *Cetraria laevigata* – 5%. Запас надземной фитомассы травяного покрова составляет 1.261 т/га (табл. 2). На контрольном участке наибольшую фитомассу имеют типично лесные виды, растения-виоленты (*Vaccinium vitis-idaea* – 0.44, *Vaccinium uliginosum* – 0.55 т/га). Согласно шкале природной пожарной опасности для летнего времени по А.П. Яковлеву (Яковлев, 1979), лиственничник багульниково-брусничный относится ко II классу (высокопожароопасные, тип напочвенных горючих материалов – хвоевой).

Микрорельеф неровный, слабовыраженный полигонально-трещиноватый. Мощность лесной подстилки в нетронутых пожарами лиственничных лесах небольшая, редко превышает 2 см. Степень разложения очень низкая, в нижней части под мохо-

вым очесом переходит в тонкий грубогумусовый или перегнойный горизонт, границу перехода иногда уловить достаточно сложно из-за маломощности органогенных слоев (общая мощность подстилочно-торфяного горизонта с учетом опада – 4 см). Запас опада 3.55 т/га. Фракционный состав здесь характеризуется резким преобладанием доли хвои (49%), в меньшей степени шишками, ветками и листьями.

Таблица 1. Описания травяно-кустарничковой растительности контрольных площадок

Table 1. Descriptions of grass-shrubbery vegetation of control plots

Вид	Обилие	Высота, см	Фенофаза
Оп. 2 Лиственничник багульниково-брусничный			
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4*	10	Вег.
<i>Ledum palustre</i>	2	30	Вег.
<i>Vaccinium uliginosum</i>	2	20	Вег./пл.
<i>Rosa acicularis</i>	1	10	Вег.
<i>Empetrum nigrum</i>	1	10	Вег.
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2	20–45	Цв./вег.
<i>Equisetum pratense</i>	1	20	Вег.
<i>Agrostis trinii</i>	1	45	Цв.
<i>Carex sp.</i>	1	20	Вег.
<i>Crepis tectorum</i>	+	40	Цв.
<i>Sanguisorba officinalis</i>	1	45	пл.
<i>Minuartia laricina</i>	+	12	Цв.
<i>Acetosa thyrsoiflora</i>	+	45	Пл.
Оп. 1 Лиственничная гарь			
<i>Ledum palustre</i>	2	15	Вег.
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	1	3-5	Вег.
<i>Vaccinium uliginosum</i>	+	10	Вег.
<i>Chamerion angustifolium</i>	3	10–15	Вег.
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	1	40	Цв.
<i>Equisetum arvense</i>	1	15	Вег.
<i>Rubus arcticus</i>	1	5	Вег.
<i>Carex sp.</i>	1	10	Вег.
<i>Poa pratensis</i>	+	50	Цв.
<i>Sanguisorba officinalis</i>	+	30	Цв./пл.

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вид	Обилие	Высота, см	Фенофаза
Оп. 3. Сосняк толокнянково-бруснично-лишайниковый			
<i>Ledum palustre</i>	2	40–45	Вер.
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	2	5	Вер.
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	3	5–10	Вер.
<i>Carex sp.</i>	1	20	Вер.
Оп. 5 Сосновая гарь			
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	+	5	Вер.
<i>Vaccinium uliginosum</i>	1	10	Вер.
<i>Rosa acicularis</i>	2	20	Вер.
<i>Empetrum nigrum</i>	1	10	Вер.
<i>Ledum palustre</i>	+	15	Вер.
<i>Chamerion angustifolium</i>	1	20	Вер.
<i>Calamagrostis lansdorffii</i>	2	50–60	Вер./цв.
<i>Equisetum arvense</i>	2	20	Вер.
<i>Carex sp.</i>	1	20	Вер.
<i>Crepis tectorum</i>	+	25	Цв./пл.
<i>Sanguisorba officinalis</i>	1	45	пл.
<i>Minuartia laricina</i>	+	10	Цв.
<i>Anemone sylvestris</i>	+	10	Вер.
<i>Eremogone saxatilis</i>	+	30	Пл.
<i>Aquilegia parviflora</i>	+	30	Цв.

Примечание. * – баллы по шкале обилия Браун-Бланке: 1 – 1–5%, 2 – 5–20%, 3 – 20–50%, 4 – 50–75%, 5 – более 75%.

Note. * – Brown-Blanquet abundance scale scores: 1 – 1–5%, 2 – 5–20%, 3 – 20–50%, 4 – 50–75%, 5 – более 75%.

Запас надземной фитомассы травяного покрова составляет 1.261 т/га (табл. 2). На контрольном участке наибольшую фитомассу имеют типично лесные виды, растения-виоленты (*Vaccinium vitis-idaea* – 0.44, *Vaccinium uliginosum* – 0.55т/га).

Глубина протаивания почвы в конце мая составляла 31 см, а в конце теплого периода (в первой декаде октября) – 183 см. Уровень верховодки в течение летнего периода находился на глубине: в мае – 27 см; в августе–начале октября – 100–110 см (рис. 3).

Морфологическое строение профиля: О (0–4 см) – АО (4–5/10 см) – Е/ЕВ (5/10–10/24 см) – ВF (10/24–24/36 см) – В (24/36–42 см) – ВС/С (42–52/65 см) – С/АЕ' (52/65–67 см) – Cf/ВF' (67–69/74 см) – С (69/74–98 см). Тип почвы: мерзлотный подзол иллювиально-железистый. Под небольшой подстилкой вскрывается грубогумусовый горизонт АО, который сменяется слегка осветленным горизонтом Е (согласно ЕГРПР, подзолистый горизонт обозначается индексом А₂). Ниже выделяется иллювиальный горизонт ВF с охристыми пятнами. В профиле на глубине 50–60 см вскрывается погребенная почва такой же типовой принадлежности – встречаются фрагменты гумусового слоя и горизонта Е.

Таблица 2. Запас надземной фитомассы травяно-кустарничкового покрова контрольных площадок

Table 2. Supply of above-ground phytomass of grass-shrubbery cover control plots

№	Вид	Надземная фитомасса (в.с. в.), т/га
Лиственничник багульниково-брусничный		
1	<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	0.02
2	<i>Carex sp.</i>	0.1
3	<i>Vaccinium uliginosum</i>	0.55
4	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	0.44
5	<i>Empetrum nigrum</i>	0.13
6	<i>Equisetum arvense</i>	0.007
7	<i>Sanguisorba officinalis</i>	0.01
8	<i>Antennaria dioica</i>	0.004
	Всего:	1.261
Лиственничная гарь		
9	<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	0.09
10	<i>Carex sp.</i>	0.009
11	<i>Chamerion angustifolium</i>	0.1
12	<i>Ledum palustre</i>	0.02
13	<i>Equisetum arvense</i>	0.001
14	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	0.002
	Всего:	0.222

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№	Вид	Надземная фитомасса (в.-с. в.), т/га
Сосняк толокнянково-бруснично-лишайниковый		
15	<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	1.36
16	<i>Ledum palustre</i>	0.13
17	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	0.08
	Всего:	1.57
Сосновая гарь		
19	<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	0.07
20	<i>Carex sp.</i>	0.01
21	<i>Vaccinium uliginosum</i>	0.006
22	<i>Equisetum arvense</i>	0.02
23	<i>Crepis tectorum</i>	0.003
24	<i>Chamerion angustifolium</i>	0.01
	Всего:	0.119

Почва песчаная с преобладанием фракции крупного и среднего песка (табл. 3). По данным гранулометрического состава наблюдается слабая дифференциация по илу – максимальное накопление приблизительно находится на уровне горизонтов ВF и В. Реакция среды при движении вниз по профилю колеблется от кислой до слабокислой (рН 4.6–6.0, табл. 4). Потеря при прокаливании в грубогумусовом горизонте составляет 29%, в минеральной толще содержание гумуса низкое и почти не превышает 0.5%, распределение гумуса по профилю имеет тенденцию к уменьшению при движении вниз, но снова слегка увеличивается на уровне погребенных слоев. Прослойка органики на глубине 50–60 см имеет относительно высокое содержание гумуса – до 4%. Почвы не насыщены основаниями в верхней половине профиля и слабо насыщены в нижней на фоне небольшого общего содержания обменных кальция и магния.

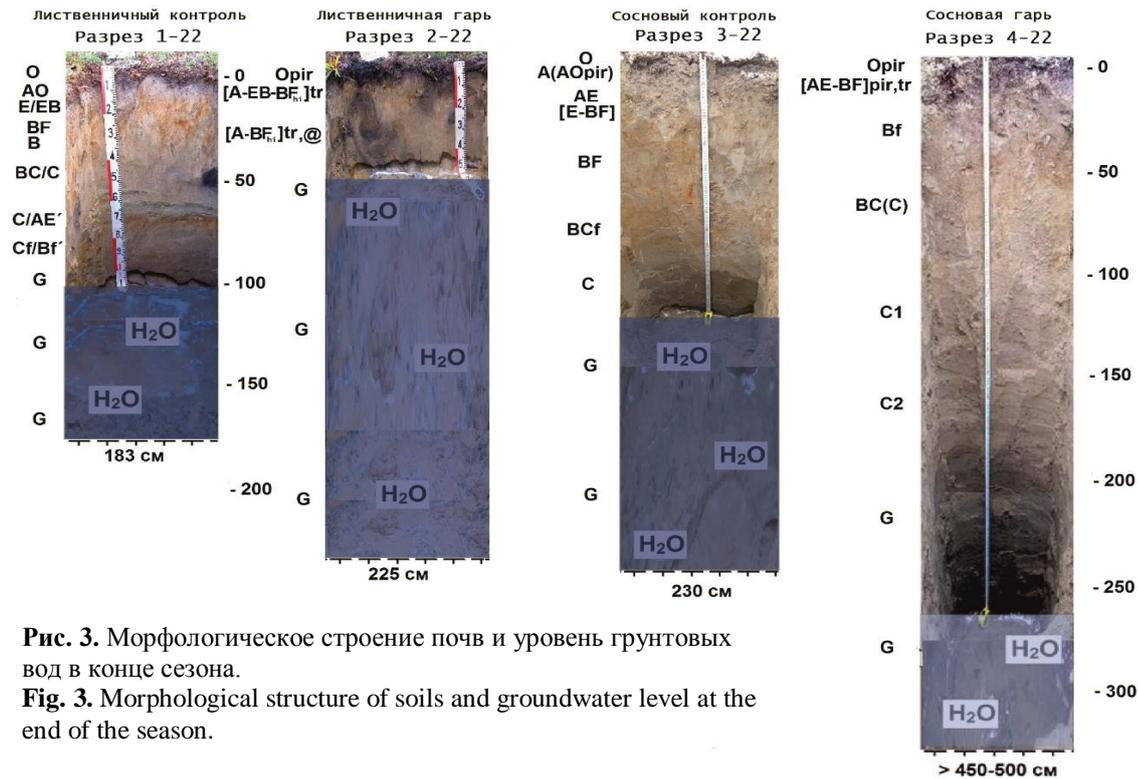


Рис. 3. Морфологическое строение почв и уровень грунтовых вод в конце сезона.
Fig. 3. Morphological structure of soils and groundwater level at the end of the season.

Таблица 3. Гранулометрический состав почв
Table 3. Granulometric composition of soils

Номер разреза	Мощность, см	Гигро- влага, %	Удель- ный вес	Количество частиц (%) с диаметром, мм						Сумма частиц <0.01 мм
				1–0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001	
Лиственничники										
Р-1.22 (конт- роль)	5–10	0.27	2.60	52.5	39.1	3.3	0.8	0.4	3.9	5.1
	10–24	0.20	2.65	59.3	32.1	3.9	0.6	1.2	2.9	4.7
	24–42	0.07	2.60	55.8	35.2	1.9	1.0	3.0	3.1	7.1
	42–52	0.13	2.60	55.7	39.6	0.8	0.2	0.4	3.3	3.9
	52–67	0.73	2.60	30.7	57.7	1.5	2.2	1.8	6.1	10.1
	67–69	0.32	2.65	58.1	34.9	1.0	1.2	4.5	0.3	6.0
	69–98	0.21	2.65	64.3	31.6	0.2	1.5	0.4	2.0	3.9
	Орг. просл.	0.22	2.55	41.5	45.6	2.5	1.0	3.0	6.4	10.4
Р-2-22 (гарь)	2(10)–3(15) темн. пятна	1.10	2.60	61.8	31.5	0.2	1.0	0.8	4.7	6.5
	2(10)–3(15) светл. пятна	0.13	2.60	60.3	35.0	0.2	0.8	0.4	3.3	4.5
	3(15)–50 темн. пятна	1.25	2.50	54.2	33.0	0.8	2.1	1.8	8.1	12.0
	3(15)–50 светл. пятна	0.42	2.65	69.0	27.2	0.7	0.4	0.2	2.5	3.1

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Номер разреза	Мощность, см	Гигро- влага, %	Удель- ный вес	Количество частиц (%) с диаметром, мм						Сумма частиц <0.01 мм
				1–0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001	
Сосняки										
Р-3-22 (конт- роль)	2–8	0.30	2.60	56.9	35.6	1.6	0.4	2.0	3.5	5.9
	8–15	0.20	2.60	69.0	23.7	1.4	0.6	1.8	3.5	5.9
	15–62	0.20	2.60	64.8	29.7	1.2	0.6	0.4	3.3	4.3
	62–95	0.20	2.60	64.7	30.9	0.6	1.5	1.4	0.9	3.8
	95–135	0.20	2.60	61.0	32.3	2.4	0.6	0.6	3.1	4.3
Р-4-22 (гарь)	2–9	0.28	2.60	74.8	19.5	1.6	0.4	0.4	3.3	4.1
	9–34	0.14	2.60	72.9	19.1	1.0	3.6	1.1	2.3	7.0
	34–75	0.20	2.60	65.5	29.2	0.4	0.4	0.8	3.7	4.9
	75–100	0.20	2.60	71.2	19.8	1.5	3.6	0.6	3.3	7.5
	100–130	0.07	2.60	67.9	22.7	1.9	3.2	1.4	2.9	7.5

Таблица 4. Физико-химические свойства исследованных почв
Table 4. Physicochemical properties of soils

Номер разреза	Глубина отбора, см	рН _{водн}	Гумус, %, ППП*, %	Обменные катионы, ммоль/100 г		ГК**, ммоль /100 г	Степень насыщен- ности, %	Fe _{nc} (по Мера- Джексону)	Fe _a (по Тамму)
				Ca ²⁺	Mg ²⁺			мг/кг	
Лиственничники									
Р-1-22 (конт- роль)	4–5	4.64	29.21*	-	-	20.00	-	1546.46	1663.22
	5(10)– 10(24)	4.68	0.52	1.10	0.50	1.37	53.87	131.87	148.02
	10(24)– 24(36)	5.09	0.26	1.20	0.60	1.18	60.40	438.13	494.87
	24(36)–42	5.17	0.17	0.95	0.45	0.80	63.64	213.79	216.67
	42–52(65)	5.32	0.13	0.70	0.40	0.66	62.50	237.65	256.58
	52(65)–67	5.45	0.50	3.80	1.85	1.53	78.69	489.51	600.00
	67–69(74)	5.65	0.18	1.50	0.70	0.80	73.33	905.65	1045.24
	69(74)–98	5.96	0.11	1.25	0.55	0.61	74.69	213.26	233.54
Орг. просл.	5.22	4.06	6.65	2.15	4.71	65.14	1110.38	1247.92	

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Номер разреза	Глубина отбора, см	рН _{водн}	Гумус, %, ППП*, %	Обменные катионы, ммоль/100 г		ГК**, ммоль /100 г	Степень насыщен- ности, %	Fe _{nc} (по Мера- Джексону)	Fe _a (по Тамму)
				Ca ²⁺	Mg ²⁺			мг/кг	
Лиственничники									
Р-2-22 (гарь)	0–2(10) риг	5.84	33.52*	-	-	45.90	-	-	-
	2(10)–3(15) темн. пятна	4.29	4.33	1.80	0.85	3.69	41.80	4353.84	4186.14
	2(10)–3(15) светл. пятна	4.25	2.16	2.20	0.95	5.73	35.47	274.73	291.02
	3(15)–50 темн. пятна	4.98	5.80	4.00	1.95	10.30	36.62	2244.93	2538.20
	3(15)–50 светл. пятна	4.19	0.14	0.85	0.40	0.83	60.10	200.15	215.55

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Номер разреза	Глубина отбора, см	рН _{водн}	Гумус, %, ППП*, %	Обменные катионы, ммоль/100 г		ГК**, ммоль /100 г	Степень насыщен- ности, %	Fe _{nc} (по Мера- Джексону)	Fe _a (по Тамму)
				Ca ²⁺	Mg ²⁺			мг/кг	
Сосняки									
Р-3-22 (конт- роль)	1–2(3)	4.53	17.56*	2.70	0.65	7.11	32.03	-	-
	2(3)–4(8)	4.94	2.94	2.15	0.35	3.63	40.78	826.35	972.46
	4(8)–15(24)	4.70	0.77	0.65	0.30	2.16	30.55	516.71	537.31
	15(24)– 62(68)	5.04	0.14	0.73	0.47	1.01	54.30	841.90	807.50
	62(68)–95	5.44	0.10	1.05	0.45	0.61	71.09	160.76	162.85
	95–135	5.62	0.11	1.50	0.55	0,70	74,55	403.80	476.50

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Номер разреза	Глубина отбора, см	рН _{воды}	Гумус, %, ППП*, %	Обменные катионы, ммоль/100 г		ГК**, ммоль /100 г	Степень насыщен- ности, %	Fe _{nc} (по Мера- Джексону)	Fe _a (по Тамму)
				Ca ²⁺	Mg ²⁺			мг/кг	
Сосняки									
Р-4-22 (гарь)	0–2p _{ir}	6.06	53.14*	-	-	-	-	-	-
	2–9(14)	4.88	1.74	1.00	0.45	2.07	41.19	5021.92	4510.98
	9(14)– 34(42)	4.63	0.19	0.35	0.18	0.85	38.41	294.12	278.09
	34(42)–75	4.80	0.10	0.93	0.27	0.75	61.54	95.67	85.61
	75–100	5.26	0.05	0.60	0.25	0.44	65.89	31.97	51.29
	100–130	5.34	0.05	0.58	0.27	0.43	66.41	38.87	30.68

Примечание. * – Приведено значение потери при прокаливании, ** – гидролитическая кислотность.

Note. * – The value of loss on ignition is given, ** – hydrolytic acidity.

Площадка 2, лиственничная гарь

Разрез 2-22 (62°24'1.2" N, 126°47'35.2" E), заложен 02.08.2022 г. Центральная часть Лено-Вилуойского водораздела, в 8.5 км северо-восточнее от села Асыма, в южной части бассейна ручья Кырымда, притока третьего порядка р. Ситте. Гарь 2021 г. на месте багульниково-брусничного лиственничника (Оп-1). Подстилка выгорела на всю свою небольшую мощность, затронув верхнюю часть грубогумусового горизонта, некоторые обугленные фрагменты сохранили свою структуру. Степень силы лесного пожара – IV–V (Матвеев, Матвеев, 2002). Количество валежа среднее.

Древостой из *Larix cajanderi* имеет невысокую сомкнутость – 25–30%, средняя высота молодых сосен 6–7 м. Подлесок представлен *Betula platyphylla* высотой 80–90 см с примесью *Salix bebbiana* высотой 80–100 см. Сомкнутость подлеска 10%. В подросте единично отмечена *Pinus sylvestris* высотой до 150 см. Описание травяно-кустарничкового покрова приведено в таблице 1. Лишайниково-моховый покров с покрытием 40%, из них *Marchantia polymorpha* – 20%, *Ceratodon purpureus* – 15%, *Cladonia stellaris* – 5%.

На начальной стадии зарастания лиственничной гари бурно развиваются виды-пирофиты (*Chamerion angustifolium*, *Marchantia polymorpha*). Запас общей надземной фитомассы травяно-кустарничкового покрова равен 0.222 т/га в воздушно-сухом весе (в.-с. в.), что в 5.6 раза ниже запаса надземной фитомассы травяного покрова на контрольном участке. По запасу надземной фитомассы *Chamerion angustifolium* имеет наибольшее значение (0.09 т/га) (табл. 2). Масса сгоревшей травяно-кустарничковой растительности на лиственничной гари составляет 1.04 т/га.

Верхний органогенный горизонт с опадом выгорел на всю свою небольшую мощность, затронув скопления корней и остатков растений в грубогумусовом горизонте и сформировав пирогенный горизонт Опр. Средняя мощность пирогенного слоя около 2 см (по трещинам больше), который включает обугленные фрагменты древесных растений. В слое высока доля фракции <1 мм (рис. 4), образующейся за счет интенсивной пирогенной дефрагментации растительных остатков, приводящей к образованию зо-

лы. В опаде полностью выгорели включения листьев, травы, коры и шишек. Масса пирогенного слоя на гари лиственничного леса оценивается в 3.88 т/га.

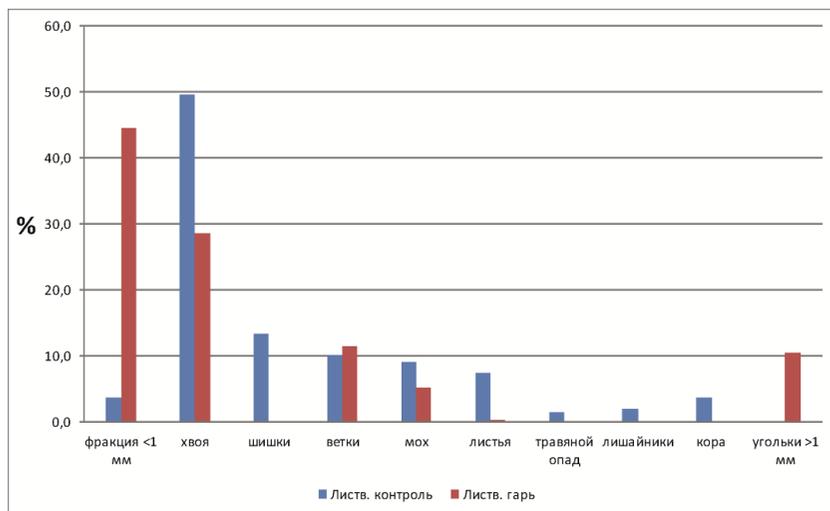


Рис. 4. Фракционный состав опада и пирогенного слоя в контроле и на гари лиственничника.

Fig. 4. Fractional composition of the litter and pyrogenic layer in the control and burnt larch forest.

Микрорельеф нарушенный, много вывалов. Глубина протаивания почвы в конце мая составляла 25–30 см, а в конце теплого периода – 225 см, при этом в профиле накапливается в зависимости от степени оттаивания почвы надмерзлотная верховодка, в начале лета с глубины 30, в конце лета – 55–70 см (рис. 3). Морфологическое строение профиля следующее: O_{pr} (0–2/10 см) – [A - EB - BFhi]tr (2/10–3/15 см) – [A - BFhi]tr,@ (3/15–50 см), ниже до мерзлоты почва залита водой. Тип почвы: подзол иллювиально-железистый постпирогенный криотурбированный. Профиль несет в себе признаки послепожарной деградации. Почва переувлажнена. Верхний горизонт и подстилка представляют собой слой из сгоревших остатков растений. В минеральной толще наблюдаются

признаки перемешивания – темноокрашенные пятна по всему профилю и осветленные фрагменты в верхней части. При этом турбации вызваны, возможно, как пирогенными, так и криогенными процессами.

Гранулометрический состав почвы преимущественно песчаный, встречаются скопления супеси в виде темных пятен. В нижней части ила больше, чем в средней (табл. 3). Потеря при прокаливании в опаленном пирогенном слое (O_{pir}) составляет 33.5%, реакция среды – 5.8, что выше, чем в органогенном горизонте почвы в контроле лиственничника (табл. 4). Уменьшение кислотности в верхней части профиля подтверждает наблюдения некоторых исследователей, которые связывают это с тем, что зола нейтрализует органические кислоты (Гынинова, Сымпилова, 1999; Цибарт, Геннадиев, 2009; и др.). Турбации вызвали неравномерность в распределении содержания гумуса в минеральной песчаной толще, которое, в зависимости от влияния микрорельефа, достаточно сильно варьирует. Почва не насыщена основаниями.

Площадка 3, сосняк толокнянково-бруснично-лишайниковый (контроль)

Разрез Р-3-22(62°24'2.1" N, 126°52'6.0" E), 03.08.2022 г. Центральная часть Лено-Вилуйского водораздела, в 12 км северо-восточнее от села Асыма, в южной части бассейна той же реки. Сосняк толокнянково-бруснично-лишайниковый не тронутый недавним пожаром. Участок имеет признаки низового пожара, прошедшего более 5 лет назад, валеж единичный, древостой не пострадал во время ранних пожаров, процессы восстановления напочвенной растительности идут удовлетворительно. Древостой из *Pinus sylvestris* чистый, состав 10С. Сомкнутость крон 0.6. Средняя высота 10–15 м. Описание травяно-кустарничкового покрова приведено в таблице 3. Лишайниковый покров занимает 40% и состоит из *Cladonia arbuscula*, *Cladonia cornuta*. Исходя из шкалы природной пожарной опасности для летнего времени по Яковлеву (Яковлев, 1979), сосняк толокнянково-бруснично-лишайниковый относится к классу I (очень высокопожароопасные, лишайниковый тип горючих материалов).

В сосняке бруснично-толокнянково-лишайниковом запас

надземной фитомассы травяно-кустарничкового покрова составляет 1.57 т/га. Наибольший запас надземной фитомассы имеет *Arc-tostaphylos uva-ursi* (1.36 т/га). На втором месте – *Ledum palustre* с надземной фитомассой, равной 0.13 т/га. Наименьшую надземную фитомассу имеет *Vaccinium vitis-idaea* (0.08 т/га). Опад в основном состоит из хвои (50%), в меньшей степени из шишек, коры и веток. Запас опада в слабо затронутом пожарами сосняке составляет 2.22 т/га. Общая мощность подстилки и грубогумусового горизонта достигает максимум 3 см.

Микрорельеф ровный. Глубина протаивания почвы в конце мая составляла 50 см, а в конце теплого периода (в первой декаде октября) – 250 см. Уровень верховодки в течение летнего периода находилась на глубине: в мае – 30 см; в начале октября – 120 см (рис. 3). Морфологическое строение профиля: O (0–1 см) – AO(AO_{rig}) (1–2/3 см) – AEфрагм (2/3–4/8 см) – [E-BF]tr (4/8–15/24 см) – Bf (15/24–62/68 см) – BCf (62/68–95 см) – C (95–135 см). Тип почвы: мерзлотная боровая слабооподзоленная поверхностно-турбированная, или, по классификации 2004 г., подзол иллювиально-железистый поверхностно-турбированный. В подстилке и органогенном горизонте есть пирогенные признаки в виде включений угольков и уменьшения мощности из-за горения. Оподзоленный горизонт – фрагментарный (при большем увлажнении лучше морфологически выделяется), немного смешан с иллювиальным горизонтом вследствие пожаров. Почвообразующая порода представлена эолово-аллювиальными слоистыми песчаными наносами светло-бежевого оттенка.

Анализ данных выявил, что верхний органогенный горизонт имеет реакцию среды около 4.5, ниже она постепенно увеличивается до 5.6 (табл. 4). Динамика среды почти без отрицательных пиков – небольшое уменьшение на общем фоне наблюдается в турбированном слое, что связано с сохранившимися фрагментами подзолистого горизонта в нем. Потеря при прокаливании в верхнем органогенном слое составляет 17.6%. Содержание гумуса в оподзоленном горизонте AE – 3%, в нижней части профиля гумуса мало. Почвы не насыщены основаниями в верхней части профиля и слабо насыщены – в нижней. Минимальные значения по степени насыщенности и накопления обменных катионов отмечаются в

горизонте [E-BF]tr.

Площадка 4, сосновая гарь

Разрез Р-4-22 (62°25'53.4" N, 126°54'1.9" E), заложен 03.08.2022 г. Центральная часть Лено-Вилуйского водораздела, в 15 км северо-восточнее от села Асыма, в южной части бассейна той же реки. Гарь сосняка толокнянково-бруснично-лишайникового 2021 г. Мезорельеф ровный, много вывалов и проплешин на местах, где подстилка сгорела полностью, обнажившийся песок имеет яркий охристо-красноватый оттенок. Древостой выгорел полностью, сохранился редкий жердняк. Степень силы лесного пожара – IV. Состав соснового древостоя чистый, 10С (*Pinus sylvestris*). Сомкнутость крон 0.2. Средняя высота 7–10 м. Описание травяно-кустарничкового яруса приведено в таблице 1.

На гари сосняка запас надземной фитомассы травяного покрова составил 0.119 т/га (табл. 2). Запас надземной фитомассы характерного вида послепожарной сукцессии *Chamerion angustifolium* равен 0.01т/га, на третьем месте после *Calamagrostis lansdorffii* (0.07т/га) и *Equisetum arvense* (0.02 т/га). Отмечено присутствие растения-эксплерента, нелесного синантропного вида (*Crepis tectorum*) с наименьшей надземной фитомассой (0.003 т/га). Запас надземной фитомассы травяного покрова на гари в 13.1 раза ниже, чем на контрольном участке (табл. 2). Масса сгоревшей травяно-кустарничковой растительности на сосновой гари оценивается в 1.45 т/га.

После уничтожения пожаром напочвенного покрова наблюдается развеивание остатков подстилки, золы ветром и обнажение минеральных слоев. В сформировавшемся из-за горения опада и органогенного слоя фрагментарном пирогенном горизонте (мощностью максимум до 2 см) увеличивается мелкая фракция за счет увеличения содержания золы (как и в листовничной гари), появляются угольки, резко снижается доля других фракций (рис. 5). Запас пирогенного слоя на участке в среднем составляет 1.82 т/га.

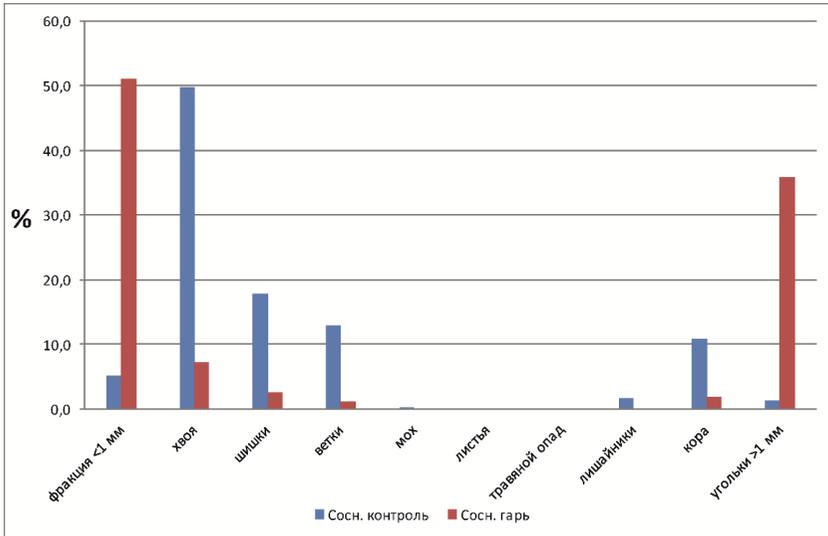


Рис. 5. Фракционный состав опада и пирогенного слоя в контроле и на гарь сосняка.

Fig. 5. Fractional composition of litter and pyrogenic layer in the control and burnt pine forest.

Микрорельеф неровный, мелкобугристый. Глубина протаивания почвы в конце мая составляла 50–60 см, а в конце теплого периода (в первой декаде октября) – более 450 см. Уровень верховодки в течение летнего периода находилась на глубине: в мае – 30 см; в начале октября – 265 см (рис. 3). Как правило, в таких почвах при зимнем промерзании сезонная мерзлота уже не смыкается с верхней границей многолетнемерзлых пород. Морфологическое строение профиля: O_{pir}(0–2 см) – [AE-BF]_{pir,tr} (2–9/14 см) – B_f (9/14–34/42 см) – BC(C) (34/42–75 см) – C₁ (75–100 см) – C₂ (100–130 см). Тип почвы: мерзлотная боровая слабооподзоленная постпирогенная почва, или, по классификации 2004 г., подзол иллювиально-железистый поверхностно-турбированный пирогенный. Под небольшим пирогенным слоем залегает нарушенный турбированный горизонт красновато-кирпичного цвета с еле заметными фрагментами оподзоленного горизонта. Сильное окисление до

трехвалентного железа связано с действием высоких температур во время пожаров, а также с воздействием экзогенных факторов (воздуха и влаги). Почвообразующая порода представлена эолово-аллювиальными слоистыми наносами светло-бежевого оттенка.

Почва песчаная, в золе (остатках подстилки и органогенного горизонта) реакция среды достигает значения рН 6.1 (слабокислая), ниже (в железненном слое) – кислая (рН 4.8), еще ниже наблюдается постепенное увеличение реакции среды (от рН 4.6 до 5.3). Повышение рН почвы в верхней части связано с накоплением золы, потеря при прокаливании в золе составляет 53.1% (табл. 4). При этом содержание гумуса в верхнем нарушенном слое равно 1.7%, ниже данный показатель резко уменьшается и составляет 0.05–0.2%, что характерно для всех почв, сформированных на песчаных отложениях Центральной Якутии (Десяткин, 1984, 2008; Десяткин и др., 2009). Почва преимущественно не насыщена основаниями.

Лесные пожары – это мощный экологический фактор, вызывающий стрессовые трансформации растительного покрова и современного почвообразования охваченных огнем территорий. Последствия влияния огня многолики. Прежде всего, это уничтожение первоначального растительного покрова и запуск в последующем восстановительных сукцессий. При пожарах вместе с растительным покровом сгорают верхние органогенные горизонты почв, изменяя традиционные морфологические признаки лесных почв. При сгорании растительного материала лесов и почв освобождаются огромные объемы органического углерода, их производные, попадая в атмосферу, увеличивают содержание парниковых газов, а высвобожденные при этом зольные элементы, скапливаясь на поверхности земли, накладывают отпечаток на физико-химические свойства почв.

В растительном покрове наиболее существенные изменения между соседними вегетационными сезонами происходят в первых стадиях лесовозобновления. Далее скорость замедляется, что в целом типично для пирогенной динамики лесов криолитозоны (Лыткина, 2005б). На начальной стадии зарастания лиственничной гари отмечено активное развитие видов – пирофитов (*Chamerion angustifolium* с надземной фитомассой, равной 0.1 т/га, в 5 раз пре-

вышающей надземную фитомассу на контрольном участке, *Marchantia polymorpha* с проективным покрытием 20%). В отличие от гари, на контрольном участке наибольшую фитомассу имеют типично лесные виды, растения-виоленты (*Vaccinium vitis-idaea* – 0.44, *Vaccinium uliginosum* – 0.55 т/га). Запас надземной фитомассы травяного покрова на контрольном участке лиственничника багульниково-брусничного в 5.6 раза выше, чем на гари. И по видовому составу разнообразие выше на контрольном участке.

На гари сосняка запас надземной фитомассы характерного вида послепожарной сукцессии – *Chamerion angustifolium* – небольшой (0.01 т/га). Отмечено присутствие растения-эксплерента, не лесного синантропного вида (*Crepis tectorum*) с наименьшей надземной фитомассой (0.003 т/га). Запас надземной фитомассы травяного покрова на контрольном участке в 13.1 раза выше, чем на гари сосняка. При этом видовое разнообразие на гари выше, чем в контрольном сосняке.

Морфологические постпирогенные изменения в профиле почвы, вызванные непосредственным влиянием горения и нагрева поверхности почвы, четко наблюдаются сразу после пожаров. Они выражены в виде уничтожения лесной подстилки и органогенного слоя (рис. 6). В результате частого воздействия пожаров особенностью лесных почв криолитозоны является отсутствие полноценного гумусового горизонта, что было отмечено еще первыми исследователями почв региона А.А. Красюком (Красюк, 1927) и Р.А. Аболиным (Аболин, 1929). Этот феномен связан с частым уничтожением лесной подстилки (2–3 раза в столетие), источника формирования верхних органогенных и органо-минеральных горизонтов почв под лесной растительностью, и накладывает отпечаток на строение профиля почвы и ее типовую принадлежность.

На контрольном участке лиственничных лесов мерзлотный подзол иллювиально-железистый имеет следующее строение профиля: О (0–4 см) – АО (4–5/10 см) – Е/ЕВ (5/10–10/24 см) – ВF (10/24–24/36 см) – В (24/36–42 см) – ВС/С (42–52/65 см) – С/АЕ' (52/65–67 см) – Cf/BF' (67–69/74 см) – С (69/74–98 см). На гари лиственничных лесов строение профиля приобретает уже другую формулу: Оpиг (0–2/10 см) – [А - ЕВ - ВFhi]tr (2/10–3/15 см) – [А -

BFhi]tr,@ (3/15–50 см), ниже до поверхности мерзлоты почва насыщена водой.



Рис. 6. Сгоревшая лесная подстилка на поверхности почвы лиственничной гари и признаки постпирогенной турбации.

Fig. 6. Burnt forest litter on the surface of the larch burnt soil and signs of post-pyrogenic turbation.

Тип почвы меняется на подзол иллювиально-железистый постпирогенный криотурбированный. Как видно, характерные поверхностные горизонты типичных лесных почв после пожара исчезли, на их месте появился перемешанный с золой горизонт *Op_{ir}* (0–2/10 см), под которым залегают турбированные, сильно нарушенные остатки гумусового, *E_B* и *V_f* горизонтов без видимого участия иллювиального слоя. Тип почвы можно определить как подзол иллювиально-железистый постпирогенный криотурбированный.

На контрольном участке сосновых лесов мерзлотная боровая слабоподзоленая поверхностно-турбированная почва имеет формулу морфологического строения в виде: *O* (0–1 см) – *AO(AOp_{ir})* (1–2/3 см) – *AEфpaгm* (2/3–4/8 см) – *[E-BF]tr* (4/8–

15/24 см) – Bf (15/24–62/68 см) – BCf (62/68–95 см) – C (95–135 см). На гари сосновых лесов почва имеет следующее строение: Opir (0–2 см) – [AE-BF]pir,tr (2–9/14 см) – Bf (9/14–34/42 см) – BC(C) (34/42–75 см) – C₁ (75–100 см) – C₂ (100–130 см). И в этом случае исчез верхний органогенный горизонт, произошли заметные видоизменения поверхностных минеральных слоев почвы. Почву можно отнести к мерзлотной боровой слабоподзоленной постпирогенной.

Пирогенная дефрагментация живых растений и растительных остатков также сильно меняет фракционный состав подстилочного материала в сторону увеличения доли мелких частиц. При этом изменение состава в лиственничных лесах аналогично изменениям в сосняках. Но если в лиственничниках запасы опада несколько увеличиваются, то в сосняках на некоторых участках после пожаров наблюдается уменьшение запасов из-за ветровых процессов.

Данные, полученные при исследовании физико-химических свойств почв, показали, что изменения прежде всего касаются реакции среды (табл. 4). Из-за подщелачивания золой в верхней части профиля рН увеличивается, что подтверждалось ранее в работах многих исследователей. С развитием и восстановлением подстилки этот показатель, по литературным данным, как правило, снова снижается. Отсутствие значимых изменений других показателей связан с небольшим сроком функционирования почв в послепожарных условиях (первый год после крупного лесного пожара).

Еще одним из наиболее частых морфологических изменений можно считать возникновение признаков послепожарных турбаций в верхней части профиля, усиливающейся присутствием криогенеза (рис. 6.).

При пожаре в сосняке из-за сгорания лесной подстилки и под воздействием высоких температур верхний 10-сантиметровый слой мерзлотной боровой оподзоленной почвы приобрел яркий охристый оттенок вследствие окисления железа до трехвалентной формы (рис. 7). Для растений это очень неблагоприятно, так как формируется недостаток двухвалентного железа в питательной среде корнеобитаемого слоя, а железо в окисленной трехвалент-

ной форме недоступно растениям, по этой причине в первые годы после пожара они оказываются в стрессовом состоянии (Зонн, 1982). В лиственничном лесу интенсивность пожара, видимо, была слабее. При сгорании подстилки открытое пламя не сильно затронуло минеральную часть профиля подзола иллювиально-железистого – здесь сильного окисления железа не произошло (рис. 7). Увеличение содержания трехвалентной формы железа при пожарах отмечено при изучении магнитной восприимчивости в постпирогенных почвах – появлялась приповерхностная приуроченность наибольших значений этого показателя (Пискарева и др., 2019). Авторы при этом указывают, что эти изменения не стабильны во времени.



Рис. 7. Окисление железа в верхней части профиля.

Fig. 7. Iron oxidation in the upper part of the profile.

В почвах определялись две формы железа: аморфная форма методом Тамма и несиликатная форма методом Мера-Джексона (табл. 4). Считается, что соотношение этих форм железа характеризуется формулой: $Fe_{nc} - Fe_a = Fe_{окр}$, где $Fe_{окр}$ – это железо окристаллизованных соединений, но в данном случае разница показана

телей в большинстве образцов дала отрицательные значения. То есть происходит нарушение баланса экстракции, которое противоречит принципу аддитивности оксалатной (метод Тамма) и дитионитной (метод Мера-Джексона) вытяжек, и содержание аморфного железа становится больше несиликатного. В связи с этим некоторые авторы предлагают рассматривать извлекаемые из аморфных почв оксалаторастворимые соединения железа как количество железа (III), способного к образованию комплексов с активными органическими лигандами почв, обеспечивая подвижность Fe, то есть выделять их как самостоятельную группу соединений железа, которая может и не входить во фракцию “свободных” соединений, восстанавливаемых дитионитом (Водяницкий, Шоба, 2014; Бабанин и др., 1995).

Профильное распределение железа неравномерное и коррелирует с содержанием органического углерода – высокие значения отмечаются в органогенных, погребенных и турбированных слоях. Близкие по значению показатели аморфного и несиликатного железа (несмотря на отрицательный баланс) могут говорить, возможно, о низкой степени кристаллизации аморфных форм железа, что, невзирая на хорошую аэрацию и дренаж, можно назвать особенностью мерзлотных песчаных почв – такие значения фиксируются на контрольных участках. Но в почвах гарей видно, что прямо под пирогенным слоем в верхней минеральной части профиля, помимо увеличения содержания обеих форм железа, также можно отметить заметное повышение содержания “несиликатной” формы железа относительно “аморфной”. Что предполагает интенсификацию процесса кристаллизации железа в почвах при сильном тепловом воздействии во время пожара, особенно в почвах сосняков.

Изменений в гранулометрическом составе, которые упомянуты в работах других авторов, зафиксировано не было. Отмечается профильная неравномерность в гранулометрическом составе подзолов в листовничниках из-за крио- и пирогенных турбаций и сложного строения профиля с присутствием погребенных горизонтов.

Уничтожение огнем лесного полога, наземной растительности и верхних органогенных горизонтов, защищавших почвы от

прямого воздействия солнечных лучей, вызывало активизацию процесса сезонного протаивания мерзлотных почв на гарях. На нетронутых огнем территориях почвы оттаивали к сентябрю до 230–250 см, на гарях этот показатель к осени достигает 450–500 см. В почвах лиственных лесов максимальные сезонные глубины достигали 180 см, на гарях глубина протаивания на следующий год после пожара увеличивается до 230 см. Резкое увеличение глубины протаивания почв тронутых огнем территорий приводит к таянию верхних слоев многолетнемерзлых грунтов. Освобождаемые при этом запасы влаги приводят к накоплению надмерзлотной верховодки в почвах и меняют водный режим затронутых пожарами и прилегающих к ним территорий.

Установлено, что в следующем году после пожаров с началом протаивания сезонной мерзлоты все почвы, за счет накопления над мерзлотой верховодки, испытывают переувлажнение. В почвах лиственных лесов к октябрю надмерзлотная верховодка наблюдалась с глубины 1 м, а в почвах гарей – с глубины 50 см (рис. 3). В почвах сосновых лесов надмерзлотная верховодка занимала нижнюю половину профиля почв, при этом поверхностные слои песчаных почв испытывали недостаток влаги.

За счет увеличения глубины сезонного протаивания почв и освобождения влаги, ранее законсервированной мерзлотой, в почвах гарей на следующий год после пожаров резко повысились запасы влаги. Так, если в почвах не тронутых пожарами лиственных лесов в сентябре 2022 г. запас влаги составлял 16 660 м³/га, то на гари он повысился до 35 400 м³/га, в вариантах сосновых лесов соответственно 22 000 и 38 000 м³/га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории распространения легких почвообразующих пород, где они залегают на многолетней мерзлоте без участия ледового комплекса, развитие термокарстовой деградации грунтов проявляется слабо. На этой территории уничтожение огнем растительного покрова и верхних органогенных слоев почв вызывают стрессовые трансформации видового разнообразия и продуктивности растительности, состава и свойств, а также гидротермического режима мерзлотных почв.

Исследования растительности в начальной стадии восстановления после пожара показали, что гари активно заселяются видами-пирофитами (*Chamerion angustifolium*, *Marchantia polymorpha* L. *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid), при этом видовое разнообразие на контрольном участке лиственничника выше (13 видов), чем на гари (10 видов). А на гари сосняка видовое разнообразие выше (15 видов), чем в контрольном сосняке (4 вида). Запас надземной фитомассы травяно-кустарничкового покрова в контрольном лиственничнике и сосняке более чем в 5 и 10 раз соответственно превышает таковой на гарях.

Проведенные работы выявили влияние катастрофических лесных пожаров на морфологическое строение (формирование пирогенного слоя), глубину протаивания, температурный и водный режимы мерзлотных почв под лиственничными и сосновыми лесами на легких почвообразующих породах криолитозоны. В верхней части почв гарей отмечается снижение кислотности, увеличение окристаллизованных (труднодоступных) форм железа. В профилях начинают более интенсивно проявляться турбационные процессы. За счет увеличения теплообеспеченности на следующий год после пожаров глубина сезонного протаивания в почвах гарей лиственничников увеличивается на 25%, сосняков – в два раза. С началом протаивания сезонной мерзлоты все почвы испытывают переувлажнение, над мерзлотой накапливается верховодка (самый высокий уровень фиксируется в профиле гари лиственничника, а самый низкий – в профиле сосновой гари). Это показывает, что почвы, сформированные на легких породах, могут иметь разный отклик на прошедший интенсивный пожар в зависимости от того, под каким типом растительности они развиваются и насколько сильно снизилась защитная функция растительности и подстилки.

Было установлено, что в почвах лиственничных лесов запас влаги после пожара увеличился в 2.1 раза, а в сосновых – в 1.7 раз. Накопление огромного запаса влаги в сезонно талом слое почв приводит к выходу вод на поверхность земли при зимнем промерзании почв в ноябре–январе, вызывая катастрофические нарушения дорожной сети и затапливая леса по долинам небольших рек и ручейков.

Поскольку исследованная территория расположена в цен-

тральной части ареала, сложенной древнеаллювиальными легкими породами, и где крупные участки заняты перевеиваемыми песками – тукуланами. Возникшие обширные площади новых гарей в условиях уничтожения защитного слоя подстилки при усилении ветрового режима могут вызвать существенное расширение площади тукуланов.

Таким образом, послепожарные трансформации лесной растительности и мерзлотных почв на территории распространения легких почвообразующих пород весьма масштабны, имеют разноплановый характер влияния на изученные компоненты. Для выявления динамики развития растительного покрова и мерзлотных почв при послепожарных сукцессиях требуется проведение планомерных многолетних наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аболин Р.И.* Геоботаническое и почвенное описание Лено-Виллойской равнины // Тр. комис. по изуч. ЯАССР. Ленинград: Изд-во АН СССР, 1929. Т. 10. 378 с.
2. *Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П.* Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 156 с.
3. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 1970. 487 с.
4. *Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв. М., Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1995. 222 с.
5. *Бойцов А.В., Шепелев В.В.* Мерзлотно-гидрогеологические условия массива разведываемых песков Махатта (Центральная Якутия) // Гидрогеологические исследования криолитозоны. Якутск, 1976. С. 25–34.
6. *Валевич Т.О., Мерзляков О.Э.* Влияние лесных пожаров на почвы лиственных лесов Западного Саяна в условиях криоаридного климата // Почва как связующее звено функционирования природных антропогенно-преобразованных экосистем. Материалы V международной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ИГУ. Иркутск: ИГУ, 2021. С. 347–350.
7. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Дискуссионные вопросы интерпретации результатов химической экстракции соединений железа из почв // Почвоведение. 2014. № 6. С. 697–704. DOI: [10.7868/S0032180X14060112](https://doi.org/10.7868/S0032180X14060112).

8. *Габбасова И.М., Гаринов Т.Т., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А., Хабиров И.К., Сидорова Л.В., Назырова Ф.И., Простякова З.Г., Котлугалямова Э.Ю.* Влияние низовых пожаров на свойства и эрозию лесных почв Южного Урала (Башкирский государственный природный заповедник) // Почвоведение. 2019. № 4. С. 412–421. DOI: [10.1134/S0032180X19040075](https://doi.org/10.1134/S0032180X19040075).
9. *Гынинова А.Б., Сымпилова Д.П.* Изменение свойств дерново-лесных почв под влиянием пожаров // Почвы Сибири, их использование и охрана. Новосибирск: Наука, 1999. С. 120–124.
10. *Десяткин Р.В.* Почвы аласов Лено-Амгинского междуречья. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. 168 с.
11. *Десяткин Р.В.* Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2008. 324 с.
12. *Десяткин Р.В., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р.* Почвы Якутии. Якутск: Бичик, 2009. 61 с.
13. *Добровольский Г.В.* Деградация и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. 654 с.
14. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н.* Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154. DOI: [10.7868/s0032180x14020051](https://doi.org/10.7868/s0032180x14020051).
15. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 / Под ред. *Иванова А.Л., Шобы С.А.* М.: Почв.ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
16. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П.* Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ, 2002. 168 с.
17. *Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
18. *Ильичев Ю.Н., Игнатьев Л.А., Артымук С.Ю.* Влияние пожаров и рубок по гарям на почвенно-экологические факторы естественного лесовосстановления // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 6. С. 861–869.
19. *Исаев А.П.* Лиственничные леса среднетаежной подзоны Якутии и лесовозобновление на вырубках: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. Красноярск, 1993. 21 с.
20. *Исаев А.П.* Естественное лесовозобновление на вырубках и гарях // Лес и вечная мерзлота: особенности состава и структуры лесов мерзлотного региона, проблемы рационального ведения хозяйства и охраны. Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2000. С. 96–104.
21. *Исаев А.П., Протопопова В.В., Такахашии К.* История лесных пожаров в окрестностях г. Якутска // Проблемы изучения растительного покрова

Якутии: Сб. науч. ст. Якутск: НИПК “Сахаполиграфиздат”, 2004. С. 121–126.

22. *Карпель Б.А., Короходкина В.Г.* Изменение почвенных условий после пожаров // Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. С. 75–87.

23. *Катасонова Е.Г., Толстов А.Н.* Геокриологические особенности развесаемых песков (тукуланов) правобережья р. Виллой // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 166–178.

24. *Качинский Н.А.* Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.

25. Конспект флоры Азиатской России: Сосудистые растения / под ред. *Байкова К.С.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.

26. *Краснощечков Ю.Н.* Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 43–52.

27. *Красюк А.А.*, при сотрудничестве *Г.Н. Огнева.* Почвы Ленско-Амгинского водораздела (Якутский округ) // Материалы комиссии по изуч. ЯАССР. Ленинград: Изд-во АН СССР, 1927, Т. 6, 176 с.

28. *Лыткина Л.П.* Динамика растительного покрова на гарях лиственничных лесов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия): Автореф. дис. ... к. б. н.: 03.00.05. Якутск, 2005а. 17 с.

29. *Лыткина Л.П.* Пирогенные сукцессии растительности в лесах Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия) // Фундаментальные исследования. 2005б. № 8. С. 57–58.

30. *Лыткина Л.П.* Лесовосстановление на гарях Лено-Амгинского междуречья. Новосибирск: Наука, 2010. 117 с.

31. *Матвеев П.М., Матвеев А.М.* Лесная пирология. Красноярск: СибГТУ, 2002. 316 с.

32. *Мергелов Н.С.* Постпирогенная трансформация почв и запасов почвенного углерода в предтундровых редколесьях Колымской низменности: каскадный эффект и обратные связи // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 3. С. 129–140. DOI: [10.15356/0373-2444-2015-3-129-140](https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-129-140).

33. Национальный атлас почв Российской Федерации / под ред. *Шобы С.А.* М.: ООО Астрель, 2011. 631 с.

34. *Пискарева В.М., Кошовский Т.С., Бисикалова Е.А., Геннадиев А.Н., Белик А.Д.* Влияние пожаров на свойства почв Национального Парка “Земля Леопарда” (Приморский край) // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2019. № 3. С. 11–24..

35. Прокушкин С.Г., Богданов В.В., Прокушкин А.С., Токарева И.В. Послепожарное восстановление органического вещества в напочвенном покрове лиственничников криолитозоны центральной Эвенкии // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2011. № 2. С. 227–234.
36. Сукачев В.Н. Растительность верхней части бассейна р. Тунгира Олекминского округа Якутской области (фитосоциологический очерк) // Труды Амурской экспедиции. СПб., 1912. Т. 16, 286 с.
37. Тарабукина В.Г. Пирогенез и его влияние на экологическое состояние почв северной тайги // Прикладная экология Севера: опыт проведенных исследований, современное состояние и перспективы. Якутск: Ин-т прикладной экологии Севера АН РС(Я), 2003. С. 174–177.
38. Тарабукина В.Г., Саввинов Д.Д. Влияние лесных пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
39. Тарабукина В.Г., Шумилов Ю.В. Пирогенная трансформация лесных почв в условиях криолитозоны // Продуктивность и устойчивость лесных почв / Мат-лы III междунар. конф. (Петрозаводск 7–11.09.2009 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 112–116.
40. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П., Волотовский К.А., Медведева Н.С. Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 140 с.
41. Тюлина Л.Н. Очерк лесной растительности верхнего течения Алдана // Труды Ин-та биологии ЯФ АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Т. 3. С. 83–138.
42. Тюлина Л.Н. Лесная растительность средней и нижней части бассейна р. Учур. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 150 с.
43. Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Средней Сибири (Таймыр, Сибирская платформа). Новосибирск, 2010. 15 с.
44. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) // Почвоведение. 2008. № 7. С. 783–792.
45. Цибарт А. С., Геннадиев А. Н. Направленность изменения лесных почв Приамурья под воздействием пирогенного фактора // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2009. № 3. С. 66–74.
46. Чевычелов А.П. Пирогенез и постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв // Сибирский экологический журнал. 2002. № 3. С. 273–277.
47. Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 243–252. DOI: [10.7868/S0032180X18020120](https://doi.org/10.7868/S0032180X18020120).

48. Чузунова Р.В. Гари Южной Якутии и их лесовозобновление // Леса Южной Якутии. М.: Наука, 1964. С. 110–143.
49. Шахматова Е.Ю. Пирогенность – ответная реакция почв сухих сосновых лесов на воздействие пожаров // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 5–2. С. 260–264. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=6723>.
50. Щербаков И.П. Типы леса Южной Якутии // Леса Южной Якутии. М.: Наука, 1964. С. 5–109.
51. Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука., 1975. 344 с.
52. Яковлев А.П. Пожароопасность сосновых и лиственничных лесов // Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. С. 195–212.
53. Desyatkin A., Fedorov P., Filippov N., Desyatkin R. Climate Change and Its Influence on the Active Layer Depth in Central Yakutia // Land. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 1–3. DOI: [10.3390/land10010003](https://doi.org/10.3390/land10010003).
54. Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Filippov N.V. Sandy soils of desert-like landscapes (tukulans) of Central Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society, 2021, Syktyvkar, Komi Republic, RF). IOP Publishing Ltd. 2021. Vol. 862. Art. ID 012003. DOI: [10.1088/1755-1315/862/1/012003](https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012003).
55. Desyatkin R., Okoneshnikova M., Ivanova A., Nikolaeva M., Filippov N., Desyatkin A. Dynamics of Vegetation and Soil Cover of Pyrogenically Disturbed Areas of the Northern Taiga under Conditions of Thermokarst Development and Climate Warming // Land. 2022. Vol. 11. No. 9. 1594.
56. Sofronov M.A., Volokitina A.V., Kajimoto T., Matsuura Y., Uemura S., Zonal peculiarities of forest vegetation controlled by fires in Northern Siberia // Eurasian J. For. Res. 2000. No. 1. P. 51–59.

REFERENCES

1. Abolin R.I., Geobotanicheskoe i pochvennoe opisanie Leno-Vilyuiskoi ravniny (Geobotanical and soil description of the Lena-Vilyui plain), *Tr. komis. po izuch. YaASSR*, Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1929, Vol. 10, 378 p.
2. Andreev V.N., Galaktionova T.F, Perfil'eva V.I., Shcherbakov I.P., *Osnovnye osobennosti rastitel'nogo pokrova Yakutskoi ASSR* (The main features of the vegetation cover of the Yakut ASSR), Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1987, 156 p.

3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Soil Chemical Analysis Guide), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1970, 487 p.
4. Babanin V.F., Trukhin V.I., Karpachevskii L.O., Ivanov A.V., Morozov V.V., *Magnetizm pochv* (Soil magnetism), Moscow, Yaroslavl': Izd-vo YaGTU, 1995, 222 p.
5. Boitsov A.V., Shepelev V.V., Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya massiva razvevaemykh peskov Makhatta (Tsentral'naya Yakutiya) (Permafrost-hydrogeological conditions of the massif of blown sands Mahatta (Central Yakutia)), In: *Gidrogeologicheskie issledovaniya kriolitozony* (Hydrogeological studies of permafrost), Yakutsk, 1976, pp. 25–34.
6. Valevich T.O., Merzlyakov O.E., Vliyanie lesnykh pozharov na pochvy listvennichnykh lesov Zapadnogo Sayana v usloviyakh krioaridnogo klimata (Influence of forest fires on the soils of larch forests of the Western Sayan in a cryoarid climate), *Pochva kak svyazuyushchee zveno funktsionirovaniya prirodnykh i antropogenno-preobrazovannykh ekosistem. Materialy V mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu kafedry pochvovedeniya i otsenki zemel'nykh resursov IGU* (Soil as a Connecting Link in the Functioning of Natural and Anthropogenically Transformed Ecosystems. Proc. V Int. Conf. dedicated to the 90th anniversary of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment of ISU), Irkutsk: IGU, 2021, pp. 347–350.
7. Vodyanitskii Yu.N., Shoba S.A., Disputable issues of interpreting the results of chemical extraction of iron compounds from soils, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 6, pp. 573–580, DOI: [10.1134/S106422931406009X](https://doi.org/10.1134/S106422931406009X).
8. Gabbasova I.M., Garipov T.T., Suleimanov R.R., Komissarov M.A., Khabirov I.K., Sidorova L.V., Nazyrova F.I., Prostyakova Z.G., Kotlugalyamova E.Yu., The influence of ground fires on the properties and erosion of forest soils in the Southern Urals (Bashkir state nature reserve), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 4, pp. 370–379, [10.1134/S1064229319040070](https://doi.org/10.1134/S1064229319040070).
9. Gyninova A.B., Sympilova D.P., Izmenenie svoystv dernovo-lesnykh pochv pod vliyaniem pozharov (Changes in properties of soddy-forest soils under the influence of fires), In: *Pochvy Sibiri, ikh ispol'zovanie i okhrana* (Soils of Siberia, their use and protection), Novosibirsk: Nauka, 1999, pp. 120–124.
10. Desyatkin R.V., *Pochvy alasov Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* (Soils of the alasses of the Lena-Amga interfluve), Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1984, 168 p.

11. Desyatkin R.V., *Pochvoobrazovanie v termokarstovykh kotlovinakh – alasakh kriolitozony* (Soil formation in thermokarst basins – alas in the permafrost zone), Novosibirsk: Nauka, 2008, 324 p.
12. Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R., *Pochvy Yakutii* (Soils of Yakutia), Yakutsk: Bichik, 2009, 61 p.
13. Dobrovolskii G.V., *Degradatsiya i okhrana pochv* (Soil degradation and protection), Moscow: Izd-vo MGU, 2002, 654 p.
14. Dymov A.A., Dubrovskii Yu.A., Gabov D.N., Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No.2, pp. 47–56, DOI: [10.1134/S1064229314020045](https://doi.org/10.1134/S1064229314020045).
15. Ivanov A.L., Shoba S.A. (Eds.), *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0), Moscow: Pochv.in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
16. Zaidel'man F.R., Shvarov A.P., *Pirogennaya i gidrotermicheskaya degradatsiya torfyanykh pochv, ikh agroekologiya, peschanye kul'tury zemledeliya, rekul'tivatsiya* (Pyrogenic and hydrothermal degradation of peat soils, their agroecology, sand cultures of agriculture, reclamation), Moscow: Izd-vo MGU, 2002, 168 p.
17. Zonn S.V., *Zhelezo v pochvakh* (Iron in soils), Moscow: Nauka, 1982, 207 p.
18. Il'ichev Yu.N., Ignat'ev L.A., Artymuk S.Yu., Vliyanie pozharov i rubok po garyam na pochvenno-ekologicheskie faktory estestvennogo lesovosstanovleniya (Influence of fires and logging in burnt areas on soil-ecological factors of natural reforestation), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2011, Vol. 18, No.6, pp. 861–869.
19. Isaev A.P., *Listvennichnye lesa srednetaezhnoi podzony Yakutii i lesovozobnovlenie na vyrubkakh: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Larch forests of the middle taiga subzone of Yakutia and reforestation in clearings, Extended abstract of Cand. agr. sci. thesis), Krasnoyarsk, 1993, 21 p.
20. Isaev A.P., Estestvennoe lesovozobnovlenie na vyrubkakh i garyakh (Natural reforestation in clearings and burnt areas), In: *Les i vechnaya merzlota: osobennosti sostava i struktury lesov merzlotnogo regiona, problemy ratsional'nogo vedeniya khozyaistva i okhrany* (Forest and permafrost: features of the composition and structure of forests in the permafrost region, problems of rational management and protection), Yakutsk: Izd-vo Yakutskogo un-ta, 2000, pp. 96–104.
21. Isaev A.P., Protopopova V.V., Takakhashi K., Istoriya lesnykh pozharov v okrestnostyakh g. Yakutsk (The history of forest fires in the vicinity of Yakutsk), In: *Problemy izucheniya rastitel'nogo pokrova Yakutii* (Problems of

- studying the vegetation cover of Yakutia), Yakutsk: NIPK “Sakhapoligrafizdat”, 2004, pp. 121–126.
22. Karpel' B.A., Korokhodkina V.G., *Izmenenie pochvennykh uslovii posle pozharov* (Changes in soil conditions after fires), In: *Lesnye pozhary v Yakutii i ikh vliyaniye na prirodu lesa* (Forest fires in Yakutia and their impact on the nature of the forest), Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 75–87.
23. Katasonova E.G., Tolstov A.N., *Geokriologicheskie osobennosti razvevaemykh peskov (tukulanov) pravoberezh'ya r. Vilyui* (Geocryological features of blown sands (tukulans) of the right bank of the Vilyuy river), In: *Mноголетнемерзлые горные породы различных раионов СССР* (Permafrost rocks in various regions of the USSR), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, pp. 166–178.
24. Kachinskii N.A., *Mekhanicheskii i mikroagregatnyi sostav pochvy, metody ego izucheniya* (Mechanical and microaggregate composition of the soil, methods of its study), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1958, 191 p.
25. Baikov K.S. (Ed.), *Konspekt flory Aziatskoi Rossii: Sosudistye rasteniya* (Synopsis of the flora of Asiatic Russia: Vascular plants), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, 640 p.
26. Krasnoshchekov Yu.N., *Vliyaniye pirogenного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в Tsentral'noi ekologicheskoi zone Baikal'skoi prirodnoi territorii* (Influence of the pyrogenic factor on gray-humus soils of pine forests in the Central ecological zone of the Baikal natural territory), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 2, pp. 43–52.
27. Krasnyuk A.A., Ognev G.N., *Pochvy Lensko-Amginskogo vodorazdela* (Yakutskii okrug) (Soils of the Lena-Amga watershed (Yakutian district)), In: *Materialy komissii po izuch. YaASSR* (Materials of the commission for the study of the YASSR), Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1927, Vol. 6, 176 p.
28. Lytkina L.P., *Dinamika rastitel'nogo pokrova na garyakh listvennichnykh лесов Leno-Amginskogo mezhdurech'ya (Tsentral'naya Yakutiya): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Vegetation dynamics in the burnt areas of larch forests of the Lena-Amga interflue (Central Yakutia), Extended abstract of Cand. biol. sci. thesis), Yakutsk, 2005a, 17 p.
29. Lytkina L.P., *Pirogennye suksessii rastitel'nosti v лесakh Leno-Amginskogo mezhdurech'ya (Tsentral'naya Yakutiya)* (Pyrogenic vegetation successions in the forests of the Lena-Amga interflue (Central Yakutia)), *Fundamental'nye issledovaniya*, 2005b, No. 8, pp. 57–58.
30. Lytkina L.P., *Lesovosstanovlenie na garyakh Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* (Reforestation on the burnt-out areas of the Lena-Amga interflue), Novosibirsk: Nauka, 2010, 117 p.
31. Matveev P.M., Matveev A.M., *Lesnaya pirologiya* (Forest pyrology), Krasnoyarsk: SibGTU, 2002, 316 p.

32. Mergelov N.S., Postpirogennaya transformatsiya pochv i zapasov pochvennogo ugleroda v predtundrovyykh redkoles'yakh Kolymskoi nizmennosti: kaskadnyi effekt i obratnye svyazi (Postpyrogenic transformation of soils and soil carbon stocks in sub-tundra woodlands of Kolyma lowland: a cascading effect and feedbacks), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2015, No. 3, pp. 129–140, DOI: [10.15356/0373-2444-2015-3-129-140](https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-129-140).
33. Shoba S.A. (Ed.), *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National Soil Atlas of the Russian Federation), Moscow: OOO Astrel', 2011 631 p.
34. Piskareva V.M., Koshovskii T.S., Bisikalova E.A., Gennadiev A.N., Belik A.D., Vliyanie pozharov na svoystva pochv Natsional'nogo Parka "Zemlya Leoparda" (Primorskii krai) (Influence of fires on soil properties of the National Park "Land of the Leopard" (Primorsky region)), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2019, No. 3, pp. 11–24.
35. Prokushkin S.G., Bogdanov V.V., Prokushkin A.S., Tokareva I.V., Poslepozharnoe vosstanovlenie organicheskogo veshchestva v napochvennom pokrove listvennichnikov kriolitozony tsentral'noi Evenkii (Post-fire restoration of organic matter in the ground cover of larch forests in the permafrost zone of central Evenkia), *Izvestiya RAN. Ser. Biologicheskaya*, 2011, No. 2, pp. 227–234.
36. Sukachev V.N., Rastitel'nost' verkhnei chasti basseina r. Tungira Olekminskogo okruga Yakutskoi oblasti (fitosotsiologicheskii ocherk) (The vegetation of the upper part of the basin of the Tungira river, Olekminsky district, Yakutian region (phytosociological essay)), In: *Trudy Amurskoi ekspeditsii* (Proceedings of the Amur expedition), Saint Petersburg, 1912, Vol. 16, 286 p.
37. Tarabukina V.G., Pirogenез i ego vliyanie na ekologicheskoe sostoyanie pochv severnoi taiga (Pyrogenesis and its influence on the ecological state of soils in the northern taiga), In: *Prikladnaya ekologiya Severa: opyt provedennykh issledovaniy, sovremennoe sostoyanie i perspektivy* (Applied ecology of the North: research experience, current state and prospects), Yakutsk: In-t prikladnoi ekologii Severa AN RS(Ya), 2003, pp. 174–177.
38. Tarabukina V.G., Savvinov D.D., Vliyanie lesnykh pozharov na merzlotnye pochvy (Influence of forest fires on cryogenic soils), Novosibirsk: Nauka, 1990, 120 p.
39. Tarabukina V.G., Shumilov Yu.V., Pirogennaya transformatsiya lesnykh pochv v usloviyakh kriolitozony (Pyrogenic transformation of forest soils in permafrost), *Produktivnost' i ustoichivost' lesnykh pochv, Mat-ly III mezhdunar. konf.* (Productivity and resistance of forest soils. Proceedings of the III Int. Conf.), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2009, pp. 112–116.

40. Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P., Volotovskii K.A., Medvedeva N.S., *Lesy srednetaezhnoi podzony Yakutii* (Forests of the middle taiga subzone of Yakutia), Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1994, 140 p.
41. Tyulina L.N., Ocherk lesnoi rastitel'nosti verkhnego techeniya Aldana (Essay on the forest vegetation of the upper reaches of the Aldan River), In: *Trudy In-ta biologii YaF AN SSSR* (Proc. of the Institute of Biology, YaF, USSR Academy of Sciences), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1957, Vol. 3, pp. 83–138.
42. Tyulina L.N., *Lesnaya rastitel'nost' srednei i nizhnei chasti basseina r. Uchur* (Forest vegetation of the middle and lower parts of the Uchur river basin), Moscow, Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962, 150 p.
43. *Unifitsirovannaya regional'naya stratigraficheskaya skhema chetvertichnykh otlozhenii Srednei Sibiri (Taimyr, Sibirskaya platforma)* (Unified Regional Stratigraphic Scheme of Quaternary Deposits in Central Siberia (Taimyr, Siberian Platform)), Novosibirsk, 2010, 15 p.
44. Tsibart A.S., Gennadiev A.N., The influence of fires on the properties of forest soils in the Amur River basin (The Norskiy reserve), *Eurasian Soil Science*, 2008, Vol. 41, No.7, pp. 686–693, DOI: [10.1134/S1064229308070028](https://doi.org/10.1134/S1064229308070028).
45. Tsibart A. S., Gennadiev A. N., Napravlennost' izmeneniya lesnykh pochv Priamur'ya pod vozdeistviem pirogen'nogo faktora (Direction of changes in forest soils of the Amur region under the influence of the pyrogenic factor), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2009, No. 3, pp. 66–74.
46. Chevychelov A.P., Pirogenез i postpirogennye transformatsii svoistv i sostava merzlotnykh pochv (Pyrogenesis and post-pyrogenic transformations of the properties and composition of cryogenic soils), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2002, No. 3, pp. 273–277.
47. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Yu., Postpyrogenic polycyclic soils in the forest of Yakutia and Transbaikal region, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 2, pp. 243–252, DOI: [10.1134/S1064229318020023](https://doi.org/10.1134/S1064229318020023).
48. Chugunova R.V., Gari Yuzhnoi Yakutii i ikh lesovozobnovlenie (Burnt areas of South Yakutia and their reforestation), In: *Lesy Yuzhnoi Yakutii* (Forests of South Yakutia), Moscow: Nauka, 1964, pp. 110–143.
49. Shakhmatova E.Yu., Pirogennost' – otvetnaya reaktsiya pochv sukhikh sosnovykh lesov na vozdeistvie pozharov (Pyrogenicity – the response of soils of dry pine forests to the impact of fires), *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, No. 5–2, pp. 260–264, URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6723>.
50. Shcherbakov I.P., Tipy lesa Yuzhnoi Yakutii (Forest types of South Yakutia), In: *Lesy Yuzhnoi Yakutii* (Forests of South Yakutia), Moscow: Nauka, 1964, pp. 5–109.

51. Shcherbakov I.P., *Lesnoi pokrov Severo-Vostoka SSSR* (Forest cover of the North-East of the USSR), Novosibirsk: Nauka., 1975, 344 p.
52. Yakovlev A.P., Pozharoopasnost' sosnovykh i listvennichnykh lesov (Fire hazard of pine and larch forests), In: *Lesnye pozhary v Yakutii i ikh vliyanie na prirodu lesa* (Forest fires in Yakutia and their impact on the nature of the forest), Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 195–212.
53. Desyatkin A., Fedorov P., Filippov N., Desyatkin R., Climate Change and Its Influence on the Active Layer Depth in Central Yakutia, *Land*, 2021, Vol. 10, No. 1, pp. 1–3, DOI: [10.3390/land10010003](https://doi.org/10.3390/land10010003).
54. Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Filippov N.V., Sandy soils of desert-like landscapes (tukulans) of Central Yakutia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society)*, Proc. Conf., Syktyvkar, Komi Republic, RF., 2021, Vol. 862, Art. ID 012003, DOI: [10.1088/1755-1315/862/1/012003](https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012003).
55. Desyatkin R., Okoneshnikova M., Ivanova A., Nikolaeva M., Filippov N., Desyatkin A., Dynamics of Vegetation and Soil Cover of Pyrogenically Disturbed Areas of the Northern Taiga under Conditions of Thermokarst Development and Climate Warming, *Land*, 2022. Vol. 11, No. 9, 1594.
56. Sofronov M.A., Volokitina A.V., Kajimoto T., Matsuura Y., Uemura S., Zonal peculiarities of forest vegetation controlled by fires in Northern Siberia, *Eurasian J. For. Res.*, 2000, No. 1, pp. 51–59.

УДК 631.171

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-276-308



Ссылки для цитирования:

Митин С.Г., Сысоев Г.В., Старостин И.А., Ещин А.В. Технико-технологическое обеспечение вовлечения в оборот залежных земель // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 276-308. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-276-308

Cite this article as:

Mitin S.G., Sysoev G.V., Starostin I.A., Eshchin A.V., Technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 276-308, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-276-308

Технико-технологическое обеспечение вовлечения в оборот залежных земель

© 2024 г. С. Г. Митин^{1*}, Г. В. Сысоев^{2**}, И. А. Старостин^{2***},
А. В. Ещин^{2****}

¹Комитет Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике
и природопользованию, Россия,

103426, Москва, Ул. Большая Дмитровка, д. 26,

* <https://orcid.org/0009-0004-1961-8254>, e-mail: SGMitin@senat.gov.ru.

²ФГБНУ “Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ”, Россия,

109428, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5,

** <https://orcid.org/0009-0008-6850-616X>, e-mail: sysoev.gv@gmail.com,

*** <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

**** <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>, e-mail: eschin-vim@yandex.ru.

Поступила в редакцию 26.01.2024, принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Устойчивое развитие сельскохозяйственного производства является ключевым фактором обеспечения продовольственной безопасности и роста экспортного потенциала страны. Один из основных резервов развития агропромышленного комплекса – это вовлечение залежных земель в сельскохозяйственный оборот, что связано с проблемой технико-технологического обеспечения данных работ. Цель работы – интенсификация процесса вовлечения в оборот залежных земель путем разработки программы технико-технологического обеспечения данного вида работ, нацеленной на создание и ускоренное

внедрение в эксплуатацию системы специализированных машин. Авторами произведена систематизация технологических приемов и комплексов технических средств, использующихся при вовлечении в оборот залежных земель, в зависимости от стадий зарастания. Для активного вовлечения залежных земель в сельхозпроизводство предлагается создать сеть региональных машинно-технологических станций, оснащенных современной отечественной специализированной техникой, оказывающих услуги по удалению древесной и кустарниковой растительности и первоначальной обработке почвы сельскохозяйственным товаропроизводителям регионов. Программой предполагается разработка и организация серийного производства современной техники для вовлечения в оборот залежных земель, а также реализация комплекса мер поддержки, направленных на ускоренное техническое оснащение машинно-технологических станций. Такой подход позволит обеспечить возможность для мелких и средних сельхозтоваропроизводителей использовать финансово доступные технические средства при вовлечении в оборот залежных земель, при этом исключается необходимость их приобретения и обслуживания, а также привлечения и обучения дополнительных сотрудников. Реализация предложенной программы должна позволить сельскохозяйственным товаропроизводителям осуществить вовлечение залежных земель в оборот с минимальными затратами, обеспечивая при этом высокие темпы роста посевных площадей и объемов производства сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: залежные земли; вовлечение залежных земель; удаление растительности; мелиоративные машины; измельчитель; роторатор; государственная поддержка; машинно-технологические станции.

Technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture

© 2024 S. G. Mitin^{1*}, G. V. Sysoev^{2**}, I. A. Starostin^{2***},
A. V. Eshchin^{2****}

¹*The Committee on Agrarian and Food Policy and Nature Management
of the Council of Federation,*

26 Bolshaya Dmitrovka Str., Moscow 103426, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0009-0004-1961-8254>, e-mail: SGMitin@senat.gov.ru.*

²*Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
5, 1-st Institutsky Proezd, Moscow 109428, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0009-0008-6850-616X>, e-mail: sysoev.gv@gmail.com,
***<https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru
****<https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>, e-mail: eschin-vim@yandex.ru.*

Received 26.01.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: Sustainable development of agricultural production is a key factor in ensuring food security and growth of the country's export potential. One of the main reserves for the development of the agro-industrial complex is the involvement of fallow lands in agricultural industry, which is associated with the problem of technical and technological support for these works. The purpose of the work is to intensify the process of involving fallow lands in agriculture by developing a program of technical and technological support for this type of works, aimed at creating and accelerated implementation of a system of specialized machines. The authors systematized technologies and complexes of technical means, used in the involvement of fallow lands in crop production, depending on the stages of wild species overgrowth. For active involvement of fallow lands in agriculture, it is proposed to create a network of regional machine-technological stations equipped with modern domestic specialized equipment, providing services in removal of woody and shrubby vegetation and in initial tillage to agricultural producers in regions. The program assumes the development and organization of mass production of modern equipment for the involvement of fallow lands in agriculture, as well as implementation of a set of support measures aimed at accelerated technical equipment of machine-technological stations. Such an approach should make it possible for small and medium-sized agricultural producers to use financially affordable machinery services to involve fallow lands in agriculture, eliminating the need for its acquisition and maintenance, hiring and training of additional staff. The implementation of the proposed program should allow agricultural producers to involve fallow lands in agricultural production with minimal costs, at the same time ensuring high growth rates of acreage and agricultural production volumes.

Keywords: fallow lands; involvement of fallow lands; vegetation removal; reclamation machines; shredder; rotator; state support; machine-technological stations.

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственное производство является основой продовольственной безопасности страны. Руководством страны по-

ставлена цель по обеспечению населения широким перечнем продуктов питания. Кроме того, в последнее время сельскохозяйственная продукция играет существенную роль в развитии экспортного потенциала: в 2022 г. объем экспорта продукции АПК составил 28.9 млрд долл. США (Национальный доклад..., 2022), что составляет 7% от общего объема российского экспорта. При этом в структуре экспорта продукции АПК наибольшую долю занимают зерно (32%) и масложировая продукция (22%) (<https://aemcx.ru/export/rusexport/>). Таким образом, устойчивое развитие сельскохозяйственного производства является ключевым фактором обеспечения продовольственной безопасности и развития экспортного потенциала страны.

Для увеличения темпов развития производства сельскохозяйственной продукции необходим комплексный подход, подразумевающий как увеличение объема используемых земельных ресурсов, так и повышение интенсивности их эксплуатации путем рационального применения высокопродуктивного генетического материала, передовых технологий и техники, удобрений, средств защиты и т. д.

В Российской Федерации на протяжении продолжительного периода времени отмечалась тенденция сокращения используемых сельскохозяйственных земель. По данным Росстата, в 1990 г. посевные площади составляли 117.7 млн га, а к 2007 г. они снизились на 43 млн га до минимального значения за последние 30 с небольшим лет и составили 74.7 млн га. С 2018 г. по 2021 г. посевные площади стабильно увеличивались, но темпы роста не превышали 0.5 млн га в год. В 2022 г. посевные площади составили 82.3 млн га, обеспечивая при этом наибольшие темпы роста за последние годы – 1.9 млн га в год. Несмотря на положительную динамику, необходимо констатировать тот факт, что за последние 15 лет посевные площади выросли лишь на 7.6 млн га, а достигнутые в 2022 г. значения составляют лишь 70% от уровня 1990 г. (https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy).

По состоянию на 1 января 2022 г., по данным Росреестра, площадь сельскохозяйственных угодий составила 193.5 млн га, в т. ч. 117.1 млн га пашни (60.5%), 70.9 млн га кормовых угодий (36.6%), 5.5 млн га многолетних насаждений и залежей (2.8%)

(Национальный доклад..., 2022).

Согласно различным источникам, с 1991 г. в залежное состояние перешли до 30...45 млн га пашни, которые являются значительным резервом для развития агропромышленного комплекса (Ценч, 2023; Нечаева, 2023).

Сокращение пашни происходит как по естественным причинам (деградация от ветровой и водной эрозии), так и в результате хозяйственной деятельности людей: нарушение севооборотов, истощение, загрязнение от техногенных факторов, пренебрежение нормами внесения средств защиты растений и удобрений, переход части земель из сельскохозяйственных в земли населенных пунктов или промышленности (Мударисов, 2020).

В соответствии с Государственной программой эффективно вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (Государственная программа..., 2021) основными приоритетами государственной политики в сфере эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса определены:

- восстановление и повышение плодородия земель сельскохозяйственного назначения, предотвращение сокращения площадей земель сельскохозяйственного назначения, рациональное использование таких земель, защита и сохранение сельскохозяйственных угодий от водной и ветровой эрозии и опустынивания;
- совершенствование оборота сельскохозяйственных земель;
- расширение посевов сельскохозяйственных культур за счет неиспользуемых пахотных земель;
- наращивание экспорта продукции агропромышленного комплекса;
- обеспечение населения качественной и безопасной пищевой продукцией.

Одной из основных целей Государственной программы эффективно вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации является вовлечение в оборот к концу 2030 г. 5 млн га выбывших сельскохозяйственных угодий за счет проведения

культуртехнических мероприятий, предусматривающих, в частности, расчистку земель от сорной древесно-кустарниковой растительности, пней и погребенной древесины, травянистой растительности, кочек и мха (Государственная программа..., 2021).

Согласно Мелиоративному кадастру в Российской Федерации всего числится 9.43 млн га мелиорированных земель, в т. ч. 4.68 млн га орошаемых и 4.76 млн га осушаемых. В федеральной собственности находится более 34.3 тыс. мелиоративных сооружений, в т. ч. 232 водохранилища, более 2 тыс. регулирующих и распределительных гидроузлов, 134 речные плотины, 1.8 тыс. подающих и откачивающих насосных станций, 42.3 тыс. км магистральных водопроводящих и водосбросных каналов, свыше 3 тыс. км защитных дамб и валов. С целью поддержания мелиоративных систем и гидротехнических сооружений в нормативном состоянии требуется постоянное проведение комплекса ремонтно-эксплуатационных работ с использованием мелиоративной, специальной и общестроительной техники, различных типов машин и механизмов.

При проведении ремонтно-эксплуатационных работ используется более 40 наименований технических средств, из которых к мелиоративной технике относятся следующие: машины для строительства и очистки закрытого горизонтального дренажа, мелиоративные косилки, машины для очистки каналов, корчеватели, кусторезы, бороны мелиоративные, рыхлители, оборудование для нарезки каналов в земляном русле.

В настоящее время в эксплуатации находится более 3.7 тыс. ед. мелиоративной, общестроительной и автотранспортной техники, при этом степень изношенности технических средств в среднем превышает 70%, а более 50% парка технических средств находятся за пределами нормативных сроков эксплуатации.

Согласно данным статистического сборника “Развитие мелиорации земель в 1971–1975 гг.” в отчетном 1975 г. для строительных и ремонтно-эксплуатационных работ на площади 3.68 млн га орошаемых и 2.99 млн га осушаемых земель использовалось 13 492 ед. экскаваторов (в 2016 г. – 675 ед.), 11 978 ед. скреперов (в 2016 г. – 98 ед.), 14 122 ед. бульдозеров (в 2016 г. – 349 ед.); 21 ед. земснарядов (в 2016 г. – 14 ед.), 4 052 ед. автомо-

бильных кранов (в 2016 г. – 136 ед.). Приведенные данные говорят о критически низком уровне обеспеченности машинами для выполнения мелиоративных работ.

В настоящее время дефицит мелиоративной, строительной и автомобильной техники оценивается в более чем 2 600 ед., включая более 680 ед. мелиоративной техники, более 1 600 ед. общестроительной техники, более 350 ед. автотранспортных средств, более 80 ед. автомобильных кранов.

Среди мелиоративной техники наиболее востребованными являются навесные мелиоративные косилки, машины для очистки каналов и промывки закрытого горизонтального дренажа, плавучие косилки. Из общестроительной техники наиболее востребованы бульдозеры на базе тракторов класса 3–10 т, автомобильные краны, длиннобазовые планировщики, прицепные скреперы, гусеничные тракторы общего назначения, одноковшовые экскаваторы, автогрейдеры.

Для обеспечения нормативной эксплуатации мелиоративного фонда страны необходимо оснастить отрасль комплексом строительной, специальной и мелиоративной техники. Так потребность в автогрейдерах оценивается в более чем 240 ед., прицепных грейдерах – 110 ед., бульдозерах – 2 300 ед., камнеуборочных машинах – 40 ед., каналоочистителях – 1 100 ед., корчевателях – 40 ед., навесных косилках – 7 080 ед., косилках плавучих с транспортным средством – 390 ед., автомобильных кранах – 430 ед., дренопромывочных машинах – 270 ед., прицепных скреперах – 1 300 ед., экскаваторов одноковшовых – 2 500 ед.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются техника и технологии вовлечения залежных земель в сельскохозяйственное производство, а также способы государственной поддержки мероприятий, нацеленных на интенсификацию данного процесса, на создание и ускоренное введение в эксплуатацию системы специализированных машин. Проведен анализ технологических приемов и комплексов технических средств, использующихся при вовлечении в оборот залежных земель, в зависимости от стадий зарастания. Разработан проект программы технико-технологического обеспече-

ния вовлечения в оборот залежных земель, нацеленной на создание и ускоренное внедрение в эксплуатацию системы машин для вовлечения в оборот залежных земель. При проведении исследований использовались такие методы, как информационный анализ и синтез, сравнительный анализ, экспертная оценка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивное развитие сельского хозяйства в последние годы, обусловленное высокими урожаями и благоприятными условиями на рынке сельскохозяйственной продукции, позволило сельскохозяйственным товаропроизводителям поправить свое материальное положение и взять курс на расширение производства. В связи с этим земли, заброшенные несколько лет назад и не требующие серьезных культуртехнических мероприятий, а, следовательно, и высоких финансовых затрат, вводятся в оборот в первую очередь. Однако существует множество земель, заброшенных на протяжении более 10–20 лет. На таких землях уже может расти молодой лес. Ввод их в сельхозпроизводство требует более серьезного подхода и мероприятий по удалению древесно-кустарниковой растительности.

Различают несколько этапов зарастания залежных земель (Орлова, 2015; Голубев и др., 2022; <http://ikar.ru/press/4402.html>).

На первой стадии (1–5 лет) происходит образование дернины, формируемой однолетними и многолетними сорными травами, появляются соизмеримые по высоте с травянистым ярусом молодые деревья и кустарники толщиной не более 0.5 см.

На второй стадии (5–10 лет) происходит развитие корневищных сообществ, впоследствии сменяющихся рыхлокустовыми и плотнокустовыми злаками. Высота деревьев достигает 6...7 м, а толщина – 2...4 см в диаметре, сомкнутость крон составляет не более 20%.

На третьей стадии (10–15 лет) формируется древесно-кустарниковый ярус разной высоты – маленькие деревья высотой до 1 м, большие деревья – до 10...12 м. Толщина больших деревьев может превышать 7 см.

На четвертой стадии (15–20 лет) формируется сомкнутый молодой лес с деревьями высотой более 10 м и диаметром ствола

свыше 12 см.

Вовлечение залежных земель в сельскохозяйственный оборот связано с рядом проблем, в частности, с технико-технологическим обеспечением данных работ, и на каждом этапе необходимо использовать свои наиболее целесообразные технологии и технические средства (Орлова, 2015; Голубев и др., 2022; Голубев и др., 2021; <http://ikar.ru/press/4402.html>).

Для обработки залежей используется несколько технологий по удалению на участке древесной растительности: ручная выруб-ка, механический и химико-механический способы (Алдошин и др., 2020; Миронова, 2019; Кутузова и др., 2017; Кудрявцев и др., 2020).

Ручная рубка является одним из самых примитивных и трудозатратных способов удаления древесной растительности. Применять его рационально при вводе небольших площадей или для удаления с участка наиболее рослых деревьев. Рабочие для таких работ используют в основном ручной инструмент. Для измельчения срубленной кустарниковой растительности и веток деревьев могут использоваться измельчители веток, которые разбрасывают щепу по поверхности почвы или загружают в транспортное средство. После проведения таких работ необходимо проводить ряд мероприятий, связанных с удалением пней и корней, рыхлением почвы.

При механическом способе производят срезание верхней части древесно-кустарниковой растительности, сгребание и утилизацию получаемой массы, выкорчевывание пней и удаление корней. Древесно-кустарниковую массу вывозят для утилизации, сжигают на месте, либо измельчают и разбрасывают получаемую щепу по поверхности (Алдошин, Васильев, 2022).

Химико-механический способ подразумевает опрыскивание деревьев и кустарников арборицидами, приводящими к высыханию древесной растительности. Для этого предварительно повреждают кору деревьев, что позволяет химическим веществам попасть внутрь. Уборка сухой древесной массы менее энергоемка, и упрощается процесс ее утилизации.

После удаления больших деревьев должна производиться корчевка пней. Для этих целей используют экскаваторы или кор-

чеватели пней различной конструкции, монтируемые на бульдозерах. Выкорчеванные пни сжигают на месте или вывозят.

Для удаления кустарников, в том числе после удаления рослых деревьев, могут использоваться кустарниковые плуги, кусторезы, мелиоративные дисковые бороны. При использовании кустарниково-болотных плугов после вспашки участка требуется осуществлять дополнительно 1–2 обработки дисковыми боронами для измельчения стволов и корней кустарников (Алдошин, Васильев, 2022; Пунинский, 2017).

Существуют различные конструкции кусторезов. Преимущественно эти машины оснащаются горизонтальными или вертикальными вращающимися органами. Такие машины срезают кустарниковую растительность и оставляют ее на участке. После этого требуется либо ее сбор кустарниковыми граблями, либо несколько проходов дисковыми боронами для измельчения кустов и перемешивания их с почвой. Кусторез может навешиваться как на заднюю, так и на переднюю навесную систему трактора, причем если кусторез навешивается сзади, то при работе трактор движется задним ходом. В этом случае стоит отдавать предпочтение тракторам, имеющим большой диапазон скоростей заднего хода и реверсивный пост управления, что позволит создать лучшие условия труда трактористу и выбрать скоростной режим, обеспечивающий более эффективное использование мощности двигателя.

Мелиоративные дисковые бороны за один проход сваливают небольшие деревья и кустарники, перерубают их стволы, ветки и корни, частично заделывают их в почву. При обработке залежи с невысокими деревьями достаточно 2–3 проходов мелиоративной дисковой бороной, чтобы стало возможным в дальнейшем использовать обычные машины для предпосевной обработки почвы и посева.

Дисковая борона за один проход валит небольшие деревья, но для измельчения стволов необходимо 2–3 прохода в направлении перпендикулярном предыдущему. Глубина обработки составляет до 25 см, что позволяет перерезать корневища. Кусты и корневища рубятся на большие части, в связи с чем процесс их перегнивания достаточно долгий. После обработки дисковыми боронами разрубленные древесные остатки запахиваются.

Мульчеры могут использоваться для срезания и измельчения небольших кустарников и молодых деревьев, при этом верхняя срезаемая часть растения измельчается и разбрасывается по полю, а часть ствола и корни остаются в почве. Один проход мелиоративной дисковой бороной после мульчера позволяет на следующем этапе применять обычные сельскохозяйственные орудия для обработки почвы. Мульчер за один проход измельчает надземную часть растений в мелкую щепу, которая хорошо перегнивает. После использования мульчера для рыхления почвы и заделки щепы требуется обработка дисковой бороной или вспашка плугом, при этом щепы перегнивают достаточно быстро.

Ротаторы являются одной из разновидностей мульчеров. Они предназначены для измельчения кустарников и деревьев с диаметром ствола до 25 см с одновременным перемешиванием получаемой щепы с почвой. Ротаторы способны обрабатывать слой почвы на глубину до 25 см. Это позволяет осуществить не только смешивание с почвой щепы от измельченной надземной части деревьев, но и измельчать корневую систему. Перемешивание щепы с почвой способствует более быстрому ее перегниванию, что благоприятно сказывается на плодородии почвы. Кроме того, уничтожение корней деревьев с одновременным рыхлением почвы не требует применения после ротатора дополнительных технологических операций, т. е. можно сразу использовать посевные машины. Однако процесс измельчения достаточно энергоемкий, соответственно, требуются тракторы высокой мощности, способные двигаться задним ходом на низких скоростях и оборудованные реверсивным постом управления. При большой толщине удаляемых деревьев работы осуществляются в 2 этапа: 1 – измельчение надземной части деревьев, 2 – обработка почвы на глубину до 25 см с одновременным измельчением корневищ и заделкой щепы от первого прохода.

На основании проведенного анализа литературных источников (см. список литературы) произведена систематизация технологических приемов и комплексов технических средств, использующихся при вовлечении в оборот залежных земель, в зависимости от стадий зарастания (табл. 1).

Таблица 1. Система технологических приемов и комплексов технических средств, применяемых при вовлечении в оборот залежных земель в зависимости от стадий зарастания

Table 1. The system of technological methods and complexes of technical means used in the involvement of fallow lands in agriculture, depending on the stages of overgrowth

Стадия		Первая стадия 1–5 лет	Вторая стадия 5–10 лет	Третья стадия 10–15 лет	Четвертая стадия 15–20 лет
Описание		Начало зарастания. Отдельные молодые деревья и кустарники высотой 0.5–3 м и толщиной не более 2.5 см. По высоте соизмеримы с травянистым ярусом.	Высота деревьев доходит до 6–7 м, толщина составляет до 4 см в диаметре. Сомкнутость крон деревьев составляет не более 20%.	Формируется древесно-кустарниковый ярус разной высоты – большие деревья до 10 м, маленькие могут быть высотой до 1 м. Толщина больших деревьев составляет до 12 см.	Сомкнутый молодой лес с деревьями возрастом 15–20 лет, примерным обхватом свыше 12 см в диаметре и высотой свыше 10 м.
Технологии проведения работ	1.	ВВ + МДБ	ВВ + МДБ	ВВ + КП + КБП	ВВ + КП + КБП
	2.	КБП	КБП	ВВ + КП + МДБ (2 раза)	ВВ + КП + МДБ (2–3 раза)
	3.	МДБ (2–3 раза)	БК + КБП	БК + КБП	ВВ + КП + МДБ (2 раза) + ГР
	4.	МДБ (2 раза) + ГР	МДБ (2–3 раза)	БК + МДБ (2–3 раза)	ВВ + БК + КП + МДБ + ГР

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Технологии проведения работ	5.	МУЛ + МДБ	МУЛ + МДБ	РВ (заглубление в почву до 25 см)	РВ (измельчение растительности) + РВ (заглубление в почву до 25 см)
ВВ – вырубка вручную; КБП – вспашка кустарниково-болотным плугом; БК – использование бульдозера с кусторезом; КП – выкорчевка пней корчевателем; МДБ – обработка мелиоративной дисковой бороной; МУЛ – мульчирование; ГР – обработка глубокорыхлителем; РВ – обработка ротоватором					

Проведенный анализ применяемых технологических подходов к удалению кустарниковой и древесной растительности показывает, что при вовлечении в оборот залежных земель на первой и второй стадиях зарастания рационально использовать мульчеры и мелиоративные дисковые бороны, а на третьей и четвертой стадиях – ротоваторы, которые позволяют с наименьшими затратами (за 1–2 прохода), наиболее качественно (одновременно осуществляется подготовка почвы под посев) и быстро подготовить залежные земли для хозяйственного использования.

На отечественном рынке до недавнего времени был представлен широкий спектр специализированных машин, которые могут использоваться для реализации мероприятий по удалению кустарниковой и древесной растительности при вовлечении в оборот залежных земель. Авторами проведен анализ представленных на российском рынке мелиоративных дисковых борон, мульчеров и ротоваторов.

Основными отечественными производителями тяжелых дисковых борон являются ООО “КЗ “Ростсельмаш”, ОАО “Беллагромаш-Сервис им. В.М. Рязанова” и АО “ПК “Ярославич”, а основными импортерами – ОАО “Завод МИНСКАГРОПРОММАШ” (Республика Беларусь), ООО “Завод Коммунальной Техники” (Республика Беларусь), Quivogne (Франция), John Deere (США) (табл. 2). Некоторые из представленных дисковых борон способны обеспечить обработку на глубину до 27–30 см, при этом для их работы требуются тяговые энергосредства мощностью преимущественно свыше 300 л. с.

Мульчеры и ротоваторы по способу агрегатирования подразделяют на самоходные и навесные. Самоходные мульчеры и ротоваторы являются узкоспециализированными машинами, состоящими из несущего шасси с энергетической установкой и смонтированного на нем технологического оборудования в виде непосредственно мульчера или ротоватора. Преимуществами самоходных мульчеров и ротоваторов является высокая производительность и высокая проходимость за счет использования гусеничной ходовой системы, при этом стоимость достигает нескольких десятков миллионов рублей, что существенно сдерживает

Таблица 2. Представленные на российском рынке тяжелые дисковые бороны для ввода в оборот залежных земель

Table 2. Heavy disc harrows presented on the Russian market developed for the involvement of fallow lands in agriculture

№ п/п	Марка/модель	Требуемая мощность двигателя, л. с.	Требуемый тяговый класс трактора	Глубина обработки почвы, см	Ширина захвата, м
1	ROSTSELMASH DV-1000	300–340	-	10–20	6.0
2	ROSTSELMASH DX-850/880	300–340	-	7–17	8.8
3	ROSTSELMASH DX-850/1080	375–435	-	7–17	10.8
4	БДТ-2,8С	-	3	до 25	2.8
5	БДТ-3,8	-	3–4	до 20	3.8
6	БДТ-5-ПП	-	4–5	до 20	5.0
7	БДТ-7-ПП	-	5	до 25	7.0
8	БДТ-2,5×18Ф	-	3	до 20	2.5
9	БДТ-3×22Ф	-	3	до 20	3.0
10	БДТ-4×30Ф	-	4	до 20	4.0
11	БДТ-5×36Ф	-	5	до 20	5.0
12	БПМ-3	-	4–5	15–30	3.0
13	БПМ-4	-	5	15–30	4.0

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№ п/п	Марка/модель	Требуемая мощность двигателя, л. с.	Требуемый тяговый класс трактора	Глубина обработки почвы, см	Ширина захвата, м
14	БПМ-5	-	5	15–30	5.0
15	БДН-2,5	-	5	15–30	2.5
16	БДН-3А	-	4–5	15–30	2.9
17	ZKT-2200H	от 80	-	12–20	1.8
18	ZKT-3200M	от 300	-	15–30	2.9
19	ZKT-6000П	от 300	-	до 27	6.5
20	APVRS FF 32	270–315	-	25	4.5
21	APVRS FF 44	360–420	-	25	6.0
22	APVRS FF 56	450–525	-	25	7.5
23	John Deere 2625	190–450	-	до 20	9.3

их массовое применение. Навесные мульчеры и ротоваторы агрегируются с мобильными энергетическими средствами, в качестве которых могут выступать сельскохозяйственные и промышленные тракторы, экскаваторы и погрузчики, оснащенные колесной или гусеничной ходовой системой. Основными преимуществами навесных мульчеров и ротоваторов являются их невысокая стоимость и возможность использования в качестве энергетического средства уже имеющихся в хозяйстве тракторов. Однако для проведения работ такими средствами может потребоваться модификация используемых энергетических средств.

Отечественным производителем мульчеров и ротоваторов является IMPULSE (ГК “Новые технологии”), а основными зарубежными поставщиками выступали ANWI-PRINOTH (Германия), Plaisance (Франция), FAE (Италия), FERRI (Испания), VALENTINI (Италия), Agri-World (Италия). В настоящее время импорт данных машин затруднен.

Основные характеристики представленных на отечественном рынке мульчеров и ротоваторов перечислены соответственно в таблицах 3 и 4. Приведенные данные показывают, что мульчеры и ротоваторы способны осуществлять измельчение стволов деревьев диаметром до 80 см и обработку почвы на глубину до 70 см, имеют ширину захвата не более 2.5 м, при этом потребляемая мощность может достигать 600–700 л. с.

Проведенный анализ технологий и специализированных машин, которые могут применяться для борьбы с кустарниковой и древесной растительностью при вовлечении в оборот залежных земель, показывает, что данный процесс является энергозатратным и низкопроизводительным. В этой связи одной из научных задач является поиск технических решений по снижению энергоемкости процесса измельчения древесной и кустарниковой растительности, что может также способствовать повышению производительности и экономической эффективности данных машин. Для этого требуется проведение дополнительного комплекса фундаментальных и прикладных исследований, опытно-конструкторских работ.

Таблица 3. Характеристики мульчеров для удаления древесной растительности
Table 3. Characteristics of mulchers for removing woody vegetation

№ п/п	Марка/модель	Установленная/ потребляемая мощность, л. с.	Глубина обработки, см	Максимальный диаметр ствола, см	Рабочая ширина, м
1	АНВИ Raptor 800	630	40	80	2.3
2	АНВИ RT400	408	-	50	2.3
3	АНВИ PRINOTH RT 200	175	-	20–25	-
4	Plaisance Galotrax 500	509	-	50	1.8-2.5
5	PLAISANCE GALOTRAX GX 800	765	-	-	2.0
6	Plaisance Variotrac 200	168	-	-	1.8
7	Plaisance Variotrac 500	440	-	-	2.2
8	“ТайгаМастер” - ТМ-250	250	-	50	2.3
9	UMG M-300	421	-	35	2.1
10	FAE UMM/S 250	200–280	-	35	2.5
11	FAE DML/SSL 175 VT	40–90	-	12	1.6
12	Galotrax BF 500-1600	70–120	-	-	1.6
13	Galotrax BF 501-1600	100–200	-	-	1.6

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

№ п/п	Марка/модель	Установленная/ потребляемая мощность, л. с.	Глубина обработки, см	Максимальный диаметр ствола, см	Рабочая ширина, м
14	Galotrax BF 600-2200	200–300	-	-	2.2
15	Galotrax BF 702-2200	300–500	-	-	2.2
16	FERRI TSKF-DT/F	360	-	45	2.2
17	FERRI TFC/DT-F	120–250	-	40	2.0
18	VALENTINI SCORPION 1000	70–110	7	-	1.1
19	VALENTINI SCORPION 1800	100–220	7	-	1.8
20	VALENTINI APACHE 1000	100–150	15	-	1.1
21	VALENTINI APACHE 2500	190–280	15	-	2.6
22	VALENTINI DEMONIO 1300	130–190	22	-	1.3
23	VALENTINI DEMONIO 3300	290–340	22	-	3.3
24	VALENTINI CANNIBAL 3500	350–400	27–50	-	3.5
25	ДСТ-УРАЛ М832	412	-	-	2.1-2.5
26	UM-Truck ET-400	400–600	-	-	-

Таблица 4. Характеристики роторов
Table 4. Characteristics of rotovators

№ п/п	Марка/модель	Требуемая мощность, л. с.	Глубина обработки, см	Диаметр ствола, см	Диаметр камней, см	Рабочая ширина, мм
1	Agri-World FTCD 160.02	110–120	2–15	20	20	1.6
2	Agri-World FTCD 140.35	280–300	35–65	50	30	1.4
3	Agri-World FTCD 200.25	240–280	25–50	-	-	2.0
4	Agri-World FTCD-230.35	280–350	35–70	-	-	2.3
5	AHWI PRINOTH S 700	100–240	19	-	-	0.7
6	AHWI RFL700	140–190	30	-	-	2.3
7	AHWI RF800	180–300	40	-	-	2.3
8	AHWI RF1000	260–400	50	40	-	2.0
9	IMPULSE farmland-3 -2000	112–150	30	-	-	2.0
10	IMPULSE farmland-5 -2500	224–300	40	-	-	2.5
11	SEPPi MAXISOIL	300–450	35	50	50	3.5

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

№ п/п	Марка/модель	Требуемая мощность, л. с.	Глубина обработки, см	Диаметр ствола, см	Диаметр камней, см	Рабочая ширина, мм
12	SEMPI SUPERSOIL	250–390	30	50	40	2.5
13	SEMPI STARSOIL	150–260	40	40	30	1.8
14	SEMPI MULTIFORST	140–180	25	25	25	2.0
15	SEMPI MIDISOIL dt	100–170	25	25	25	2.3
16	SEMPI MIDIPIERRE	80–130	12	-	20	1.5

Техника для вовлечения в оборот залежных земель является узкоспециализированной и дорогостоящей, требующей применения энергонасыщенных мобильных энергетических средств, обладающих определенными особенностями (например, реверсивным постом управления для работы с рядом мульчеров и ротоваторов) и специально подготовленных для проведения таких работ (наличие специальных защитных ограждений), в связи с чем ее приобретение мелкими и даже средними хозяйствами для выполнения только таких работ в большинстве случаев экономически нецелесообразно. Связано это с тем, что в таких хозяйствах сложно обеспечить высокий уровень загрузки техники для вовлечения в оборот залежных земель и ее эффективное использование. Дополнительно необходимо учитывать тот факт, что в настоящее время в связи со сложившейся геополитической ситуацией поставки зарубежной техники ограничены, и стоимость ее для российских потребителей увеличилась в разы, а отечественное производство недостаточно развито. Факт отсутствия экономически доступного комплекса технических средств является серьезным ограничительным фактором для вовлечения залежей в сельхозпроизводство.

Ввиду обозначенных причин узкоспециализированную технику для обработки залежных земель приобретают в основном агрохолдинги и крупные хозяйства, которые могут вводить в сельхозоборот до нескольких тысяч гектар за сезон. Небольшие хозяйства осуществляют эти работы по примитивным технологиям с применением ручного труда и низкоэффективной техники, либо вынуждены прибегать к достаточно дорогим услугам специализированных компаний.

С целью интенсификации процесса вовлечения в оборот залежных земель путем повышения технического обеспечения данного вида работ предлагается разработать программу технико-технологического обеспечения вовлечения в оборот залежных земель, нацеленную на создание и ускоренное внедрение в эксплуатацию системы специализированных машин. Для этого предлагается создать систему региональных машинно-технологических станций, оснащенных современной отечественной техникой, оказывающих услуги по удалению древесной и кустарниковой расти-

тельности и первоначальной обработке почвы сельскохозяйственными товаропроизводителями региона, осуществляющим вовлечение в оборот залежных земель.

Программой предполагается разработка и организация серийного производства современной техники для введения залежей в сельхозпроизводство, а также реализация комплекса федеральных и региональных мер поддержки, направленных на ускоренное техническое оснащение машинно-технологических станций, описанных выше, в частности, использование механизма предоставления льготного лизинга АО «Росагролизинг».

Такой подход обеспечит возможность для мелких и средних сельхозтоваропроизводителей использовать финансово доступные услуги по эксплуатации техники для вовлечения в оборот залежных земель, исключая необходимость ее непосредственного приобретения и обслуживания, а также привлечения и обучения дополнительных сотрудников. Применение машинно-технологических станций, в свою очередь, позволит обеспечить высокий уровень загрузки узкоспециализированных машин, что будет способствовать снижению себестоимости выполнения работ (Катаев и др., 2023).

Реализация предлагаемой программы подразумевает взаимодействие Минсельхоза России, АО «Росагролизинг», региональных органов управления АПК, научно-исследовательских институтов, машиностроительных предприятий, региональных инвесторов и сельскохозяйственных товаропроизводителей. При реализации программы предполагается последовательное выполнение следующих действий (рис. 1):

1 – Согласование плана по вовлечению в оборот залежных земель в разрезе регионов для организации подготовки производства техники. На этом этапе Минсельхоз России совместно с региональными органами управления АПК определяют ежегодные объемы введения залежей, на основании которых рассчитывается ежегодная потребность в технических средствах и формируется план производства техники.

2 – Проведение конкурса среди предприятий машиностроения на участие в программе технико-технологического обеспечения вовлечения в оборот залежных земель и предоставление пред-

приятиям машиностроения планируемых объемов работ. На данном этапе Минсельхоз России при возможном содействии Минпромторга России на конкурсной основе выбирает предприятия для участия в программе и заключает с ними договор, в котором прописываются необходимые объемы производства техники с учетом плана вовлечения залежных земель в оборот.

3 – Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке отечественной специализированной техники для вовлечения залежных земель в оборот. На данном этапе машиностроительные предприятия совместно с научно-исследовательскими институтами или учреждениями высшего образования проводят ряд исследований и конструкторских работ по созданию комплекса современной отечественной специализированной техники. Данные работы могут осуществляться в рамках хоздоговорной деятельности.

4 – Производство и передача техники в АО “Росагролизинг”. На данном этапе осуществляется испытание и постановка на производство разработанной в рамках программы техники, которая в последствии передается в АО “Росагролизинг”.

5 – Создание региональных машинно-технологических станций. Данный этап реализуется параллельно с этапами 2 и 3. Предполагается, что машинно-технологические станции для вовлечения залежных земель в оборот будут создаваться региональными инвесторами при условии утверждения гарантированного объема работ на определенный период и субсидирования части затрат на проведение данного вида работ.

6 – Согласование плана работ по вовлечению залежных земель в оборот и доведение субсидий за проведение работ. На данном этапе региональные органы управления АПК заключают с машинно-технологическими станциями договоры, в которых прописаны обязательства о вовлечении в оборот определенного объема залежных земель, и впоследствии доводят субсидии за фактически проведенные работы.



Рис. 1. Схема взаимодействия участников программы технико-технологического обеспечения вовлечения залежных земель в оборот.

Fig. 1. The scheme of participants interaction within the framework of program for technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture.

7 – Поставка техники через АО “Росагролизинг” по программе комплектования машинно-технологических станций. На данном этапе переданная в рамках программы в АО “Росагролизинг” техника поставляется через программы льготного лизинга на машинно-технологические станции.

8 – Проведение машинно-технологическими станциями работ по вовлечению залежных земель в оборот. На данном этапе машинно-технологические станции заключают с сельскохозяйственными товаропроизводителями договоры на проведение соответствующих работ, осуществляют эти работы в рамках заключенных договоров и получают на них субсидии.

Для реализации мероприятий предлагаемой программы технико-технологического обеспечения вовлечения залежных земель в оборот, нацеленной на создание и ускоренное внедрение в эксплуатацию системы специализированных машин необходимо обеспечить разработку законодательной базы. Со стороны Минсельхоза России может потребоваться разработка нормативно-правовых актов, предусматривающих возможность передачи техники для рекультивации залежных земель на машинно-технологические станции на условиях льготного лизинга АО “Росагролизинг”. На уровне региональных органов управления АПК может потребоваться разработка нормативно-правовых актов субъектов Российской Федерации, предусматривающих создание региональных машинно-технологических станций для вовлечения залежных земель в сельхозпроизводство и субсидирования из регионального бюджета части затрат на создание и техническое оснащение создаваемых машинно-технологических станций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ применяемых технологических подходов к удалению кустарниковой и древесной растительности показывает, что при вовлечении в оборот залежных земель на первой и второй стадиях зарастания рационально использовать мульчеры и мелиоративные дисковые бороны, а на третьей и четвертой стадиях – ротаторы, которые позволяют с наименьшими затратами (за 1–2 прохода), наиболее качественно (одновременно осуществляется подготовка почвы под посев) и быстро подготовить залежные

земли для хозяйственного использования.

Проведенный анализ специализированных машин, которые могут применяться для борьбы с кустарниковой и древесной растительностью при вовлечении в оборот залежных земель, показывает, что данный процесс является энергозатратным и низкопроизводительным, в связи с чем одной из научных задач является поиск технических решений по снижению энергоемкости процесса измельчения древесной и кустарниковой растительности, что может также способствовать повышению производительности и экономической эффективности данных машин.

Основными проблемами технического обеспечения работ по вовлечению в оборот залежных земель является узкая специализация и высокая стоимость применяемых машин, в связи с чем их приобретают в основном агрохолдинги и крупные хозяйства, в то время как небольшие хозяйства осуществляют эти работы по примитивным технологиям с применением ручного труда и низкоэффективной техники, либо вынуждены прибегать к достаточно дорогим услугам специализированных компаний.

С целью интенсификации процесса введения залежей в сельхозпроизводство путем повышения технического обеспечения данного вида работ предложено реализовать программу технико-технологического обеспечения вовлечения в оборот залежных земель. Данная программа нацелена на разработку и ускоренное внедрение в эксплуатацию системы специальных машин путем создания региональных машинно-технологических станций, оказывающих на льготных условиях услуги сельскохозяйственным товаропроизводителям региона, осуществляющим вовлечение в оборот залежных земель. Применение машинно-технологических станций позволит обеспечить высокий уровень загрузки узкоспециализированных машин, что будет способствовать снижению себестоимости выполнения работ. Программой предполагается реализация комплекса федеральных и региональных мер поддержки, нацеленных на ускоренное техническое оснащение машинно-технологических станций для вовлечения в оборот залежных земель, в частности, использование механизма предоставления льготного лизинга. Реализация предложенной программы должна позволить сельскохозяйственным товаропроизводителям осуще-

ствить вовлечение залежных земель в оборот с минимальными затратами, обеспечивая при этом высокие темпы роста посевных площадей и объемов производства сельскохозяйственной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный доклад о ходе и результатах реализации в 2022 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2023. 159 с.
2. Российский экспорт – агроэкспорт. URL: <https://aemcx.ru/export/rusexport/> (дата обращения 23.11.2023).
3. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство: Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 07.12.2023).
4. *Ценч Ю.С., Миронова А.В.* Эволюция развития землепользования почвенными угодьями (отечественный и зарубежный опыт) // Технический сервис машин. 2023. № 1(150). С. 176–186. DOI: [10.22314/2618-8287-2023-61-1-176-186](https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-1-176-186).
5. *Нечаева Т.В.* Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 2. 215 с.
6. *Мударисов С.Г.* Влияние технических средств и технологий на механическую эрозию почвы на склонах // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 2. С. 17–22. DOI: [10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22).
7. Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации 14 мая 2021 г. № 731).
8. *Орлова О.И.* Борьба за землю: восстановление залежных земель // Карельский научный журнал. 2015. № 2(11). С. 130–133.
9. Отвоевать у леса / о технике для ввода в оборот залежных земель. URL: <http://ikar.ru/press/4402.html> (дата обращения 22.11.2023).
10. *Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С.* Инновационные технологии оценки состояния и вовлечения в оборот залежных земель: аналит. обзор. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2022. 80 с.

11. Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Голубев В.В., Васильев А.С., Апатенко А.С., Севрюгина Н.В. Передовые практики введения залежных земель в оборот: аналит. обзор. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2021. 80 с.
12. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 1(64). С. 28–35.
13. Миронова А.В. Обработка задернелых и деградированных почв // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 2(35). С. 57–62.
14. Кутузова А.А. и др. Методика эффективного освоения разновозрастных залежей на основе многовариантных технологий под пастбища и сенокосы и очередности возврата их в пашню в Нечерноземной зоне РФ / ФГБНУ “ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса”. М.: ООО “Угрешская типография”, 2017. 64 с.
15. Кудрявцев А.В., Кокорев Ю.А., Морозов П.В., Голубев В.В., Белякова Е.С., Косолапов В.В. Результаты технологии введения залежных земель в севооборот // Вестн. НГИЭИ. 2020. № 12(115). С. 5–15.
16. Алдошин Н.В., Васильев А.С. Обоснование механизированной технологии ввода залежных земель в оборот под семенники многолетних трав // Техника и оборудование для села. 2022. № 1. С. 12–16.
17. Пунинский В.С. Система машин для комплексной механизации мелиоративных работ // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 2. С. 43–48. DOI: 10.22314/207375992017.2.4348.
18. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 2. С. 40–47.
19. Миронова А.В., Лисин Н.В., Панов А.И. Технология восстановления целинных и залежных земель // Технический сервис машин. 2020. № 2. С. 111–112.
20. Джабборов Н.И., Добринов А.В. Выбор технологии и технических средств восстановления залежных земель в зависимости от степени засоренности в условиях повышенного увлажнения // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4. С. 30–48.
21. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Усовершенствованная технология улучшения деградированных склоновых участков горной и предгорной зон // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. № 1. С. 57–62. DOI: [10.22314/2073-7599-2021-15-1-57-62](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-57-62).
22. Шевченко В.А., Соловьев А.М., Бондарева Г.И., Попова Н.П. Экологические проблемы при вовлечении в оборот ранее

- мелиорированных земель Нечерноземной зоны и пути их решения: моногр. М.: ФГБНУ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова”, 2021. 135 с.
23. Шевченко В.А., Бородычев В.В., Бондарева Г.И., Коломийцев Н.В., Матвеев А.В., Корженевский Б.И., Щербаков А.О., Жезмер В.Б., Соловьев А.М., Попова Н.П., Лытов М.Н., Евграфов А.В., Меньшикова С.А., Харитонов С.И. Научно-методические подходы к оценке состояния агроландшафтов и принципы освоения вышедших из оборота мелиорированных земель. М.: ФГБНУ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова”, 2021. 220 с.
24. Бондарева Г.И., Шевченко В.А., Орлов Б.Н., Орлов Н.Б. Исследование состояния и прогноз развития бросовых земель России: моногр. М.: ФГБНУ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова”, 2021. 190 с.
25. Шевченко В.А. Современное состояние вышедших из оборота мелиорированных земель и перспективы их освоения. М.: ФГБНУ “ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова”, 2021. 410 с.
26. Завражнов А.И., Измайлов А.Ю., Ланцев В.Ю. Комплекс технических средств для рекультивации неперспективных садов // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 3(32). С. 86–93.
27. Джабборов Н.И., Добринов А.В. Восстановление залежных земель в условиях повышенного увлажнения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 4. С. 25–28.
28. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А. Научно-практическое обоснование организации краткосрочной аренды (проката) сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2023. № 1(150). С. 39–47. DOI: [10.22314/2618-8287-2023-61-1-39-47](https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-1-39-47).

REFERENCES

1. National report on the progress and results of the implementation in 2022 of the State Programme for the Development of Agriculture and Regulation of Markets of Agricultural Products, Raw Materials and Food. Moscow: Ministerstvo sel'skogo hozjajstva Rossijskoj Federacii, 2023, 159 p.
2. Russian export – agroexport. URL: <https://aemcx.ru/export/rusexport/> (accessed on 23.11.2023).
3. Agriculture, hunting and forestry: Federal State Statistics Service. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (accessed on 07.12.2023).
4. Tsench Yu.S., Mironova A.V., Evolution of the soil land use (domestic and foreign experience), *Machinery technical service*, 2023, No. 1(150), pp. 176–186, DOI: [10.22314/2618-8287-2023-61-1-176-186](https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-1-176-186).
5. Nechaeva T.V., Zaleznyye zemli Rossii: rasprostranenie, agroekologicheskoe sostojanie i perspektivy ispol'zovanija (obzor) (Fallow

lands in Russia: distribution, agroecological state and prospects of use (review)), *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, 2023, Vol 6, No. 2, e215.

6. Mudarisov S.G., Rakhimov Z.Sh., Impact of the Technical Means and Technologies on Mechanical Soil Erosion on Slopes, *Agricultural Machinery and Technologies*, 2020, Vol. 14(2), pp. 17–22, DOI: [10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22).

7. State programme for the effective involvement of agricultural land in the turnover and development of the meliorative complex of the Russian Federation (approved by the Government of the Russian Federation on 14 May 2021, No. 731).

8. Orlova O.I., Bor'ba za zemlju: vosstanovlenie zaleznyh zemel' / O.I. Orlova (Struggle for land: restoration of fallow lands), *Karel'skij nauchnyj zhurnal.*, 2015, No. 2(11), pp. 130–133.

9. To reclaim from the forest / about the technique of involving fallow lands in crop production, URL: <http://ikar.ru/press/4402.html> (accessed on 22.11.2023).

10. Golubev I.G., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Innovative technologies for assessing the condition and involvement in agriculture of fallow lands: analytical review, Moscow: FGBNU “Rosinformagroteh”, 2022, 80 p.

11. Golubev I.G., Mishurov N.P., Golubev V.V., Vasiliev A.S., Apatenko A.S., Sevryugina N.V., Best practices of introducing fallow lands in agriculture: analytical review, Moscow: FGBNU “Rosinformagroteh”, 2021, 80 p.

12. Aldoshin N.V., Vasil'ev A.S., Golubev V.V., Obosnovanie priemov obrabotki pochvy pri osvoenii zaleznyh zemel' (Justification of soil treatment methods in the development of fallow lands), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020, Vol. 13, No. 1(64), pp. 28–35.

13. Mironova A.V., Obrabotka zadernelyh i degradirovannyh pochv (Treatment of sodden and degraded soils), *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*, 2019, No. 2(35), pp. 57–62.

14. Kutuzova A.A. et al., *Metodika jeffektivnogo osvoenija raznovozrastnyh zalezhej na osnove mnogovariantnyh tehnologij pod pastbishha i senokosy i ocherednosti vozvrata ih v pashnju v Nechernozemnoj zone RF* (Methodology of effective development of different-aged fallow lands on the basis of multivariant technologies for pastures and hayfields and the order of their return to arable land in the Non-Chernozem zone of the Russian Federation), FGBNU “VNII kormov im. V.R. Vil'jamsa”, Moscow: OOO “Ugreshskaja tipografija”, 2017, 64 p.

15. Kudryavtsev A.V., Kokorev Y.A., Morozov P.V., Golubev V.V., Belyakova E.S., Kosolapov V.V., Rezultaty tehnologii vvedenija zaleznyh zemel' v sevooborot (Results of the technology of introduction of fallow lands into crop rotation), *Vestn. NGIEI*, 2020, No. 12(115), pp. 5–15.
16. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Obosnovanie mehanizirovannoj tehnologii vvoda zaleznyh zemel' v oborot pod semenniki mnogoletnih trav (Justification of mechanised technology of introducing fallow lands into turnover under seedbeds of perennial grasses), *Tehnika i oborudovanie dlja sela*, 2022, No. 1, pp. 12–16.
17. Puninsky V.S., Sistema mashin dlja kompleksnoj mehanizacii meliorativnyh rabot (System of machines for complex mechanisation of land reclamation works), *Sel'skohozjajstvennyje mashiny i tehnologii*, 2017, No. 2, pp. 43–48, DOI: 10.22314/207375992017.2.4348.
18. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S., Kompleks mashin AGROMASH dlja obrabotki zaleznyh zemel' (Complex of AGROMASH machines for fallow land cultivation), *Vestnik VIESKH*, 2018, No 2, pp. 40–47.
19. Mironova A.V., Lisin N.V., Panov A.I., Tehnologija vosstanovlenija celinnyh i zaleznyh zemel' (Technology of restoration of virgin and fallow lands), *Machinery technical service*, 2020, No. 2, pp. 111–112.
20. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V., Vybory tehnologii i tehniceskich sredstv vosstanovlenija zaleznyh zemel' v zavisimosti ot stepeni zasorennosti v uslovijah povyshennogo uvlazhnenija (Choice of technology and technical means of restoration of fallow lands depending on the degree of weeding in conditions of increased moisture), *AgroEkoloInzheneriya*, 2020, No. 4, pp. 30–48.
21. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Advanced technology for improving degraded slopes in mountainous and foothill zones, *Agricultural Machinery and Technologies*, 2021, Vol. 15(1), pp. 57–62, DOI: [10.22314/2073-7599-2021-15-1-57-62](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-57-62).
22. Shevchenko V.A., Solov'ev A.M., Bondareva G.I., Popova N.P., *Ekologicheskie problemy pri вовлеchenii v oborot ranee meliorirovannyh zemel' Nechernozemnoj zony i puti ih reshenija* (Ecological problems in the involvement of previously reclaimed lands of the Non-Black Earth zone and ways of their solution), Moscow: FGBNU “VNIIGiM im. A.N. Kostjakova”, 2021, 135 p.
23. Shevchenko V.A., Borodychev V.V., Bondareva G.I., Kolomijcev N.V., Matveev A.V., Korzhenevskij B.I., Shherbakov A.O., Zhezmer V.B., Solov'ev A.M., Popova N.P., Lytov M.N., Evgrafov A.V., Men'shikova S.A., Haritonov S.I., *Nauchno-metodicheskie podhody k ocenke sostojanija agrolandshaftov i principy osvoenija vybyvshih iz oborota meliorirovannyh*

zemel' (Scientific and methodological approaches to the assessment of the state of agrolandscapes and principles of development of fallow lands), Moscow: FGBNU "VNIIGiM im. A.N. Kostjakova", 2021, 220 p.

24. Bondareva G.I., Shevchenko V.A., Orlov B.N., Orlov N.B., *Issledovanie sostojanija i prognoz razvitija brosovyh zemel' Rossii* (Research of the state and forecast of development of the abandoned lands of Russia), Moscow: FGBNU "VNIIGiM im. A.N. Kostjakova", 2021, 190 p.

25. Shevchenko V.A., *Sovremennoe sostojanie vybyvshih iz oborota meliorirovannyh zemel' i perspektivy ih osvoenija* (Modern state of fallow lands and prospects of their developmen), Moscow: FGBNU "VNIIGiM im. A.N. Kostjakova", 2021, 410 p.

26. Zavrazhnov A.I., Izmajlov A.Ju., Lancev V.Yu., *Kompleks tehnicheskikh sredstv dlja rekul'tivacii neperspektivnyh sadov* (Complex of technical means for reclamation of unpromising gardens), *Vestnik VIESKH*, 2018, No. 3(32), pp. 86–93.

27. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., *Vosstanovlenie zaleznyh zemel' v uslovijah povyshennogo uvlazhnenija* (Restoration of fallow lands under the conditions of increased moisture), *Agricultural Machinery and Technologies*, 2015, No. 4, pp. 25–28.

28. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Tishaninov I.A., *Scientific and practical justification of the short-term lease of agricultural machinery, Machinery technical service*, 2023, No. 1(150), pp. 39–47, DOI: [10.22314/2618-8287-2023-61-1-39-47](https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-1-39-47).

УДК 631.416.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332



Ссылки для цитирования:

Захарова О.Г., Чевычелов А.П. Пирогенная трансформация фосфатного состояния мерзлотных лесных почв Центральной и Южной Якутии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 309-332. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332

Cite this article as:

Zakharova O.G., Chevychelov A.P., Pyrogenic transformation of the phosphate state of permafrost forest soils of Central and Southern Yakutia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 309-332, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332

Пирогенная трансформация фосфатного состояния мерзлотных лесных почв Центральной и Южной Якутии

© 2024 г. О. Г. Захарова*, А. П. Чевычелов**

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия,
677980, Якутск, пр. Ленина, 41,*

**<https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>.*

*Поступила в редакцию 14.06.2023, после доработки 21.09.2023,
принята к публикации 07.02.2024*

Резюме: Впервые изучено и оценено фосфатное состояние мерзлотных лесных постпирогенных полициклических почв Центральной и Южной Якутии, развитых соответственно в условиях аридного и гумидного климата. Данные почвы с полициклическим профилем, сформированные в трансаккумулятивных фациях этих регионов криолитозоны, содержат, помимо современного, два–три погребенных гумусовых горизонта с обильным включением черных древесных углей. Эти пирогенные гумусовые горизонты характеризуются повышенным содержанием гумуса, общего азота и фосфора, оксалаторастворимого Fe, обменных оснований, а также фракций физической глины и ила, по сравнению со смежными минеральными горизонтами почвенного профиля. При этом бурозем Южной Якутии, сформированный в менее суровых и влажных климатических условиях, по сравнению с палевой почвой, развитой в криоаридных условиях Центральной Якутии, отличался большей

биогенностью. Общее содержание Р в нем составляло 98.0–427.2 мг Р₂O₅/100 г почвы, тогда как во второй почве – только 11.0–257.1 мг Р₂O₅/100 г почвы. В составе общего Р бурозема преобладали органоминеральные фосфаты, составляя 51.8–81.3%, а в палевой почве – минеральные формы Р, на долю которых приходилось 52.2–78.8%. Во фракционном составе минеральных фосфатов обоих типов мерзлотных почв в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов (Al-P и Fe-P), в совокупности составляя 43.3–94.3%, а среди последних – Fe-P, на долю которых приходилось 34.8–87.4% от общей суммы всех фракций минеральных фосфатов. Предполагается, что высокое содержание железозосфатов, а в отдельных случаях и окклюзированных алюможелезозосфатов в мерзлотных почвах обусловлено проявлением в их генезисе как процессов криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения.

Ключевые слова: Центральная и Южная Якутия; постпирогенные почвы; физико-химические свойства; фосфор; фосфатное состояние.

Pyrogenic transformation of the phosphate state of permafrost forest soils of Central and Southern Yakutia

© 2024 O. G. Zakharova^{*}, A. P. Chevychelov^{**}

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 677980, Yakutsk, Lenina st., 41,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>.

Received 14.06.2024, Revised 21.09.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: For the first time, the phosphate state of permafrost forest post-pyrogenic polycyclic soils of Central and Southern Yakutia, formed respectively in arid and humid climates, was studied and evaluated. These soils with a polycyclic profile, formed in the transaccumulative facies of this regions of the permafrost zone, contain, in addition to the modern one, 2–3 buried humus horizons with abundant inclusion of black charcoal. These pyrogenic humus horizons are characterized by an increased content of humus, total nitrogen and phosphorus soluble in iron oxalates, exchange bases, as well as fractions of physical clay and silt compared to neighboring mineral horizons of the soil profile. At the same time, the brown soil of Southern Yakutia, formed under less severe and humid climatic conditions, compared

with those of the pale soil developed under cryoarid conditions of Central Yakutia, was more biogenic, and the total content of phosphorus here was 98.0–427.2, whereas in the second soil – only 11.0–257.1 mg P₂O₅/100 g of soil. Organophosphates predominated in the composition of the total phosphorus of buruzem, amounting to 51.8–81.3%, and in pale soil – mineral forms of phosphorus, which accounted for 52.2–78.8%. The fractional composition of mineral phosphates of both types of permafrost soils was mainly dominated by phosphates of one and a half oxides (Al-P and Fe-P), totaling 43.3–94.3%, and among the latter – Fe-P, which accounted for 34.8–87.4% of the total amount of all fractions of mineral phosphates. It is assumed that the high content of iron phosphates, and in some cases occluded aluminum-iron phosphates in the studied permafrost soils, is due to the manifestation of both cryogenic and biogenic pyrogenic ferruginization in their genesis.

Keywords: Central and Southern Yakutia; post-pyrogenic soils; physico-chemical properties; phosphorus; phosphate state.

ВВЕДЕНИЕ

География, генезис и свойства данных постпирогенных полициклических почв, в том числе бурозема и палевой почвы, довольно полно были изучены ранее (Чевычелов, 1997; Краснощечков, 2011; Чевычелов, Шахматова, 2018; Jonson, 1971). В частности, отмечалось, что в трансаккумулятивных фациях ландшафтов лесных регионов Якутии формируются почвы с полициклическим профилем, содержащие, помимо современного, 2–3 погребенных гумусовых горизонта с обильным включением черных древесных углей. Последнее указывает на то, что за период своего развития данные почвы прошли 2–3 цикла начального почвообразования, прерываемого сильными низовыми пожарами, активизирующими экзогенные геоморфологические процессы. При этом наступает перерыв в почвообразовании, которое впоследствии продолжается на новом чехле “свежих” делювиальных отложений, смытых с поверхности водоразделов и покрывающих частично срезанные поверхностные гумусовые горизонты исходных почв.

Фосфатное состояние основных типов мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии было исследовано довольно полно, особенно в последнее время (Чевычелов, Захарова, 2020; Чевычелов и др., 2023). А вот фосфатное состояние этих оригинальных

постпирогенных почв, которые отличаются сложным строением почвенных профилей, а также спецификой вещественного состава, до последнего времени оставалось не изученным. По этой причине целью представленной статьи являлось исследование фосфатного состояния данных почв в связи с особенностями их строения, свойств и состава, а также ландшафтно-климатических условий формирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись две мерзлотные почвы, развитые в различных ландшафтно-климатических условиях Якутии. Приведем их географические и морфологические характеристики.

Разрез 16-89ТУ заложен в Южной Якутии, на Алдано-Учурском хребте, в 3 км ниже острова Курунг-Хохоё-Арыта по левому берегу р. Учур, на склоне водораздела крутизной 10°, растительность – березняк ольховнико-кедровостланиковый осоково-брусничный. Географические координаты: 58°06'30" N; 131°03'42" E, абсолютная высота (H) – 700 м над ур. м. Строение профиля: O(0–2) – AYpir(2–9) – BM(9–29) – [AYpir](29–43) – BM(43–51) – [AYpir](51–57) – BCm(57–72 см). Почва: бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных.

Разрез 2Ч-14 заложен в окрестностях г. Якутска, в нижней части склона коренного берега р. Лена, на делювиальном шлейфе, на поляне в смешанном березово-сосновом лесу разнотравно-злаковым. Географические координаты заложения разреза: 62°01'59,6" N; 129°37'09,3" E, H – 104 м. Строение профиля: Av(0–2) – AJ(2–17) – BPL/BC(17–31) – [AYpir](31–35) – BC(35–40) – [AYpir](40–50) – BC(50–74) – [AYpir](74–82) – BC(82–120) – C(120–160 см). Почва: палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв.

Климат Южной Якутии в целом может быть охарактеризован как холодный очень континентальный и гумидный, Центральной Якутии – холодный резко континентальный и аридный. При этом здесь, по данным метеостанции “Алдан”, годовое количество осадков составляет 528 мм, среднегодовая температура воздуха –

(-6.2 °С), сумма среднесуточных температур воздуха более 10 °С – 1 281 °С, коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову – 1.4, коэффициент континентальности – 230. В то же время аналогичные показатели по метеостанции “Якутск” уже составляли соответственно – 234 мм, -10.2 °С, 1 565 °С, 0.3 и 302 (Научно-прикладной справочник..., 1989). Следовательно, климат Южной Якутии, по сравнению с таковым Центральной Якутии, характеризуется как менее континентальный и менее холодный, но при этом более влажный.

При проведении почвенных исследований использовались сравнительно-географический, сравнительно-аналитический (Роде, 1971) и профилно-генетический методы (Розанов, 1983), а изучение свойств данных почв осуществлялось по общепринятым в почвоведении методикам (Аринушкина, 1970; Воробьева, 1989). При этом рН_{H2O} определялся на иономере “Мультигест ИПЛ-101”, гумус – по Тюрину, обменные катионы в карбонатных почвах – по Шмуку, в бескарбонатных – по Гедройцу, гранулометрический состав – по Качинскому (Практикум..., 1980). Общий фосфор (Р) определялся методом прокаливания по Сандерсу и Вильямсу, органический Р – по разнице общего количества Р и суммарного содержания его минеральных форм, выделяемых по методике Чанга-Джексона (Агрохимические методы..., 1975). Корреляционный и вариационно-статистический анализы проводились в соответствии с принципами математической статистики в почвоведении (Дмитриев, 2009). Диагностика и классификация изучаемых почв осуществлялась в соответствии с принципами классификации и диагностики почв России (Классификация..., 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства изучаемых лесных почв (табл. 1), с одной стороны, целиком отражают ландшафтно-климатическую специфику зонального почвообразования, а с другой стороны – влияние пирогенеза как природного регулярно действующего фактора почвообразования в исследуемом регионе (Чевычелов, 1997; Петров, 2020).

Палевая типичная почва Центральной Якутии формируется в основном в слабощелочных условиях внешней среды (Мякина,

Аринушкина, 1979). Содержание гумуса в погребенных гор. Apri – среднее или низкое, а в минеральных гор. BC и C – очень низкое и не превышает 1%. Почвенно-поглощающий комплекс (ППК) данной почвы насыщен основаниями, гранулометрический состав по всему профилю, как правило, песчаный и лишь в погребенных гор. AUpr утяжеляется до супесчаного. Содержание несиликатного Fe по Тамму в общем незначительное и составляет в гор. C 0.12%, увеличиваясь в современном и погребенных гумусовых горизонтах в 1.5–3.0 раза, иногда немного больше.

Напротив, бурозем Южной Якутии развивается в слабокислых условиях почвообразования, общее количество гумуса и азота здесь значительно повышено, особенно в современном и погребенных гумусовых горизонтах, в составе ППК отмечается значительное присутствие обменного H^+ , составляющее 25.9–59.2% от суммы обменных катионов. Гранулометрический состав этой почвы по профилю значительно изменяется от супесчаного до легко- и среднесуглинистого, однозначно указывая на внутрипрофильную слоистость. Содержание Fe по Тамму в данном буроземе значительно выше, чем в палевой почве, и составляет 0.51–2.45%, т. е. увеличивается почти в 5 раз (табл. 1). Сопоставляя свойства данных почв, необходимо однозначно отметить, что бурозем Южной Якутии обладает большей биогенностью и повышенной степенью ожелезнения по сравнению с палевой почвой Центральной Якутии.

Так, в почвообразующей породе палевой почвы, представленной сильновыветрелым супесчаным аллювием р. Лены, содержалось более чем в 3.2 раза меньше общего P, по сравнению с таковой бурозема, состоящей из дериватов кристаллических горных пород – гранито-гнейсов. При этом если количество здесь минерального P относительно сопоставимо и составляет соответственно 19.9 и 21.4 мг $P_2O_5/100$ г почвы, то содержание органофосфатов, отмечаемое в первой почве, уже в 6 раз выше аналогичного во второй. Последнее объясняется более чем 10-кратным увеличением содержания гумуса в гор. CD бурозема (1.8%) по сравнению с гор. C палевой почвы (0.1%) (см. табл. 1). Известно, что в составе гуминовых кислот может находиться от 2–3 до 50–80% всего органического P почвы. При этом содержание P в гуминовых кисло-

тах колеблется от 0.03–0.05 до 0.3–0.5% (Орлов и др., 2005).

В составе общего Р бурозема Южной Якутии абсолютно преобладали органофосфаты, на долю которых приходилось 51.8–81.3%, в то время как в палевой почве Центральной Якутии, наоборот, минеральные формы фосфатов относительно составляли от 52.2 до 88.2% от общего количества Р. В связи с высоким содержанием органофосфатов в изучаемом буроземе необходимо указать, что такое их максимальное количество (50–90%) характерно только для фосфатного состояния наиболее плодородных черноземных почв (Попович, 1992). В связи с оценкой пулов органофосфатов в черноземных почвах необходимо также отметить, что, по данным К.Е. Гинзбург (1981), на долю органических соединений в почвах приходится от 10–20 до 70–80% общих запасов Р. При этом максимум содержания органической фракции Р выпадает на зону черноземных почв, минимум содержания этой фракции – на зону дерново-подзолистых, каштановых и сероземных почв. Последнее положение также подтверждается и для черноземов Сибири. При этом сибирские черноземы отличаются от черноземов Европейской части России более высоким содержанием (37–81% от валового) органических фосфатов (Богданов, 1954).

Повышенная биогенность бурозема, по сравнению с палевой почвой, также подтверждается данными по содержанию в них гумуса и азота (см. табл. 1). Отмеченная существенная разница в содержании общего Р в гор. CD бурозема и гор. С палевой почвы также подтверждается и для других минеральных и гумусовых горизонтов почвенных профилей изучаемых почв, при этом в обоих типах данных почв общее количество фосфора, отмечаемое в погребенных пирогенных гумусовых горизонтах, значительно возрастает по сравнению со смежными минеральными горизонтами почвенного профиля (табл. 2).

Отмеченная выше тенденция относительной биогенности изучаемых почв целиком подтверждается в оценке содержания и распределения в них общего Р (табл. 2).

Таблица 1. Физико-химические свойства мерзлотных пирогенно-трансформированных почв Центральной и Южной Якутии

Table 1. Physico-chemical properties of permafrost pyrogenic-transformed soils of Central and Southern Yakutia

Гори- зонт	Глубина, см	pH _{NH₂O}	Гумус	Азот	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Фракции, %		Fe ₂ O ₃ по Тамму, %
			%	Ca ²⁺	Mg ⁺²	H ⁺	<0.001 мм	<0.01 мм		
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)										
Av	0–2	7.3	14.1	-	30.7	5.7	-	4.6	5.8	0.13
AJ	4–14	6.7	5.6	0.28	23.4	7.4	-	6.7	8.4	0.18
VPL/BC	18–28	6.7	0.6	0.04	8.4	1.4	-	4.2	6.3	0.12
[AYpir]	31–35	7.2	3.1	0.12	20.8	6.9	-	6.9	10.3	0.40
BC	35–40	7.5	0.8	0.03	8.2	2.7	-	4.5	6.4	0.13
[AYpir]	40–50	7.5	3.2	0.13	20.5	4.7	-	8.1	12.9	0.38
BC	55–65	7.9	0.5	0.02	7.9	1.4	-	6.0	7.5	0.16
[AYpir]	74–82	7.8	5.5	0.26	30.5	6.6	-	9.6	16.1	0.36
BC	90–100	8.3	0.8	0.03	10.9	2.2	-	6.7	9.5	0.14
C	140–150	8.3	0.1	0.02	9.2	1.3	-	6.0	7.6	0.12

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Гори- зонт	Глубина, см	pH _{H₂O}	Гумус	Азот	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Фракции, %		Fe ₂ O ₃ по Тамму, %
			%	Ca ²⁺	Mg ⁺²	H ⁺	<0.001 мм	<0.01 мм		
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)										
AУpir	2–9	5.1	17.3	0.54	13.6	3.4	15.1	9.3	27.4	0.72
BM	15–25	5.4	7.5	0.28	6.2	2.1	11.6	12.9	34.0	0.79
[AУpir]	30–40	5.2	14.7	0.40	4.9	1.0	14.4	9.3	28.6	1.48
BM	43–51	5.6	3.7	0.10	4.3	2.1	6.1	4.2	15.3	1.72
[AУpir]	51–57	5.2	32.2*	0.90	10.1	6.7	24.4	5.5	20.7	2.45
BCm	60–70	5.7	8.7	0.29	9.6	0.9	11.0	11.7	33.9	1.58
CD	70–80	6.9	1.8	-	4.2	1.8	2.1	3.2	10.3	0.51

Примечание. * – приведено значение потери при прокаливании, прочерк – не определено.

Note. * – the value of loss on ignition is given, dash – not defined.

Таблица 2. Содержание фосфора в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии (где $P_{\text{общ.}}$ – общий фосфор, $P_{\text{орг. соед.}}$ – фосфор органических соединений, $P_{\text{мин.}}$ – фосфор минеральных соединений)

Table 2. Phosphorus content in permafrost forest pyrogen-transformed soils of Central and Southern Yakutia (where P_{total} – total phosphorus, $P_{\text{org. comp.}}$ – phosphorus in organic compounds, $P_{\text{min. comp.}}$ – phosphorus in mineral compounds)

Горизонт	Глубина, см	$P_{\text{общ.}}$, мг $P_2O_5/100$ г почвы	$P_{\text{орг. соед.}}$		$P_{\text{мин.}}$	
			мг $P_2O_5/100$ г почвы	% от общего	мг $P_2O_5/100$ г почвы	% от общего
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)						
Av	0–2	257.1	104.4	40.6	152.7	59.4
AJ	4–14	250.2	103.9	41.5	146.3	58.5
BPL/BC	18–28	143.0	60.2	42.1	82.8	57.9
[AYpir]	31–35	103.8	41.2	39.7	62.6	60.3
BC	35–40	60.0	28.7	47.8	31.3	52.2
[AYpir]	40–50	50.4	13.0	25.8	37.4	74.2
BC	55–65	34.9	7.4	21.2	27.5	78.8
[AYpir]	74–82	36.4	8.4	23.1	28.0	76.9
BC	90–100	11.0	1.3	11.8	9.7	88.2
C	140–150	35.2	15.3	43.5	19.9	56.5

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Горизонт	Глубина, см	Р _{общ.} мг Р ₂ О ₅ /100 г почвы	Р _{орг.соед.}		Р _{мин.}	
			мг Р ₂ О ₅ /100 г почвы	% от общего	мг Р ₂ О ₅ /100 г почвы	% от общего
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)						
О	0–2	310.9	164.2	52.8	146.7	47.2
AУpir	2–9	427.2	241.3	56.5	185.9	43.7
ВМ	15–25	282.2	150.2	53.2	132.0	46.8
[AУpir]	30–40	308.8	160.0	51.8	148.8	48.2
ВМ	43–51	98.0	65.4	66.7	32.6	33.3
[AУpir]	51–57	195.7	140.7	71.9	55.0	28.1
ВСm	60–70	131.9	97.2	73.7	34.7	26.3
CD	70–80	114.3	92.9	81.3	21.4	18.7

Содержание всех форм минеральных фосфатов в изучаемых почвах изменяется значительно и составляет в палевой почве Центральной Якутии 9.7–152.7, а в буроземе Южной Якутии – 21.4–185.9 мг $P_2O_5/100$ г почвы (табл. 3).

При этом в аналогичных горизонтах почвенного профиля общее количество данных фосфатов значительно выше в буроземе, чем в палевой почве. Во фракционном составе данных минеральных фосфатов в изучаемых почвах в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов, а среди последних – железофосфаты. Так, относительное суммарное содержание Al-P и Fe-P в палевой почве составляло 43.3–93.6%, а Fe-P – 26.8–85.1%, а в буроземе соответственно 58.3–94.3% и 16.9–87.4%. Также отмечается относительно высокое количество окклюдированных алюмо-железофосфатов, фиксируемое в средней части профиля палевой почвы на глубине 35–82 см, которое было равно 14.2–21.4% от общей суммы минеральных фосфатов. Лишь в гор. BC и C палевой почвы относительно преобладали рыхлосвязанные и окклюдированные алюмо- и железофосфаты, составляя соответственно 32.0 и 54.0%, а в гор. CD бурозема – Ca-P, относительное содержание которых было равно 71.5%. При этом необходимо отметить, что относительная доля Fe-P в постпирогенных погребенных гумусовых горизонтах обеих почв, как правило, значительно возрасла по сравнению с таковыми, отмечаемыми для смежных минеральных горизонтов почвенного профиля (табл. 3), что связано с биогенно-пирогенным ожелезнением, которое является следствием влияния пирогенеза и подтверждается данными по количеству оксалаторастворимого Fe (см. табл. 1).

Для изучения статистических параметров распределения форм фосфора и фракций минеральных фосфатов в исследованных типах мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии был применен статистический анализ, основанный на известных принципах (Дмитриев, 2009). Полученные средние величины $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$, $P_{\text{мин.}}$ и фракций минеральных фосфатов в буроземе типичном Южной Якутии оказались выше таковых, полученных для палевой типичной почвы Центральной Якутии (табл. 4). Так, средние значения $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$ и $P_{\text{мин.}}$ в буроземе превышали таковые в палевой почве соответственно в 2.4, 3.6 и 1.6 раза. При

этом внутрипрофильное распределение отдельных форм Р и фракций фосфатов в данных почвах было более вариабельным, когда коэффициент вариации составлял 69–92%, а иногда и более 100%.

Для определения статистической значимости различий полученных значений данных форм Р и фракций фосфатов был использован также известный подход, связанный с применением непараметрического критерия Вилкоксона (Дмитриев, 2009) при попарном сравнении малых выборок (объемом меньше 30). При этом нулевая гипотеза (H_0) предполагает равенство значений двух выборок размером m и n , где m – объем меньшей выборки, когда выполняется условие W_x или $W_y < W_\alpha$. И, наоборот, при неравенстве величин двух выборок вступает в силу альтернативная гипотеза (H_1), при этом W_x или $W_y > W_\alpha$, для данного уровня значимости α . В нашем случае почти все величины сравниваемых форм Р и фракций фосфатов данных почв статистически достоверно различались с доверительной вероятностью $p = 0.95$ и $p = 0.99$. Лишь для фракции рыхлосвязанных фосфатов данное положение статистически достоверно не подтвердилось, когда $W_y = 28$ оказалось меньше $W_\alpha = 49$ и 43 соответственно при $\alpha = 0.05$ и $\alpha = 0.01$ (табл. 5).

Отмеченные выше тенденции изменения фосфатного состояния исследуемых мерзлотных постпирогенных полициклических почв Центральной и Южной Якутии также подтверждаются данными проведенного корреляционного анализа. Так, высокие положительные статистически значимые связи в палевой почве были обнаружены для количества Al-P и Fe-P и содержания общего, органического, а также минерального фосфора. В буроземе аналогичные корреляционные связи были выявлены только для Fe-P и $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$ и $P_{\text{мин.}}$ (табл. 6). Последнее обстоятельство указывает на то, что увеличение общего количества фосфора, а также его органической и минеральных форм, в палевой почве сопровождается одновременным увеличением как Al-P, так и Fe-P, а в буроземе – в основном Fe-P (см. табл. 2, 3). При этом можно утверждать, что в составе минеральных фосфатов изучаемых мерзлотных почв, как правило, преобладающей фракцией являются Fe-P.

Таблица 3. Формы минеральных фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии

Table 3. Forms of mineral phosphates in permafrost forest pyrogenically transformed soils of Central and Southern Yakutia

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						
		Рыхло-связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	Сумма
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
Av	0–2	<u>6.1</u>	<u>28.8</u>	<u>112.5</u>	<u>2.0</u>	-	<u>3.3</u>	152.7
		4.0	18.9	73.7	1.3		2.1	
AJ	4–14	<u>3.2</u>	<u>12.4</u>	<u>124.5</u>	<u>1.2</u>	-	<u>5.0</u>	146.3
		2.2	8.5	85.1	0.8		3.4	
BPL/BC	18–28	<u>3.0</u>	<u>15.0</u>	<u>59.5</u>	<u>2.6</u>	-	<u>2.7</u>	82.8
		3.6	18.1	71.9	3.1		3.3	
[AYpir]	31–35	<u>3.0</u>	<u>10.0</u>	<u>41.0</u>	<u>3.9</u>	-	<u>4.7</u>	62.6
		4.8	16.0	65.5	6.2		7.5	
BC	35–40	<u>4.7</u>	<u>13.0</u>	<u>6.5</u>	<u>2.5</u>	-	<u>4.6</u>	31.3
		15.0	41.5	20.8	8.0		14.7	
[AYpir]	40–50	<u>4.5</u>	<u>12.0</u>	<u>13.0</u>	<u>2.6</u>	-	<u>5.3</u>	37.4
		12.0	32.1	34.8	6.9		14.2	
BC	55–65	<u>4.1</u>	<u>8.0</u>	<u>6.5</u>	<u>3.0</u>	-	<u>5.9</u>	27.5
		14.9	29.2	23.6	10.9		21.4	
[AYpir]	74–82	<u>3.9</u>	<u>6.5</u>	<u>10.8</u>	<u>2.3</u>	-	<u>4.5</u>	28.0
		13.9	23.2	38.6	8.2		16.1	

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						
		Рыхло- связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	Сумма
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
BC	90–100	<u>3.1</u> 32.0	<u>1.6</u> 16.5	<u>2.6</u> 26.8	<u>2.0</u> 20.6	-	<u>0.4</u> 4.1	9.7
C	140–150	<u>3.4</u> 17.1	<u>1.2</u> 6.0	<u>4.5</u> 22.6	<u>0.7</u> 3.5	-	<u>10.1</u> 50.8	19.9
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
O	0-2	<u>36.5</u> 24.9	<u>18.8</u> 12.8	<u>89.0</u> 67.0	<u>0.9</u> 0.6	-	<u>1.5</u> 1.0	146.7
AУpir	2–9	<u>1.4</u> 0.7	<u>16.8</u> 9.0	<u>158.5</u> 85.3	<u>1.4</u> 0.7	<u>3.3</u> 1.8	<u>4.5</u> 2.4	185.9
BM	15–25	<u>0.4</u> 0.2	<u>9.5</u> 7.2	<u>110.0</u> 83.3	<u>1.5</u> 1.1	<u>5.1</u> 3.9	<u>5.5</u> 4.2	132.0
[AУpir]	30–40	<u>0.3</u> 0.2	<u>6.3</u> 4.2	<u>130.0</u> 87.4	<u>1.2</u> 0.8	<u>5.0</u> 3.4	<u>6.0</u> 4.0	148.8
BM	43–51	<u>1.1</u> 3.4	<u>13.5</u> 41.4	<u>5.5</u> 16.9	<u>6.4</u> 19.6	<u>3.4</u> 10.4	<u>2.7</u> 8.3	32.6

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						Сумма
		Рыхло- связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
[AYpir]	51–57	<u>1.5</u> 2.7	<u>35.5</u> 64.5	<u>11.5</u> 20.9	<u>3.2</u> 5.8	<u>0.7</u> 1.3	<u>2.6</u> 4.7	55.0
BCm	60–70	<u>1.2</u> 3.5	<u>20.3</u> 58.5	<u>7.0</u> 20.2	<u>1.7</u> 4.9	<u>0.6</u> 1.7	<u>3.9</u> 11.2	34.7
CD	70–80	<u>0.9</u> 4.2	<u>0.3</u> 1.4	<u>4.3</u> 20.1	<u>15.3</u> 71.5	-	<u>0.6</u> 2.8	21.4

Примечание. Над чертой содержание в мг P₂O₅/100 г почвы, под чертой – в % от суммы всех фракций.
Note. Above the line – content P₂O₅/100 g of soil (mg), below the line – in % of the sum of all fractions.

Таблица 4. Статистические показатели распределения фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии

Table 4. Statistical indicators of phosphate distribution in permafrost forest pyrogenically transformed soils of Central and Southern Yakutia

Фосфаты	n	lim	x	S	Sx	V, %
Палевая типичная постпирогенная, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)						
Р общ.	10	11.0–257.1	98.2	90.4	28.2	92
Р орг. соед.	-/-	1.3–104.4	38.4	38.9	12.2	101
Р мин.	-/-	9.7–152.7	59.8	51.8	16.2	87
Р рыхлосв.	-/-	3.0–6.1	3.9	1.0	0.3	26
Al-P	-/-	1.2–28.8	10.8	7.8	2.4	72
Fe-P	-/-	2.6–124.5	38.1	46.2	14.4	121
Ca-P	-/-	0.7–3.9	2.3	0.9	0.3	39
Оккл. Al(Fe)-P	10	0.4–10.1	4.6	2.5	0.8	54
Бурозем типичный постпирогенный, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)						
Р общ.	8	98.0–427.2	233.6	117.0	41.8	18
Р орг. соед.	-/-	65.4–241.3	139.0	54.7	19.5	39
Р мин.	-/-	21.4–185.9	94.6	65.2	23.3	69
Р рыхлосв.	-/-	0.3–36.5	5.4	12.6	4.5	233
Al-P	-/-	0.3–35.5	15.1	10.6	3.8	70
Fe-P	-/-	4.3–158.5	64.5	64.4	23.0	100
Ca-P	-/-	0.9–15.3	3.9	4.9	1.7	126
Оккл. Al(Fe)-P	8	0.6–6.0	3.4	1.9	0.7	56

Примечание. n – объем выборки, lim – пределы изменения содержания, x – среднее значение, S – стандартное отклонение, Sx – ошибка среднего, V – коэффициент вариации.

Note. n – sample volume, lim – limits of content variation, x – mean value, S – standard deviation, Sx – mean error, V – coefficient of variation.

Таблица 5. Оценка содержаний фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии посредством статистики Вилкоксона

Table 5. Estimation of phosphate content in permafrost forest pyrogen-transformed soils of Central and Southern Yakutia using Wilcoxon statistics

Фосфаты	N	T	W _x	W _y	W _α , α = 0.05	W _α , α = 0.01
P _{общ.}	18	171	67	104	49	43
P _{орг. соед.}	---	---	61	110	---	---
P _{мин.}	---	---	81	90	---	---
P _{рыхлосв.}	---	---	143	28	---	---
Al-P	---	---	84	87	---	---
Fe-P	---	---	87	84	---	---
Ca-P	---	---	97	74	---	---
Оккл. Al(Fe)-P	18	171	108	63	49	43

Примечание. N – объем упорядоченной выборки, T – общая сумма рангов, W_x – сумма рангов выборки величины x (первой выборки), W_y – сумма рангов выборки величины y (второй выборки), W_α – критическое значение статистики Вилкоксона соответственно для α = 0.05 и α = 0.01 (Дмитриев, 2009, с. 319).

Note. N – volume of the ordered sample, T – total sum of ranks, W_x – sum of ranks of the sample of value x (the first sample), W_y – sum of ranks of the sample of value y (the second sample), W_α – critical value of the Wilcoxon statistic for α = 0.05 and α = 0.01, respectively (Dmitriev, 2009, p. 319).

Таблица 6. Значение коэффициентов корреляции между содержанием фракций минеральных фосфатов и физико-химическими свойствами пирогенно-трансформированных мерзлотных почв

Table 6. Correlation coefficients between the content of mineral phosphate fractions and physico-chemical properties of pyrogenically transformed permafrost soils

Фракции минеральных фосфатов	Физико-химические свойства							
	P _{общ.}	P _{орг.}	P _{мин.}	pH _{H2O}	Гумус	S*	<0.001 мм	<0.01 мм
Палевая типичная, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
Ca-P	-0.178	-0.273	-0.228	-0.206	-0.010	0.085	0.054	0.174
Al-P	0.763	0.737	0.763	-0.639	0.041	0.050	-0.532	-0.594
Fe-P	0.990	0.989	0.993	-0.787	0.520	0.366	-0.299	-0.353
Бурозем типичный, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
Ca-P	-0.616	-0.548	-0.645	0.412	-0.207	-0.300	-0.774	-0.871
Al-P	0.042	0.156	-0.057	-0.097	0.751	0.787	-0.357	-0.319
Fe-P	0.953	0.874	0.978	-0.690	0.002	0.062	0.331	0.423

Примечание. S* – сумма обменных оснований, выделены статистически значимые связи для p = 0.95.

Note. S* – sum of exchangeable bases, statistically significant relationships are highlighted for p = 0.95.

Следовательно, необходимо полагать, что высокое содержание железозосфатов в обеих изучаемых мерзлотных почвах, а также окклюдированных алюмо-железозосфатов в палеовой почве, является региональной особенностью фосфатного состояния данных почв и обусловлено проявлением в их генезисе процессов как криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения.

Впервые на проявление процесса криогенного ожелезнения в мерзлотных почвах криолитозоны в свое время обратила внимание Н.А. Ногина (Ногина, 1964; Ногина и др., 1968), относя его, главным образом, к генезису мерзлотно-таежных поверхностно-ожелезненных почв Восточного Забайкалья. В частности, она отмечала по поводу генезиса данных почв, что эти почвы образованы специфическими процессами криогенного ожелезнения, то есть денатурацией и частичной кристаллизацией несиликатных форм Fe при промерзании, при этом степень криогенного ожелезнения здесь на одних и тех же породах нарастала с увеличением континентальности климата.

В наше время особенности генезиса и плодородия данных почв, связанные с педогеохимией Fe, также подтверждаются в последних исследованиях. В частности указано, что генезис и плодородие мерзлотно-таежных почв в значительной степени определяются содержанием в них подвижных соединений железа, при этом отмечается их аккумуляция в гумусовом и надмерзлотном горизонтах. Содержание подвижных форм железа по Мера и Джексону в суглинистых разновидностях этих почв может достигать больших величин порядка 1 000 мг/100 г почвы. Повышенное содержание Fe в данных почвах обуславливает микроструктуру почв и значительно уменьшает подвижность фосфатов (Савич и др., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что помимо криогенеза в формировании особенностей фосфатного состояния данных мерзлотных почв, развивающихся в ландшафтно-климатических условиях Центральной и Южной Якутии, оказывает влияние также и пирогенный фактор. Таким образом, образование и накопление Fe-P в мерзлотных лесных почвах

указанных регионов криолитозоны Якутии происходит под влиянием процессов как криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения. Исходя из всего вышесказанного можно сделать следующие основные выводы.

1. Бурозем Южной Якутии, по сравнению с мерзлотной палевой почвой Центральной Якутии, формируется в условиях более мягкого и влажного континентального климата криолитозоны и отличается более высокой биогенностью, что проявляется в его повышенной гумусированности, а также более высоком содержании общего N и P.

2. В составе фосфора бурозема абсолютно преобладали оргонофосфаты, составляя 51.8–81.3% от общего содержания данного элемента, в то время как в палевой почве, наоборот, преобладали минеральные формы P, на долю которых приходилось 52.2–88.2%.

3. Во фракционном составе минеральных фосфатов обеих изучаемых мерзлотных почв в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов, относительное количество которых было равно 52.8–94.3%, а среди последних – фосфаты железа, содержание которых составляло 34.8–87.4%.

4. Исследуемые типы мерзлотных почв статистически достоверно различались по содержаниям почти всех форм фосфора и фракций минеральных фосфатов с высокой доверительной вероятностью $p = 0.95$ и $p = 0.99$. Лишь только для выборок количеств рыхлосвязанных фосфатов эти различия статистически не подтверждались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
3. Богданов Н.И. Валовой и органический фосфор в сибирских черноземах // Почвоведение. 1954. № 5. С. 27–32.
4. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 272 с.
5. Гинзбург К.Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Изд-во “Наука”, 1981. 244 с.

6. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 328 с.
7. *Краснощеков Ю.Н.* Трансформация серогумусовых почв сосновых лесов под влиянием пожаров в юго-западном Прибайкалье // Лесоведение. 2011. № 2. С. 3–12.
8. *Мякина Н.Б., Аринушкина Е.В.* Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 63 с.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Книга 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 602 с.
10. *Ногина Н.А.* Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
11. *Ногина Н.А., Лебедева И.И., Шурыгина Е.А.* К вопросу о влиянии низких отрицательных температур на растворимость и подвижность несиликатных форм железа // Почвоведение. 1968. № 2. С. 66–75.
12. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И.* Химия почв. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.
13. *Петров Д.Г.* Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 109–145. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-109-145](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-109-145).
14. *Попович Л.П.* Фосфатное состояние почв // Почвоведение. 1992. № 11. С. 24–35.
15. Практикум по почвоведению / Под ред. *И.С. Кауричева*. М.: Колос, 1980. 272 с.
16. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.
17. *Роде А.А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 92 с.
18. *Савич В.И., Скрябина Д.С., Норвосурэн Ж.* Влияние криогенеза на генезис и плодородие мерзлотно-таежных почв // Известия ТСХА. 2015. Вып. 2. С. 5–14.
19. *Чевычелов А.П.* Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное почвообразование на Севере-Востоке Азии (на примере Южной Якутии). Новосибирск: СО РАН, 1997. 34 с.
20. *Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю.* Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 243–252.
21. *Чевычелов А.П., Захарова О.Г.* К оценке фосфатного состояния мерзлотных почв Южной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. С. 51–59.

22. Чевычелов А.П., Захарова О.Г., Бурнашева М.П. Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 1. С. 104–116.
23. Johnson D.L. Biomante evolution ocnol the realistribution of organic matter by clay Podzol soil // Can. J. Soil. Sci. 1971. Vol. 51. No. 3. P. 509–513.

REFERENCES

1. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical methods of soils), Moscow: Nauka, 1975, 656 p.
2. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Guidelines for chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970, 487 p.
3. Bogdanov N.I., Valovoi i organicheskii fosfor v sibirskikh chernozemakh (Gross and organic phosphorus in Siberian chernozem), *Pochvovedenie*, 1954, No. 5, pp. 27–32.
4. Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochv* (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1989, 272 p.
5. Ginzburg K.E., *Fosfor osnovnykh tipov pochv SSSR* (Phosphorus of the main types of soils in the USSR), Moscow: Nauka, 1981, 244 p.
6. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (*Mathematical statistics in soil science*), Moscow: LIBROKOM, 2009, 328 p.
7. Krasnoshchekov Yu.N., Transformatsiya serogumusovykh pochv osnovnykh lesov pod vliyaniem pozharov v yugo-zapadnom Pribaikal'e (Transformation of gray-humus soils of pine forests under the influence of fires in Southwestern Lake Baikal basin), *Lesovedenie*, 2011, No. 2, pp. 3–12.
8. Myakina N.B., Arinushkina E.V., *Metodicheskoe posobie dlya chteniya rezul'tatov khimicheskikh analizov pochv* (Methodical manual for reading the results of chemical analyzes of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1979, 63 p.
9. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR* (Scientific and applied reference book on the climate of the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 602 p.
10. Nogina N.A., *Pochvy Zabaikal'ya* (Soils of Transbaikalia), Moscow: Nauka, 1964, 314 p.
11. Nogina N.A., Lebedeva I.I., Shurygina E.A., K voprosu vliyaniya nizkikh otritsatel'nykh temperatur na rastvorimost' i podvizhnost' nesilikatnykh form zheleza (On the effect of low negative temperatures on the solubility and mobility of non-silicate forms of iron), *Pochvovedenie*, 1968, No. 2, pp. 66–75.

12. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Suhanova N.I., *Himija pochv* (Soil Chemistry), Moscow: Vysshaja shkola, 2005, 558 p.
13. Petrov D.G., The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 105, pp. 109–145, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-109-145](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-109-145).
14. Popovich L.P., Fosfatnoe sostoyanie pochv (Phosphate state of soils), *Pochvovedenie*, 1992, No. 11, pp. 24–35.
15. *Praktikum po pochvovedeniyu* (Practicum on Soil Science), Moscow: Kolos, 1980, 272 p.
16. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1983, 320 p.
17. Rode A.A., *Sistema metodov issledovaniya v pochvovedenii* (The system of research methods in soil science), Novosibirsk: Nauka, 1971, 92 p.
18. Savich V.I., Skryabina D.S., Norovosuren Zh., Vliyanie kriogeneza na genesis i plodorodie merzlotno-taezhnykh pochv (The Influence of cryogenesis on genesis and fertility of cryogenic and taiga cryogenic soils), *Izvestiya TSKhA*, 2015, Vol. 2, pp. 5–14.
19. Chevychelov A.P., *Pirogenез i gorno-taezhnoe kontinental'noe gumidnoe pochvoobrazovanie na Severe-Vostoke Azii (na primere Yuzhnoi Yakutii)* (Pyrogenesis and mountain-taiga continental humid soil formation in North-East Asia (on the example of South Yakutia), Novosibirsk: SO RAN, 1997, 34 p.
20. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Yu., Postpirogennyye politsiklicheskie pochvy v lesakh Yakutii i Zabaikal'ya (Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikal region), *Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 243–252.
21. Chevychelov A.P., Zakharova O.G., K otsenke fosfatnogo sostoyaniya merzlotnykh pochv Yuzhnoi Yakutii (To the assessment of the phosphate status of permafrost soils of Southern Yakutia), *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, 2020, Vol. 25, pp. 51–59.
22. Chevychelov A.P., Zakharova O.G., Burnasheva M.P., Fosfatnoe sostoyanie merzlotnykh pochv Tsentral'noi Yakutii (The phosphate status of permafrost soils in Central Yakutia), *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, 2023, Vol. 28, No. 1, pp. 104–116.
23. Johnson D.L., Biomante evolution ocnol the redistribution of organic matter by clay Podzol soil, *Can. J. Soil. Sci.*, 1971, Vol. 51, No. 3, pp. 509–513.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 118

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 25.03.2024 г.
Подписано в печать 25.03.2024 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 19.5 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