

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 111

Москва
2022

<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 111

**Moscow
2022**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Editorial board:

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

© ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, 2022 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России

Столбовой В.С. 5

Почвенное и биологическое разнообразие территории бывших торфоразработок Шатурской Мещеры в контексте их антропогенной трансформации

Шишконокова Е.А., Аветов Н.А.,

Виндекер Г.В., Толтышева Т.Ю., Гараева Н.Р. 30

Распознавание пахотных почв по фотографиям, получаемым в рамках краудсорсинговых технологий

Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Виндекер Г.В. 77

Характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы при длительном воздействии разных систем удобрения

Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т.,

Ямалтдинова В.Р., Шляпина Я.В. 97

Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи

Кравцов Ю.В., Смоленцева Е.Н. 116

Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почв г. Кондопога и г. Костомукша (Республика Карелия)

Новиков С.Г. 157

Сравнительная характеристика лесных подстилок дерново-подзолистых почв Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

Мамонтов В.Г., Савичев А.Т., Ефимов О.Е. 185

CONTENTS

Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia <i>Stolbovoy V.S.</i>	5
Soil- and biodiversity of the former peat mines in Shaturskaya Meshchera in the context of their anthropogenic transformation <i>Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Vindeker G.V., Tolpysheva T.Yu., Garaeva N.R.</i>	30
Recognition of arable soils from photographs obtained as part of crowdsourcing technologies <i>Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Vindeker G.V.</i>	77
Characteristics of humic acids in sod-podzolic soil under long-term exposure to different fertilization systems <i>Zavyalova N.E., Vasbieva M.T., Yamaltidinova V.R., Shlyapina Ya.V.</i>	97
Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils <i>Kravtsov Yu.V., Smolentseva E.N.</i>	116
Assessment of the heavy metal contamination of soils in Kondopoga and Kostomuksha (Republic of Karelia) <i>Novikov S.G.</i>	157
Comparative characterisation of forest litter on sod-podzolic soils of Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev <i>Mamontov V.G., Savichev A.T., Efimov O.E.</i>	185

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С. Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 5-29. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 5-29, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29

Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России

© 2022 г. В. С. Столбовой

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

Поступила в редакцию 18.05.2022, после доработки 11.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: Баланс углерода в лесных почвах (БУЛП) исследовался на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (**B**iosphere **G**reenhousegas **I**nventory). Потепление в базовый период времени (1990 ± 5 гг.) в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. усиления эмиссии CO₂. В горизонте “O” уменьшение БУЛП составляет минус 101.4 МтС¹. Потепление климата на 1.5 °C и 3 °C вызовет дальнейшее уменьшение БУЛП на 345.7 МтС и 691.4 МтС, соответственно. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. увеличение поглощения CO₂. В горизонте “O” почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приводит к развитию положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно. Положительные изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах в исследованном интервале температур отмечены в горизонте “A1” (7.3 МтС, 24.9 МтС и

¹ Миллион тонн углерода

49.8 МтС) и горизонте “Bh” (14.1 МтС, 48.0 МтС, 96.2 МтС). В обоих типах лесов потепление климата инициирует суммарный отрицательный БУЛП (минус 17.6 МтС). Дальнейшее потепление климата на 1.5 °С и 3.0 °С приведет к уменьшению БУЛП на минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС. Это составит 4%, 13% и 27% от совокупного годового выброса РФ в 2020 г. Отрицательный БУЛП не является показателем усиления CO₂ эмиссии. Окончательный вывод о CO₂ эмиссии/поглощении можно сделать только при анализе лесной экосистемы при проведении сопряженного анализа “почва–древостой”. Погрешность оценки БУЛП в органо-профиле почв в базовый период составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности P = 0.67 и ± 47 МтС при уровне достоверности P = 0.95. При повышении температуры на 1.5 °С погрешность составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности P = 0.67 и P = 0.95 соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °С составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности P = 0.67 и P = 0.95 соответственно.

Ключевые слова: парниковые газы, эмиссия CO₂, поглощение CO₂, экосистема.

Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia

© 2022 V. S. Stolbovoy

*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 28.05.2022, Revised 11.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The carbon balance in forest soils (CBFS) was studied on the basis of the geostatistical process model “BIGIN” (Biosphere Greenhousegas Inventory). Warming in boreal forests in the baseline period (1990 ± 5 yr.) initiates a shift in the CBFS towards its decrease, i. e. CO₂ source. In the horizon “O”, the decrease in the CBFS is minus 101.4 МтС. The warming of the climate by 1.5 °C and 3 °C will cause a further decrease in the CBFS by 345.7 МтС and 691.4 МтС, respectively. In moderately warm forests, climate warming initiates the formation of a positive CBFS, i. e. CO₂ sink. In the horizon “O” of the soils of moderately warm forests, climate warming in the baseline period and in the future leads to the development of positive CBFS, i. e. CO₂ sink of 62.4 МтС, 212.8 МтС and 425.4 МтС, respectively. Positive changes in the CBFS in boreal and moderately warm forests in the studied

range of climatic temperatures were noted in the horizon “A1” (7.3 MtC, 24.9 MtC and 49.8 MtC) and the horizon “Bh” (14.1 MtC, 48.0 MtC, 96.2 MtC). Climate warming initiates a total negative CBFS (minus 17.6 MtC). Further warming of the climate by 1.5 °C and 3.0 °C will lead to a decrease in the CBFS by minus 60.0 MtC and minus 120.0 MtC. In terms of CO₂-equivalent, this will amount to 4%, 13% and 27% of the total country annual emission in 2020. Negative CBFS is not an indicator of emission strengthening. The final conclusion about CO₂ source/sink can be made only when analyzing the forest ecosystem when conducting a coupled soil-stand analysis. The error in the estimation of the CBFS in the soil organic profile in the baseline period is ± 23.0 MtC at a confidence level of $P = 0.67$ and ± 47 MtC at a confidence level of $P = 0.95$. With an increase in temperature by 1.5 °C, the error will be ± 80.0 MtC and ± 160.0 MtC at confidence levels of $P = 0.67$ and $P = 0.95$ respectively. The magnitude of the error will be ± 160.0 MtC and ± 320.0 MtC at confidence levels $P = 0.67$ and $P = 0.95$ respectively with an increase in temperature by 3.0 °C.

Keywords: greenhouse gases, CO₂ emission, CO₂ absorbtion, ecosystem.

ВВЕДЕНИЕ

Сплошное систематическое изучение лесных почв в Российской Федерации (РФ) не проводится. Это связано с особенностями Лесного Кодекса РФ ([ЛК, 2015](#)), в котором понятие лес определяется весьма широко как “экологическая система или как природный ресурс” (Ст. 5, [ЛК РФ](#)). При этом в обеих частях приведенного понятия леса почва не упоминается, что является основанием для ее исключения из лесной инвентаризации. Вместе с тем РФ ратифицировала и приняла ряд международных правовых документов, которые требуют экосистемного (сопряженного) анализа почв и лесной растительности. Наиболее важными из них выступают: Рамочная конвенция об изменении климата (The UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), Конвенция о биологическом разнообразии (The Convention on Biological Diversity, CBD), Конвенция по борьбе с опустыниванием (The UN Convention to Combat Desertification, UNCCD). В отмеченных международных соглашениях (детали см. на сайтах Конвенций) роль почв считается ведущей. Так в конвенции по изменению климата почва признается вторым по значимости, после литосферы, глобальным резервуаром углерода, контролирующим концен-

трацию парниковых газов в атмосфере. В контексте биоразнообразия считается, что почвы содержат почти 96% генного пула планеты. Плодородие и деградация почв выступают главными составляющими конвенции по борьбе с опустыниванием.

Полное соблюдение отмеченных выше Конвенций в отношении лесных почв страны до недавнего времени было невозможно. Это связано с фрагментарностью доступных почвенных данных в лесном фонде, который составляет почти 66% от общей площади страны ([Государственный доклад..., 2013](#)). Кроме того, до недавнего времени, основным легальным (т. е. официально утвержденным) почвенным документом РФ служила Классификация и диагностика почв СССР ([Классификация..., 1977](#)), которая включает только сельскохозяйственные почвы, составляющие около 12% территории страны.

В 2014 г. принят новый почвенный геоинформационный ресурс – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России ([ЕГРПР, 2014](#)), который изменил ситуацию с изученностью почвенного покрова страны. ЕГРПР содержит полную, унифицированную, цифровую информацию обо всех почвах страны, их свойствах и пространственном размещении. Таким образом, ЕГРПР сделал возможным представить обобщенный взгляд на почвы лесного фонда РФ в цифровом формате ([Столбовой, 2018](#)).

В 1985–1995 гг. в России получено большое количество новых фактографических данных по характеристике компонентов углеродного цикла в лесных экосистемах, например, запасам годовой чистой первичной продукции, опад биомассы растительности ([Nilsson et al., 2000](#)), резервуарам почвенного органического вещества ([Stolbovoi, 2000](#); [2002](#); [2006](#)), гетеротрофному дыханию ([Stolbovoi, 2003](#)), речному транспорту углерода ([Романкевич и др., 2001](#)) и т. д. Эти сведения относятся к базовому периоду 1990 ± 5 гг. и транслированы в современные пространственно-распределенные базы данных ГИС ([Stolbovoi et al., 2002](#); [Столбовой и др., 2004](#)). В дополнение к статичным показателям углеродного цикла отмеченные данные позволяют оценить динамику параметров углеродного цикла в связи с наблюдаемыми и прогнозируемыми изменениями климата.

Целью настоящей статьи является оценить влияние потеп-

ления климата на изменение баланса углерода в лесных почвах РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование построено на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (**B**iosphere **G**reenhousegas **I**nventory). Модель разработана автором и использована для подсчета полного углеродного бюджета России ([Nilsson et al., 2000](#)). На базе модели выполнен анализ баланса углерода в почвах Северной Евразии ([Stolbovoy et al., 2014](#)). Одна из версий анализа опубликована в Национальном докладе ([2019](#)). Вместе с тем необходимо отметить относительно ограниченное использование модели “BIGIN” в РФ. Это связано с лимитированной востребованностью биосферных моделей углеродного цикла в стране, которые до недавнего времени имели исключительно научно-познавательное значение. Практическая востребованность сформировалась в последние годы в связи с увеличением внимания к глобальному изменению климата, принятию мер трансграничного регулирования перемещения углеводородов в ЕС, к рынку углеродных квот и др.

Процессная концепция модели BIGIN оперирует базовыми представлениями биогеохимического цикла углерода в наземных экосистемах ([Базилевич, 1993](#); [Глазовская, 2009](#); [Бобкова и др., 2014](#); [Stevenson, 1994](#)). Согласно принятым представлениям, значительная часть ежегодно поступающего растительного опада окисляется, что приводит к высвобождению связанного фотосинтезом CO_2 и его возвращению в атмосферу. Оставшаяся часть опада подвергается процессам микробного метаболизма, который сопровождается процессами цикличного обмена питательными элементами между почвенным органическим веществом и микробной биомассой. Этот обмен приводит к микробно-опосредованной полимеризации органических соединений (производство фенолов) и образованию гумуса. Разложение как каталитическая реакция окисления-восстановления приводит к образованию ряда органических кислот, имеющих общую карбоксильную группу (COOH). Последняя легко диссоциирует протон (H^+) и инициирует процессы выветривания пород. При этом карбоксилат-анион (COO^-) образует растворимые комплексы с катионами металлов, выделяю-

щимися при выветривании. Этот процесс приводит к образованию растворенных органических веществ, которые мигрируют в глубокие слои почв, а также транспортируются в гидросферу и литосферу. Речной сток включает около 15% наземного ежегодного оборота углерода и является единственным источником питательных веществ для океана ([Романкевич и др., 2001](#)). Некоторое количество водорастворимого углерода поглощается породами вадозной зоны ([Kramer, 1994](#)), а также проникает в глубинные слои литосферы, обеспечивая образование ископаемых нефти и газа ([Thurman, 1985](#)).

Перечисленные выше процессы цикла углерода приводят к формированию органо-профиля почв, который представляет собой определенную последовательность генетически связанных горизонтов аккумуляции и трансформации органического вещества. В ЕГРПР ([2014](#)) основные органо-генетические горизонты почв включают: поверхностный органический – О (подстилки, торфа), гумусово-аккумулятивный – A_1 и гумусово-иллювиальный – Bh. Различные почвы характеризуются специфическим набором органо-генетических горизонтов. Так органогенные (торфяные) почвы имеют только О горизонт, Al-Fe-гумусовые (подзолы) почвы имеют горизонт подстилки О и иллювиально-гумусовый горизонт Bh, гумусово-аккумулятивные (черноземы) почвы имеют горизонт подстилки О в нативных условиях и гумусово-аккумулятивный горизонт A_1 , текстурно-дифференцированные (подзолистые) почвы имеют горизонты О, A_1 и Bh.

Исходя из рассмотренных выше особенностей биосферного цикла углерода и связанных с ним педогенетических метаболизм органического вещества, суммарный БУПЛ в органо-профиле почвы (dS) можно описать уравнением:

$$dS = dO + dA_1 + dBh, \quad (1)$$

где O , A_1 , Bh – основные органо-генетические горизонты почв; d – баланс между статьями поступления и расхода органического углерода.

Частные балансы углерода в отдельных органо-генетических горизонтах почв описываются следующими уравне-

ниями:

$$dO = DetA - (DecA + Trans + Mig), \quad (2)$$

где dO – баланс углерода в горизонте O; $DetA$ – поверхностное поступление растительного детрита; $DecA$ – поверхностное разложение растительного детрита $DetA$; $Trans$ – поверхностный сток органического вещества; Mig – внутрипочвенная миграция водорастворимого углерода.

$$dA_1 = DetU + Hum - (DecU + Min), \quad (3)$$

где dA_1 – баланс углерода в горизонте A_1 ; $DetU$ – поступление корневого растительного детрита; Hum – гумификация корневого растительного детрита $DetU$; $DecU$ – минерализация корневого растительного детрита $DetU$; Min – минерализация гумуса почв.

$$dBh = Mig - (DeepLeak + Uro), \quad (4)$$

где dBh – баланс углерода в горизонте Bh; Mig – как определено выше; $DeepLeak$ – сток водорастворимого углерода в глубокие слои литосферы; URO – подземный сток водорастворимого углерода в гидросферу.

В работе применен геостатистический метод расчета БУПЛ, который построен на ГИС анализе независимых пространственно-распределенных баз данных потоков углерода, перечисленных в уравнениях 2–4. В количественном выражении рассматриваемые потоки выступают атрибутами ГИС баз данных почв, растительности, речного стока ([Столбовой и др., 2004](#); [Stolbovoi et al., 2002](#)). Перечисленные базы данных транслировались в “grid” формат с разрешением 1×1 км. Расчеты выполнялись в среде ArcInfo.9 ESRI.

Применение ГИС подходов служит значительному улучшению качества моделей. Поскольку в этом случае используются не точечные наблюдения с сильно варьирующими пространственно-временными показателями, а “сглаженные” пространства признаков. Другим преимуществом выступает возможность нивелирования неравномерности распределения точек наблюдений по терри-

тории. ГИС подход позволяет оперировать пространствами показателей, для которых важно не положение точки наблюдений в пространстве, а ее принадлежность последнему. В этом случае географическое пространство признака представляет собой мозаику полигонов с равномерным по площади распределением значений признака.

Как отмечено выше, в работе использован ряд цифровых баз данных, источники которых и методы создания детально рассмотрены ранее ([Nilsson et al., 2000](#); [Stolbovoi et al., 2002](#); [Столбовой и др., 2004](#)). Для удобства демонстрации разнообразие почв и их характеристик агрегированы на таксономическом уровне отделов почв. Последние выделяются на основании сходства основных элементов строения профилей почв и единства создающих их главных процессов почвообразования ([Фридланд, 1982](#)).

Цифровая база данных лесной растительности включает 48 пространственно-распределенных выделов легенды карты растительности ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Кроме того, было выполнено агрегирование отмеченных выделов по преобладающим породам древостоев.

База данных миграции водорастворимого органического вещества получена на основе справочных данных гидрохимического состава рек, организованных по 28 бассейнам первого порядка. Речные бассейны выделены на основе цифровой модели рельефа ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Внутрипочвенная миграция обобщает опубликованные данные лизиметрических исследований, которые ассоциированы с полигонами классов гранулометрического состава почв и особенностями органо-профилей почв.

Лесные почвы РФ

Разнообразие лесных почв сформировано наложением перечисленных выше цифровых баз данных лесной растительности и почв ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Из данных таблицы 1 следует, что общая площадь почвенного фонда страны равна 1 629.5 млн га. Разница с площадью территории страны (1 709.8 млн га – без территории Крыма) составляет 80.1 млн га и приходится на площади непочвенных образований, таких как внутренние водоемы, ледники и выходы плотных пород. Площадь почв под лесной расти-

тельностью равна 763.5 млн га, что составляет 99.2% от официально приводимой площади лесопокрытых территорий страны ([Государственный доклад..., 2013](#)).

Из данных таблицы 1 видно, что почвы под лесной растительностью характеризуются значительным разнообразием и представлены 12 из 15 отделов почв, выявленных в РФ. Отсутствующие два из отделов почв получили распространение за пределами лесной зоны это: 1) криоземы, характерные для мерзлотных областей тундры и 2) малогумусовые аккумулятивно-карбонатные почвы, получившие развитие в зоне полупустынь. Третий, отсутствующий отдел, представлен органогенными почвами. Эти почвы получили широкое развитие в таежной зоне и имеют мощность торфяного горизонта, превышающую 30 см. Для почв характерны сильно выраженные гидроморфизм и анаэробные условия, которые не способствуют развитию лесной растительности ([Зайдельман, 1981](#)).

В целом площадь распространения отделов почв под лесами следует таковой в почвенном фонде страны. Первое по распространению место занимают Al-Fe-гумусовые подзолы и подбуры (216.7 млн га). На втором месте находятся текстурно-дифференцированные подзолистые почвы (173.1 млн га). Далее идут метаморфические буроземные и буротаежные почвы (164.8 млн га). Следует отметить, что этот порядок нарушается почвами отдела глееземы. Это указывает на то, что характерные для глеезем гидроморфизм и анаэробные условия, как отмечено выше, выступают факторами, лимитирующими развитие лесной растительности.

Эдафическая избирательность лесных ценозов хорошо иллюстрируется относительной долей, занимаемой конкретными почвами под лесной растительностью. Приведенные данные (табл. 1) обнаруживают, что наиболее благоприятными эдафическими условиями для формирования древостоев являются дерново-орган-аккумулятивные почвы (доля лесных почв составляет 80%), которые развиваются под травными лесами и аккумулируют значительное количество биофильных элементов в гумусовом горизонте.

Таблица 1. Лесные почвы в почвенном фонде РФ ([Столбовой, 2018](#))

Table 1. Forest soils in the RF soil pool ([Stolbovoy, 2018](#))

Отдел почв		Площадь почв (млн. га)		Доля почв под лесом, %
Название	Характеристика	Россия	Леса	
Al-Fe-гумусовые	Интенсивная миграция фульвокислотно-алюможелезистых соединений – подзолы, подбуры.	366.7	216.7	59.1
Текстурно-дифференцированные	Дифференциация профиля почв по содержанию илистых частиц – подзолистые почвы.	272.6	173.1	63.5
Глееземы	Признаки интенсивного оглеения, выраженные в сизых, голубых и грязных цветах окраски, – глеевые.	241.6	62.4	25.8
Метаморфические	Выраженный гумусовый горизонт, подстилаемый метаморфическим оглиненным горизонтом, – буроземы, буротаежные.	222.6	164.8	74.0
Гумусово-аккумулятивные	Хорошо выраженный гумусовый горизонт черного цвета – черноземы, каштановые.	160.0	24.0	15.0
Органогенные	Накопление слабо разложенных растительных остатков – торфяные.	116.2	0.0	0.0
Дерновые органо-аккумулятивные	Значительное содержание органического вещества при обилии живых корней и одернованности – дерново-подзолистые, дерновые.	95.9	76.7	80.0
Аллювиальные	Слоистое (скрытослоистое) сложение, погребенные гумусовые горизонты.	55.8	21.8	39.1
Маломощные слаборазвитые	Маломощный, с низким содержанием органического вещества, гумусовый горизонт.	40.0	8.4	21.0

Отдел почв		Площадь почв (млн. га)		Доля почв под лесом, %
Название	Характеристика	Россия	Леса	
Вулканические	Преобладают аллофаны и аморфные продукты выветривания вулканических пеплов. Наличие погребенных почвенных профилей и высокая гумусированность.	16.0	9.9	61.9
Щелочные глинисто-дифференцированные	Процессы дифференциации протекают в условиях щелочной среды без поверхностного переувлажнения – солонцы.	14.8	1.8	12.2
Криоземы	Залегают на мерзлоте, интенсивные криотурбации, нарушение целостности, фрагментация и перемешивание генетических горизонтов.	10.8	0.0	0.0
Литоземы	Крайняя уплотненность и слитость в сухом состоянии. Растрескивание и набухание во влажном состоянии, перемешивание, поверхности скольжения – слитые.	7.6	3.8	50.0
Малогумусовые аккумулятивно-карбонатные	Низкое содержание органического вещества и значительная аккумуляция вторичных карбонатов – бурые пустынно-степные.	7.3	0.0	0.0
Галоморфные	Накопление легкорастворимых солей из засоленных грунтовых воды, либо остаточного содержания в соленосных породах – солончаки.	1.4	0.2	14.3
Итого		1629.5	763.5	46.9

Таковыми же благоприятными свойствами для развития лесной растительности обладают почвы отдела метаморфические – буроземы и буротаежные (доля лесных почв составляет 74%). Отмеченные почвы являются относительно молодыми и обладают значительными запасами легко выветривающихся минералов, определяющих их естественное плодородие. Благоприятными эдафическими свойствами характеризуются текстурно-дифференцированные подзолистые почвы (доля составляет 63.5%) и вулканические почвы (доля составляет 61.9%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические изменения в РФ

Анализ трансформации землепользования в исследование не включен. Поэтому динамика БУЛП определяется исключительно изменением климатических условий.

В 5-ом национальном докладе РФ ([The Fifth..., 2010](#)) отмечено, что в течение 1976–2006 гг. среднее потепление в России составило 1.33 °C. Это увеличение почти в два раза больше, чем глобальное среднее (0.74 °C) за тот же период времени. При этом показано, что наибольшее увеличение минимальной и максимальной суточных температур наблюдалось в холодных регионах страны.

В перспективе, по данным Всемирной метеорологической организации ([UN World Meteorological Organization...](#)), ожидается дальнейшее потепление климата, которое в XXI в. достигнет 1.5–3.0 °C.

Годовое количество осадков за 30-летний период 1976–2006 гг. на всей территории увеличивалось на 7.2 мм каждые 10 лет. Влияние увлажнения на баланс углерода в нашем исследовании не рассматривается.

Связь баланса углерода лесных почв с климатическими данными

Приведенные выше изменения климата относятся к 30-летнему периоду. Как отмечалось выше, анализируемые нами данные БУЛП включают 10-летний базовый временной интервал (1990 ± 5 гг.). Используя коэффициент линейного тренда измене-

ния температуры во времени ($^{\circ}\text{C}/\text{время}$), можно рассчитать, что потепление за 10 лет составило около 0.44°C (далее 0.4°C). При этом средняя величина снижения БУЛП была минус 17.6 МтС (табл. 2). Таким образом, можно определить, что потепление климата на 1°C будет соответствовать уменьшению БУЛП почти на минус 44 МтС . Аналогичным образом может быть рассчитана динамика изменений БУЛП при потеплении климата в России на 1.5°C и 3.0°C (табл. 2).

Обсуждение

Наиболее значимые по величине изменения БУЛП отмечаются для верхнего органогенного горизонта “О” (табл. 2), который представлен слабо разложившимся, часто оторфованным, опадом (бореальные леса), либо гумусированным и перегнойным лесным и травяным опадом (умеренно теплые леса). Очевидно, что поверхностные лесные подстилки наиболее активно взаимодействуют с нижними слоями атмосферы и являются наиболее чувствительными к их температурным параметрам во всех природно-растительных зонах страны. Изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах носят разнонаправленный характер (табл. 2). Потепление в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. наблюдается уменьшение массы подстилки за счет усиления ее минерализации. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. отмечается накопление лесной подстилки.

В органогенном горизонте лесных почв в ряду зон бореальных лесов: лесотундра и северная тайга, средняя и южная тайга наблюдается постепенное снижение БУЛП в базовом временном периоде: минус 43.5 МтС ; минус 32.1 МтС ; минус 24.9 МтС , соответственно. Снижение отрицательного БУЛП в южных зонах согласуется с отмеченным выше более значительным потеплением климата в северных широтах. В базовом периоде общее уменьшение БУЛП в бореальных лесах составляет минус 101.4 МтС . В условиях дальнейшего потепления климата на 1.5°C и 3°C уменьшение БУЛП в горизонте “О” составит 345.7 МтС и 691.4 МтС соответственно.

Таблица 2. Влияние потепления климата на баланс углерода лесных почв РФ
Table 2. Influence of climate warming on carbon balance in the RF forest soil

Природно-растительная зона Морфогенетический горизонт	Тундра	Лесотундра и северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Итого	Умеренные леса	Степи	Полупустыни и пустыни	Итого	Сумма
Климатические особенности леса	Бореальные					Умеренно-теплые				
Базовый период: 1990 ± 5 гг. Потепление: 0.4 °C										
Органогенный, (O)	-0.9	-43.5	-32.1	-24.9	-101.4	17.5	43.8	1.1	62.4	-39.0
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0	0.7	4	1.6	6.3	0.5	0.5	0	1	7.3
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-0.2	-2	11.9	3.5	13.2	-0.4	1.3	0	0.9	14.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-1.1	-44.8	-16.2	-19.8	-81.9	17.6	45.6	1.1	64.3	-17.6
Потепление: 1.5 °C										
Органогенный, (O)	-3.1	-148.3	-109.4	-84.9	-345.7	59.7	149.3	3.8	212.8	-133.0
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0.0	2.4	13.6	5.5	21.5	1.7	1.7	0.0	3.4	24.9
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-0.7	-6.8	40.6	11.9	45	-1.4	4.4	0.0	3	48.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-3.8	-152.7	-55.2	-67.5	-279.2	60.0	155.5	3.8	219.3	-60.0
Потепление: 3.0 °C										
Органогенный, (O)	-6.1	-296.6	-218.9	-169.8	-691.4	119.3	298.6	7.5	425.4	-265.9
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0.0	4.8	27.3	10.9	43	3.4	3.4	0.0	6.8	49.8
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-1.4	-13.6	81.1	23.9	90	-2.7	8.9	0.0	6.2	96.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-7.5	-305.5	-110.5	-135.0	-558.5	120.0	310.9	7.5	438.4	-120.0

Как отмеченное уменьшение ПУЛП повлияет на общие запасы углерода в лесной подстилке бореальных лесов РФ? Общие запасы углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв бореальных лесов РФ составляют около 45.51 ГтС² (Столбовой, 2018). Доля лесной подстилки в последних равна около 15–20%, т. е. составляет почти 7–9 ГтС или в среднем около 8 ГтС (8 000 МтС). Отмеченное выше уменьшение запасов углерода будет около 1%, 4% и 9% при потеплении на 0.4 °C, 1.5 °C и 3 °C соответственно.

В органогенном горизонте почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приведет к развитию положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно (табл. 2). Можно предполагать, что положительный БУЛП в зоне умеренно теплых лесов связан с увеличением продуктивности лесных ценозов в условиях повышенного увлажнения за счет накопления снега и др.

Суммарное изменение БУЛП в органогенном горизонте лесов РФ носит отрицательный характер (минус 39.0 МтС) и прогнозируется при дальнейшем потеплении климата на 1.5 °C и 3 °C (минус 133.0 МтС и минус 265.9 МтС соответственно).

Потепление климата сопровождается положительным сдвигом БУЛП в бореальном и умеренно теплом лесах и увеличением содержания углерода в гумусово-аккумулятивном горизонте “A₁”. В базовом периоде времени (1990 ± 5 гг.) отмеченное увеличение составило 7.3 МтС. При потеплении на 1.5 °C и 3.0 °C положительный БУЛП в горизонте A₁ увеличится почти до 25 МтС и 50 МтС соответственно.

Потепление климата также инициирует положительный сдвиг БУЛП в иллювиально-гумусовом горизонте “Bh” в бореальных и умеренно теплых лесах, что связано с увеличением трансформирующейся массы органического вещества и формированием дополнительных объемов водорастворимых метаболитов. Суммарно в базовом временном периоде и при дальнейшем потеплении (1.5 °C и 3.0 °C) БУЛП в горизонте “Bh” увеличился на 14.1 МтС, 48.1 МтС и 96.1 МтС соответственно.

Следует подчеркнуть, что изменения БУЛП отмечаются во

² Гт – гигатонна

всех морфогенетических горизонтах (O, A₁ и Bh) почв, но различаются как по своей интенсивности, так и по направленности (табл. 2). Этот вывод представляется важным не только для анализа протекающих в почве процессов трансформации и перераспределения органического вещества, но также для понимания внутренней сложности формирования потоков углеродного обмена.

Из данных таблицы 2 следует, что потепление климата в базовый период времени инициировало суммарный отрицательный БУЛП (минус 17.6 МтС). Это свидетельствует о том, что потепление вызывает усиление минерализации органического вещества почв, которая превышает его поступление в почвы. Аналогичная тенденция отмечается и при увеличении потепления на 1.5 °C и 3.0 °C (минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС соответственно).

Неопределенность подсчетов БУЛП является следствием большого количества причин, таких как полнота учета потоков углерода, объективные различия оценки интенсивности потоков в условиях их значительной пространственно-временной изменчивости, использовании различных картографических данных и др. ([Stolbovoi, 2000](#)). Особенности проведенных нами исследований выступают: широкий географический анализ, включающий 48 типов древостоев, 12 отделов почв, покрывающих почти 763.5 млн га почвенного фонда РФ (табл. 1), использование в анализе разнообразных геоинформационных баз данных, характеризующих потоки углеродного обмена в газообразной, жидкой и твердой фазах, использование модели полного углеродного цикла “BIGIN” (уравнения 1–4) лесных экосистем, а также расчеты, выполненные на основе цифровых ГИС-технологий. Применение перечисленного комплекса методов и ГИС баз данных для исследования БУЛП является достаточно уникальным и трудно осуществимым другими исследованиями, включая наиболее продвинутые работы по исследованию бюджета углерода лесов РФ ([Швиденко и др., 2014](#)), а также моделирования (например, [Комаров и др., 2012](#)). Вместе с тем ниже приведено сопоставление, которое позволяет оценить смысловое соответствие полученных нами результатов с данными других исследований в части сопоставления: 1) тенденций изменений БУЛП – CO₂ эмиссия/поглощение (sink/source); 2) полноты разнообразия потоков углерода.

1) Обзор публикаций по рассматриваемой теме показывает, что большинство исследований ([Бобкова др., 2014](#); [Кудяров, 2000](#)) обнаруживают отрицательный БУЛП, что согласуется с полученными нами результатами, т. е. доминирование CO_2 эмиссии (source). Этот вывод также поддерживается особенностями цикла углерода “элювиальных” лесов, в которых прирост биомассы древостоев обеспечивается дополнительным поступлением биофильных элементов при минерализации лесной подстилки ([Пономарева и др., 1972](#)).

В работе Замолодчикова с соавторами ([Замолодчиков и др., 2007](#)) оценивалось среднегодовое изменение запасов углерода в почвах лесов РФ за период 1990 по 2004 гг. В результате наблюдался разнонаправленный (положительный и отрицательный) БУЛП с положительным средним значением 9.6 МтС в год (CO_2 поглощение, sink). Вместе с тем следует подчеркнуть, что полученная авторами величина находится в пределах ошибки подсчетов и не может быть верифицирована с учетом площади лесов и 10%-ным варьированием определения органического вещества в почвах.

2) Все перечисленные исследования не учитывали водную (внутреннюю и поверхностную) миграцию органического вещества, т. е. основываются на неполном перечне потоков углерода и БУЛП. Напомним, что игнорирование водной миграции углерода привело к появлению глобальной проблемы недостающего углеродного пула “Missing Sink”, которая была решена применением метода оценки полного углеродного бюджета ([Nilsson et al., 2000; 2003](#)). В дополнение отметим, что по нашим подсчетам (табл. 2), аккумуляция растворенного органического вещества, в рассматриваемом диапазоне изменений климатических температур, в горизонте Bh весьма значительна и достигает 14 МтС, 48 МтС и 96 МтС в год (табл. 2).

Рассматривая БУЛП, необходимо оценить его возможный вклад в совокупный годовой выброс парниковых газов РФ. По последним данным, последний составляет почти 1.5 ГтС CO_2 -эквивалентов ([Список стран..., 2020](#)). Для перевода баланса углерода в метрических тоннах углерода в единицы CO_2 -эквивалентов используют коэффициент пересчета 3.67. Таким образом, БУЛП

при потеплении климата в базовый и последующие периоды потепления на 1.5 °C и 3.0 °C составит минус 65 МтС-СО₂-экв., минус 220 МтС-СО₂-экв. и минус 440 МтС-СО₂-экв. соответственно. Рассчитанная доля БУЛП от совокупного годового выброса 2020 г. будет равна 4, 13 и 27% соответственно.

Оценивая роль почв в цикле углерода лесных экосистем РФ, необходимо отметить, что интенсификация процесса минерализации почвенного органического вещества (отрицательный БУЛП) приводит, как отмечено выше, к высвобождению дополнительных объемов доступных для древостоев биофильных питательных элементов, т. е. играет роль “удобрительного” эффекта, стимулирующего продукционный процесс фотосинтеза древостоев. Иными словами, отрицательный БУЛП не является показателем усиления СО₂ эмиссии лесными экосистемами РФ. Окончательный вывод можно получить только на основе сопряженного анализа “почва-древостой”. При этом очевидно, что почвы выступают одним из главнейших регуляторов динамики углерода и являются значительным корректирующими фактором оценки поглотительной способности лесных экосистем.

Оценка неопределенности

Ошибка результатов расчетов имеет решающее значение для любых прогнозов и особенно, сделанных на основе математических моделей. В наших расчетах предполагается, что стандартная ошибка оценки БУЛП в органо-профиле суммирует ошибки подсчета балансов углерода морфогенетических горизонтов почв, что описывается уравнением:

$$s(\Sigma) = \sqrt{s_O^2 + s_{A1}^2 + s_{Bh}^2},$$

где s_O, s_{A1}, s_{Bh} – стандартные ошибки подсчета баланса углерода в морфогенетических горизонтах О, А₁ и Bh соответственно.

Расчеты показывают, что общая погрешность оценки БУЛП в базовый период составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности $P = 0.67$. Погрешность расчетов при уровне достоверности $P = 0.95$ будет вдвое больше, соответственно, ± 47 МтС. Величина

ошибки БУЛП для отмеченных уровней достоверности, при повышении температуры на 1.5 °C составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °C составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно.

ВЫВОДЫ

Продемонстрирована возможность исследования влияния потепления климата на БУЛП на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (**B**iosphere **G**reenhousegas **I**nventory), разработанной для подсчета полного углеродного бюджета России.

Изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах носят разнонаправленный характер. Потепление в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. наблюдается уменьшение массы лесной подстилки за счет усиления ее минерализации. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. отмечается накопление лесной подстилки.

В горизонте “О” почв бореальных лесов суммарное уменьшение БУЛП составляет минус 101.4 МтС. В условиях дальнейшего потепления климата на 1.5 °C и 3 °C суммарное уменьшение БУЛП в горизонте “О” составит 345.7 МтС и 691.4 МтС соответственно.

В горизонте “О” почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приводит к развитию суммарного положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно.

Показано, что потепление климата на 0.4 °C в базовый период времени (1990 $\pm$ 5 гг.) инициировало общий отрицательный БУЛП РФ (минус 17.6 МтС). Отрицательный БУЛП также отмечается при дальнейшем потеплении климата на 1.5 °C и 3.0 °C, что составит минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС или минус 65 МтС-СО₂-экв., минус 220 МтС-СО₂-экв. и минус 440 МтС-СО₂-экв. соответственно. Рассчитанная доля общего БУЛП от совокупного годового выброса 2020 г. будет равна 4%, 13% и 27% соответственно.

Наиболее значимые изменения БУЛП отмечаются для верхнего органогенного горизонта “О”. Эти изменения носят отрицательный характер для базового периода времени – минус 39.0 МтС. Отрицательный БУЛП в горизонте “О” отмечается и при увеличении потепления на 1.5 °C и 3.0 °C (минус 133 и минус 265.9 МтС соответственно).

В почвах бореальных и умеренно теплых лесов интенсификация углеродного цикла при потеплении климата сопровождается увеличением содержания углерода в гумусово-аккумулятивном горизонте “А₁”. В базовом периоде времени отмеченное увеличение составило 7.3 МтС. При потеплении на 1.5 °C и 3.0 °C содержание углерода в горизонте А₁ составило почти 24.9 МтС и 49.8 МтС.

Потепление климата также инициирует активизацию иллювиально-гумусового процесса. Суммарно в базовом временном периоде и дальнейшем потеплении климата (1.5 °C и 3.0 °C) БУЛП в горизонте “Bh” увеличился на 14.1 МтС, 48.1 МтС и 96.1 МтС соответственно.

Отрицательный БУЛП не является показателем усиления СО₂ эмиссии лесами РФ как экосистемами. Минерализация лесной подстилки способствует высвобождению биофильных элементов и выполняет роль “удобряющего” фактора, способствующего приросту растительной биомассы. Окончательный вывод об объеме СО₂ эмиссии лесами РФ можно получить только при анализе лесной экосистемы при проведении сопряженного анализа “почва-древостой”.

Погрешность оценки БУЛП в базовый период времени составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности $P = 0.67$. Погрешность расчетов при уровне достоверности $P = 0.95$ будет вдвое больше, соответственно, ± 47 МтС. Величина ошибки БУЛП, для отмеченных уровней достоверности при повышении температуры на 1.5 °C составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °C составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В.* Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
3. *Глазовская М.А.* Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: изд-во “Лиبرком”, 2009. 336 с.
4. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 г. URL: <http://www.ecogosdoklad.ru/>.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
6. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация заболоченных почв Нечерноземной зоны РСФСР. М.: Изд-во Колос, 1981. 168 с.
7. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.
8. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Изд-во Колос, 1977. 224 с.
9. *Комаров А.С., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Безрукова М.Г., Чертов О.Г.* Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 162–176. URL: [http://www.matbio.org/2012/Komarov2012\(7_162\)](http://www.matbio.org/2012/Komarov2012(7_162)).
10. *Кудеяров В.Н.* Вклад почвы в баланс CO₂ атмосферы // Докл. РАН. 2000. Т. 375. № 2. С. 275–277.
11. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 21.07.2014) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2015). URL: <http://leskod.ru>.
12. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / *Эдельгериев Р.С.-Х.* (ред.). Том 2. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 476 с.
13. *Пономарева В.В., Плотникова Н.С.* Закономерности миграции и аккумуляции элементов в подзолистых почвах (лизиметрические измерения) // Биогеохимические процессы в подзолистых почвах. Л.: Наука. Ленингр. Отделение, 1972. С. 6–65.
14. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в Арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.

15. Список стран по эмиссии CO₂. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список стран по эмиссии CO₂](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2).
16. Столбовой В.С. Единый государственный реестр лесных почв России // Известия РАН: серия Географическая. 2018. № 6. С. 102–109.
17. Столбовой В.С., Нильсон С., Швиденко А.З., МакКаллум И. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. Часть 3. Биогеохимические потоки углерода // Экология. 2004. № 3. С. 179–184.
18. Фридланд В.М. Основные принципы и элементы базовой классификации почв, и программа работ по ее созданию. М.: ВАСХНИЛ, 1982. 151 с.
19. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
20. Kramer J.R. Old sediment carbon in global budgets. In: Soil responses to climate change. NATO ASI Series. Series I: Global Environment Change. Rounsevell M.D.A., P.J. Loveland (Eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014. Vol. 23. P. 169–186.
21. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Austria: Laxenburg, 2000. 180 p.
22. Nilsson S., Jonas M., Stolbovoi V., Shvidenko A., Obersteiner M., McCallum I. The Missing “Missing Sink” // Forestry Chronicle. 2003. Vol. 79. P. 1071–1074.
23. Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley & Sons, 1994. 281 p.
24. Stolbovoi V. Soil Carbon in the Forests of Russia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. Vol. 11. P. 203–222.
25. Stolbovoi V. Carbon Pools in Tundra Soils of Russia: Improving Data Reliability. In: Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems. Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds). Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. P. 39–58.
26. Stolbovoi V., McCallum I. Land resources of Russia. CD-ROM. IIASA. Moscow, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, 2002. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.
27. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // Climatic Change. 2002. Vol. 55. Iss. 1–2. P. 131–156.
28. Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia. In: Soil Carbon. Progress in Soil Science. A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.). 2014. P. 381–391. DOI [10.1007/978-3-319-04084-4_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38).
29. The Fifth National Communication of Russian Federation: 2010. URL: http://unfccc.int/resource/docs/natc/rus_nc5_resubmit.pdf.

30. *Thurman E.M.* Humic substances in groundwater. In: Humic substances in Soil, Sediment and Water: Geochemistry, Izolation and Characterization. *Alken G.R., Mcknight D.M., Wershaw R.L., Maccarthy P.* (Eds). New York: John Wiley & Sons, 1985. P. 87–104.
31. UN World Meteorological Organization. URL:
<https://public.wmo.int/en/our-mandate>.

REFERENCES

1. Bazilevich N.I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 293 p.
2. Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V., *Dinamika sodержaniya ugleroda organicheskogo veshhestva v srednetaezhnykh el'nikakh na avtomorfnykh pochvah* (Dynamics of carbon content of organic matter in middle taiga spruce forests on automorphic soils), St. Petersburg: Nauka, 2014, 270 p.
3. Glazovskaya M.A., *Pedolitogenez i kontinental'nye tsikly ugleroda* (Pedolithogenesis and continental carbon cycles), Moscow: izd-vo "Librkom", 336 p.
4. *Gosudarstvennyy doklad o sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2013 godu* (State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2013), URL: <http://www.ecogosdoklad.ru/>.
5. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
6. Zaidel'man F.R., *Melioratsiya zabolochennykh pochv Nechernozemnoi zony RSFSR* (Reclamation of waterlogged soils of the Nonchernozem zone of the RSFSR), Moscow: Izd-vo Kolos, 1981, 168 p.
7. Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Gitarskii M.L., Byudzhet ugleroda upravlyaemykh lesov Rossiiskoi Federatsii (Carbon budget of managed forests in the Russian Federation), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 23–34.
8. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Izd-vo Kolos, 1977, 224 p.
9. Komarov A.S., Khoras'kina Yu.S., Bykhovets S.S., Bezrukova M.G., Chertov O.G., *Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva i elementov pochvennogo pitaniya v mineral'noi pochve i lesnoi podstilke* (Modeling the dynamics of organic matter and soil nutrition elements in mineral soil and forest litter), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*,

2012, Vol. 7, No. 1, pp. 162–176, URL:

[http://www.matbio.org/2012/Komarov2012\(7_162\).](http://www.matbio.org/2012/Komarov2012(7_162).)

10. Kudayarov V.N., Vklad pochvy v balans CO₂ atmosfery (Contribution of soil to atmospheric CO₂ balance), *Dokl. RAN*, Vol. 375, No. 2, pp. 275–277.

11. *Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 04.12.2006 N 200-FZ (red. ot 21.07.2014)(s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2015)* (Forest Code of the Russian Federation of December 4, 2006 N 200-FZ (as amended on July 21, 2014) (as amended and supplemented, effective from March 1, 2015)), URL: <http://leskod.ru>.

12. Edel'geriev R.S.-Kh. (Ed.), *Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)"* (National report "Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)"), Vol. 2, Moscow: OOO "Izdatel'stvo MVA", 2019, 476 p.

13. Ponomareva V.V., Plotnikova N.S., Zakonomernosti migratsii i akkumulyatsii elementov v podzolistykh pochvakh (lizimetricheskie izmereniya) (Patterns of migration and accumulation of elements in podzolic soils (lysimetric measurements), In: *Biogeokhimicheskie protsessy v podzolistykh pochvakh* (Biogeochemical processes in podzolic soils), Leningrad: Nauka. Leningr. Otdelengie, 1972, pp. 6–65.

14. Romankevich E.A., Vetrov A.A., *Tsikl ugleroda v Arkticheskikh moryakh Rossii* (The carbon cycle in the Arctic seas of Russia), Moscow: Nauka, 2001, 302 p.

15. *List of countries by CO₂ emission*, URL:

https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2.

16. Stolbovoi V.S., Edinyi gosudarstvennyi reestr lesnykh pochv Rossii (Unified State Register of Forest Soils of Russia.), *Izvestiya RAN, seriya Geograficheskaya*, 2018, No. 6, pp. 102–109.

17. Stolbovoi V.S., Nil'son S., Shvidenko A.Z., MakKallum I., Opyt agregirovannoi otsenki osnovnykh pokazatelei bioproduktsionnogo protsessa i uglerodnogo byudzheta nazemnykh ekosistem Rossii. Chast' 3. Biogeokhimicheskie potoki ugleroda (Aggregated assessment of the main indicators of the bioproduction process and the carbon budget of terrestrial ecosystems in Russia. Part 3. Biogeochemical carbon fluxes), *Ekologiya*, 2004, No. 3, pp. 179–184.

18. Fridland V.M., *Osnovnye printsipy i elementy bazovoi klassifikatsii pochv, i programma rabot po ee sozdaniyu* (Basic principles and elements of the basic classification of soils, and a work program for its creation), Moscow: VASKhNIL, 1982, 151 p.

19. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Uglerodnyi byudzhets lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
20. Kramer J.R., Old sediment carbon in global budgets, In: *Soil responses to climate change. NATO ASI Series. Series I: Global Environment Change*, Rounsevell M.D.A., P.J. Loveland (Eds), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, Vol. 23, pp. 169–186.
21. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M., *Full carbon account for Russia*, Interim Report IR-00-021, Austria: Laxenburg, 2000, 180 p.
22. Nilsson S., Jonas M., Stolbovoi V., Shvidenko A., Obersteiner M., McCallum I., The Missing “Missing Sink”, *Forestry Chronicle*, 2003, Vol. 79, pp. 1071–1074.
23. Stevenson F.J., *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*, New York: John Wiley & Sons, 1994, 281 p.
24. Stolbovoi V., Soil Carbon in the Forests of Russia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, pp. 203–222.
25. Stolbovoi V., Carbon Pools in Tundra Soils of Russia: Improving Data Reliability, In: *Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems*, Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds), Boca Raton: CRC Press LLC, 2000, pp. 39–58.
26. Stolbovoi V., McCallum I., *Land resources of Russia. CD-ROM. IIASA*. Moscow, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, 2002, URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.
27. Stolbovoi V., Carbon in Russian soils, *Climatic Change*, 2002, Vol. 55, Iss. 1–2, pp. 131–156.
28. Stolbovoy V., Ivanov A., Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia, In: *Soil Carbon. Progress in Soil Science*, A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds), 2014, pp. 381–391, DOI [10.1007/978-3-319-04084-4_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38).
29. The Fifth National Communication of Russian Federation: 2010, URL: http://unfccc.int/resource/docs/natc/rus_nc5_resubmit.pdf.
30. Thurman E.M., Humic substances in groundwater, In: *Humic substances in Soil, Sediment and Water: Geochemistry, Izolation and Characterization*, Alken G.R., Mcknight D.M., Wershaw R.L., Maccarthy P. (Eds), New York: John Wiley & Sons, 1985, pp. 87–104.
31. UN World Meteorological Organization. URL: <https://public.wmo.int/en/our-mandate>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-30-76



Ссылки для цитирования:

Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Виндекер Г.В., Толпышева Т.Ю., Гараева Н.Р. Почвенное и биологическое разнообразие территории бывших торфоразработок Шатурской Мещеры в контексте их антропогенной трансформации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 30-76. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-30-76

Cite this article as:

Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Vindeker G.V., Tolpysheva T.Yu., Garaeva N.R., Soil- and biodiversity of the former peat mines in Shaturskaya Meshchera in the context of their anthropogenic transformation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 30-76, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-30-76

Благодарность:

Работа выполнена 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.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Савину И.Ю. за предоставленные картографические материалы и консультации, старшему научному сотруднику Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина Кожину М.Н. за помощь в определении мхов, научному сотруднику Института биологии Карельского научного центра РАН Н.В. Стойкиной за помощь в определении ботанического состава торфа.

Acknowledgments:

The studies were carried out 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 Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute” No. 0439-2022-0011.

The authors express their sincere gratitude to Academician I.Yu. Savin – for the provided cartographic materials and consultations; to M.N. Kozhin, Senior Researcher of the N.A. Aurorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, – for the help in identifying mosses; to N.V. Stoykina, Researcher of the Biology Institute of Karelian Research Centre of RAS, – for the help in identifying the botanical composition of peat.

Почвенное и биологическое разнообразие территории бывших торфоразработок Шатурской Мещеры в контексте их антропогенной трансформации

© 2022 г. Е. А. Шишконокова^{1*}, Н. А. Аветов², Г. В. Виндекер¹,
Т. Ю. Толпышева², Н. Р. Гараева²

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

*<https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>, e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru.

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

*Поступила в редакцию 10.06.2022, после доработки 28.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022*

Резюме: Проблема почвенного и биологического разнообразия болотных экосистем в условиях долговременного многообразного антропогенного воздействия изучалась в одном из наиболее интенсивно техногенно трансформированных районов Шатурской Мещеры, прилегающем с севера к Шатурской ГРЭС вдоль трассы Керва – Долгуша – Северная Грива. Шатурские болота на протяжении более ста лет находились под влиянием осушения, торфодобычи, пожаров, попыток создания сельскохозяйственных угодий, вторичного обводнения и загрязнения, источниками которого являются ГРЭС, транспорт, стоки из поселков. В настоящее время био- и педоразнообразие вторичных экосистем существенно повысилось по сравнению с ненарушенными болотами. На месте болот в ряде случаев возникли вторичные луговые, травяно-кустарниковые сообщества, мелколиственные леса, сухие редины. Сохранившиеся болота испытывают устойчивую эвтрофикацию, приводящую к формированию мезотрофных и эвтрофных фитоценозов и, соответственно, торфяных мезотрофных и олиготрофных вторично эвтрофных почв. Несколько повышает долю эвтрофных болот и заболачивание мелководных озер, которые на начальном этапе торфодобычи использовались для складирования древесных отходов. Отмеченное в литературе явление вторичной олиготрофизации нарушенных болот Мещеры в исследованном районе не наблюдается из-за значительной антропогенной нагрузки. Для сохранения локальной флоры олиготрофных болот большое значение имеют краевые участки обводненных карьеров и перемычки с невыработанной торфяной

залежью. Увеличению педоразнообразия способствовало сельскохозяйственное освоение осушенных земель под выращивание многолетних трав, в результате которого сформировались торфоземы и агроторфяно-глеевые почвы.

Ключевые слова: торфяные почвы, торфоземы, растительность болот, эвтрофикация болот, техногенная трансформация болот.

Soil- and biodiversity of the former peat mines in Shaturskaya Meshchera in the context of their anthropogenic transformation

© 2022 E. A. Shishkonakova^{1*}, N. A. Avetov², G. V. Vindeker¹,
T. Yu. Tolpysheva², N. R. Garaeva²

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4396-2712>, e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru.

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.*

Received 10.06.2022, Revised 28.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The problem of pedo- and biodiversity of mire ecosystems under the long-term multiple anthropogenic impact was studied in one of the most intensively technogenically transformed areas of Shaturskaya Meshchera, adjacent to power station Shaturskaya in the north and stretching along the route Kerva – Dolgusha – Severnaya Griva. For more than a hundred years, mires in the Shatura area have been under the influence of drainage, peat extraction, fires, attempts to create agricultural land, secondary watering and pollution, resulting from the power station, transport, and settlements wastewaters. Currently, the bio- and soil diversity of secondary ecosystems has increased significantly compared to undisturbed mires. Instead of bog, in some cases there appeared secondary meadow, grass-shrub communities, small-leaved forests, and dry sparse areas. The remaining bogs experience stable eutrophication, which leads to the formation of mesotrophic and eutrophic phytocenoses and, accordingly, peat mesotrophic and oligotrophic secondary eutrophic soils. In addition, the proportion of eutrophic mires is slightly increased by the peat formation in shallow lakes, which at the initial stage of peat extraction were used for storing wood waste. The phenomenon of secondary oligotrophization of the disturbed bogs of Meshchera, noted in the literature, is not observed in the area under consideration due to a significant

anthropogenic load. To preserve the local flora of oligotrophic bogs, marginal areas of flooded quarries and cofferdams with undeveloped peat deposits are of great importance. The increase in pedodiversity was facilitated by the agricultural development of drained peatlands for the cultivation of perennial grasses, which resulted in the formation of torfozems and agrotorfyano-gleyzems.

Keywords: peat soils, torfozems, vegetation of mires, eutrofication of bogs, technogenic transformation of mires.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из тенденций развития современного почвоведения является повышение внимания к проблеме педоразнообразия ([Алябина, 2018](#); [Красильников и др., 2018](#); [Gerasimova et al., 2020](#); [Аветов и др., 2022](#)), причем в отношении заболоченных регионов бореального пояса оно происходит одновременно с расширением спектра публикаций, обосновывающих важность познания биоразнообразия болот в связи с увеличивающимся техногенным прессингом на эти весьма уязвимые экосистемы ([Normander et al., 2012](#); [Minaeva et al., 2017](#); [Renou-Wilson et al., 2019](#); [Wolejko et al., 2019](#); [Baisheva et al., 2020](#); [Read, Bealey, 2021](#); [Spitale, 2021](#)).

Вместе с тем исследований, посвященных сопряженному изменению почв и растительности нарушенных болот, до сих пор не проводилось. Среди препятствующих этому причин следует отметить относительно слабую разработанность классификации торфяных почв ([Аветов, Шишконокова, 2019](#)), включая и ее часть, касающуюся антропогенно измененных почвенных разностей ([Wittenebel et al., 2021](#)). Определенное затруднение, например, вызывает отсутствие в Классификации и диагностике почв России (2004) таксона мезотрофных почв, несмотря на его использование в фундаментальных почвенно-картографических изданиях – Почвенной карте РСФСР (1988) и Национальном Атласе почв Российской Федерации (2011). В то же время недавно предложенные уточнения и дополнения к систематике и диагностике естественных торфяных почв позволили выполнить корректировку Почвенной карты России М 1 : 2.5 млн ([Шишконокова и др., 2020](#)), установить высокое педоразнообразие заболоченных равнин севера Западной Сибири ([Аветов и др., 2022](#)), оптимизировать корреля-

цию почвенных и биоценотических единиц классификации болот ([Аветов и др., 2021](#)). Обращаясь к рассмотрению территорий болот, подвергающихся долговременным разнообразным природно-антропогенным изменениям, следует подчеркнуть, что ряд возникающих в ходе сукцессий новых компонентов почвенно-растительного покрова может иметь самостоятельную природоохранную ценность, которую необходимо учитывать при разработке ремедиационных мероприятий. Такой подход реализуется, в частности, в рамках системы адаптивного менеджмента болот Эстонии ([Remm et al., 2019](#)).

Целью настоящей статьи является выявление многообразия компонентов почвенно-растительного покрова и направленности сукцессионных процессов на восстанавливающихся после нарушений болотных землях Шатурской Мещеры – региона, в течение длительного времени подвергавшегося разнородным антропогенным воздействиям.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Шатурская болотная система (рис. 1) – важный почвенно-растительный и гидрологический объект Восточного Подмосквья, во многом обуславливающий экологическую ситуацию в столичном регионе. Наличие крупных озер и обилие крупнозалежных торфяников предопределили судьбу этой части Мещеры – здесь на Петровско-Кобелевском торфопредприятии, расположенном в окрестностях поселка Керва, с 20-х гг. прошлого века велась добыча торфа, являвшегося топливным сырьем для Шатурской ГРЭС, а впоследствии применявшегося также в качестве мелиоранта в практике земледелия прилегающих районов.

Шатурская болотная система целиком расположена в Шатурской ложбине стока ледниковых вод, залегающей, в свою очередь, в пределах зандровых равнин Мещерской низменности с мощными песчаными и супесчаными водно-ледниковыми отложениями. Шатурская ложбина по своим абсолютным гипсометрическим уровням примерно соответствует первым надпойменным террасам региона (110–125 м) ([Савин, 1996](#)). Такое геолого-геоморфологическое строение предопределило высокую степень заболоченности.

Первые масштабные обследования торфяников Шатурской болотной системы были проведены в 1919–1920 гг. ([Григорьев, Герасимов, 1921](#); [Герасимов, 1922](#)). Согласно их данным, расположенное к востоку и северо-востоку от озера Святое болото Петровско-Кобелевское (в пределах которого и проводились наши исследования) было охарактеризовано как олиготрофное, сложенное из сфагново-пушицевого или сфагнового торфов. В северном направлении олиготрофный торфяник резко переходил в неширокую полосу мезотрофного осоково-сфагнового с березой болота, граничившую, в свою очередь, с безлесной Кобелевской пустошью, представленной низинным болотом. Сложный, неоднородный характер исследуемой территории, включающий низинные и верховые типы торфяных почв, подтверждают и фондовые материалы.

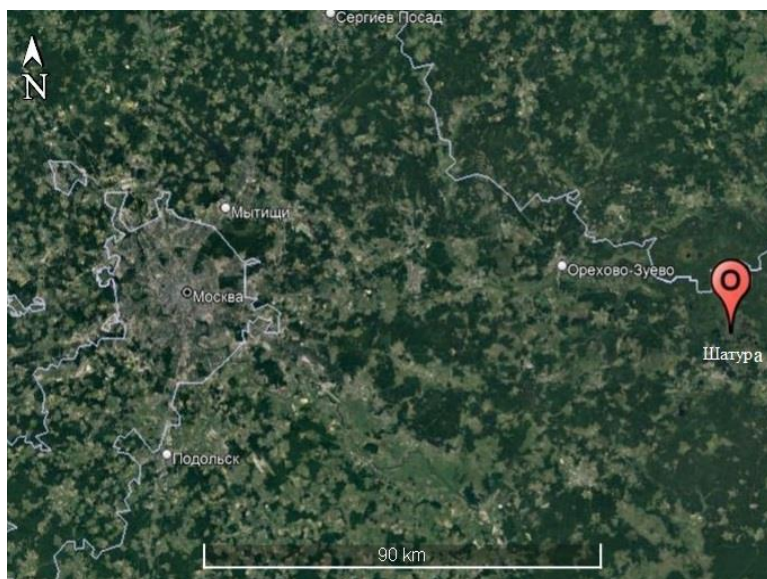


Рис. 1. Район исследований.

Fig. 1. Study area.

Разработка торфа на территории Шатурской болотной системы шла поэтапно, постепенно охватывая все более отстоящие

от электростанции участки месторождений, причем синхронно происходило совершенствование технологии добычи. В первые годы освоения на наиболее близких к электростанции и поселку Керва участках болот добыча торфа производилась элеваторным и экскаваторным способами. Судя по космическим снимкам (Google Earth 1985–2018 гг.), восточнее Кервы в районе поселка Загорье находились участки с элеваторными торфоразработками, на что указывают характерные протяженные узкие канавки в сочетании с бровками, в настоящее время заросшие древесно-кустарниковой растительностью ([Элеваторные торфоразработки..., 2012](#)). На север от Кервы до поселка Долгуша разработка торфа осуществлялась преимущественно экскаваторным методом (рис. 2).

Здесь отчетливо видны ряды гидрокарьеров, так называемых “копаней”. Территория между поселками Долгуша и Северная Грива осваивалась позднее фрезерным способом добычи, ставшим к 80-м годам XX в. основным ([Лукьянова и др., 2011](#)). Эти поля представляют собой примыкающие друг к другу ровные участки, разделенные мелиоративными канавами, заполненными водой. Отдельные фрезерные поля были окультурены и использовались как сельскохозяйственные угодья для возделывания многолетних трав, что подтверждают и картографические материалы землеустроителей, созданные в начале 1980-х годов. Однако постепенно они были заброшены: основные массивы – к концу 1990-х годов, а последние участки – к 2010 г. Значительный ущерб территории нанесли пожары, в частности, произошедшие в 2010 г. ([Сирин и др., 2019](#)). В настоящее время фрезерные поля между поселками Долгуша и Северная Грива частично затоплены, особенно велико зеркало воды на севере и северо-западе массива, в то время как южные участки, примыкающие к Долгуше, в основном не были затронуты обводнением.

Дорога между Кервой и Северной Гривой в течение десятилетий являлась основной магистралью для функционирования всей системы местных торфоразработок, поэтому на участках болот, непосредственно прилегающих к ней, отразились в той или иной степени все этапы освоения, в отличие от более удаленных частей болотных массивов.

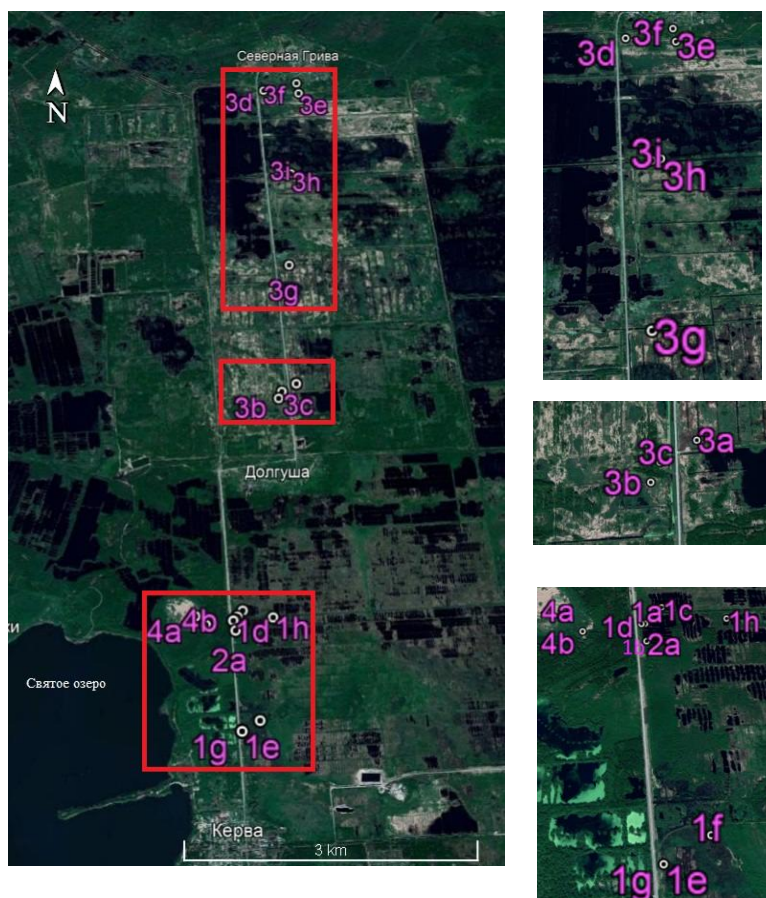


Рис. 2. Размещение ключевых участков на территории исследования.
Fig. 2. Location of key sites in the study area.

Отдельные негативные последствия антропогенного вмешательства в природу болот окрестностей Шатуры были отмечены уже в последние десятилетия XIX и в начале XX вв., когда вблизи ряда селений появились мелиоративные каналы, способствовавшие осушению и созданию небольших участков покосных лугов; примерно в то же время начались разработки первых торфяников

(Исаченко, Юрковская, 1973). На протяжении XX в. масштаб воздействия многократно возрастал, причем на большей части территории нарушения носили комплексный характер. Существующие в настоящее время антропогенные ландшафты отражают длительную историю техногенной трансформации болот, которая в последние десятилетия усложнилась попытками вовлечения нарушенных земель в сельскохозяйственный оборот на фоне происходящих восстановительных сукцессий, сопровождаемых к тому же значительным пирогенным воздействием. Исследования таких сукцессий на болотах Мещерского края получили особый размах в 1960-е годы. Значительный вклад в познание происходящих процессов восстановления болот внесла экспедиция биологического факультета МГУ под руководством С.Н. Тюремнова ([Тюремнов и др., 1968](#)). Так, первые этапы зарастания фрезерных полей описаны в работах Л.И. Абрамовой (1969). В последующие годы эти исследования были продолжены ([Очагов и др., 2000](#); [Борзенко, 2005](#); [Антипин и др., 2018 и др.](#)). Отдельно стоит упомянуть многолетние исследования комплексного характера, проводившиеся в постмелиоративных ландшафтах Мещеры, охватившие этапы интенсивного сельскохозяйственного использования и нерегулируемого заброшенного функционирования ([Дьяконов, 1979](#); [Сперанская, 1990](#); [Харитонов, 2015](#)).

Наложение сложной истории природопользования на и без того неоднородный ландшафт обусловило многообразие возникших вторичных биоценозов, и, соответственно, почвенных единиц.

В летние периоды 2020–21 гг. нами были обследовано 25 участков нарушенных торфоразработками болот на севере от г. Шатуры вдоль дороги Керва – Долгуша – Северная Грива (Шатурский городской округ Московской области) (рис. 1). На участках производились геоботанические описания по стандартным методикам (всего было составлено 40 описаний растительности), осуществлялась диагностика почв, отбирались пробы почв для исследования зольности торфа, кислотности (рН), содержания подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) (табл. 1), а также ботанический анализ торфа (табл. 2, 3, 4, 5). Для обследованных местообитаний была проведена экологическая оценка по шкалам

Л.Г. Раменского (табл. 6). Характер местообитания до этапа промышленного освоения территории определялся по колонкам ботанического анализа, литературным источникам, фондовым картографическим материалам, экологическим реликтам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обследованные нами копани урочища Петровско-Кобелевского торфопредприятия (ключевой участок 1), находящиеся с противоположной стороны дороги от озера Святого, относятся к первым этапам торфодобычи на территории, которая в дальнейшем не вовлекалась в сельскохозяйственный оборот. Копани представляют собой ряды небольших прямоугольных карьеров, заполненных водой и отделенных друг от друга частично сохранившимися косами-перемычками. На сложный рисунок, создаваемый копаниями, накладываются остатки мелиоративной сети.

В современных условиях растительность и почвы кос-перемычек (точки 1a, 1b, 1c, 1f) в разной степени изменены, подвергшись значительной эвтрофикации. Эвтрофикация болот, очевидно, является следствием воздействия комплекса факторов, среди которых следует упомянуть: перенос аэрозолей и пыли из района ГРЭС, в особенности из зоны отвалов золы, промышленные и бытовые стоки, распространяющиеся по системе естественных и техногенных водоемов, пожары, транспорт. Почвы, образовавшиеся здесь в настоящее время, можно охарактеризовать как торфяные мезотрофные тростниково-сфагновые (рис. 3). Однако и ранее характер этой части торфяного массива соответствовал мезотрофному типу, что подтверждают колонки ботанического состава торфа, полученные на сохранившейся окраине торфяной выработки (точка 1d, табл. 2).

Переходный торф был обнаружен на глубине 200–220 см. Тем не менее, некоторая эвтрофикация затронула весь массив, на что указывает доминирование в современном сообществе эвтрофного вида – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., а также значительное участие в травяно-кустарничковом ярусе мезоэвтрофных и эвтрофных видов, в т. ч. *Bidens tripartita* L., *Calla palustris* L., *Carex acuta* L., *C. canescens* L., *C. lasiocarpa* Ehrh.,

Таблица 1. Зольность торфа, кислотность (pH), содержание подвижных форм фосфора и калия
Table 1. Ash, mobile phosphorus and potassium contents and acidity (pH) of peat

Точка изучения, почва	Глубина, см	pH		Зольность / минеральная часть, %	Содержание подвижного Р, мг/100 г	Содержание подвижного К, мг/100 г
		pH водн.	pH KCl			
Точка 2а. Торфяная олиготрофная вторично-эвтрофная	0–20	6.3	6.05	5.23	0.106	0.091
	20–40	6.61	6.29	1.79	0.064	0.060
	40–60	6.51	6.16	2.14	0.037	0.091
Точка 3d. Торфозем агроминеральный	0–15	5.21	4.95	93.25	0.683	0.121
	15–20	5.44	5.2	90.22	0.283	0.302
Точка 3g. Торфозем минерально-торфяной	0–15	5.57	5.44	47.17	0.326	0.121
	15–20	4.63	3.73	64.41	0.190	0.091
	20–40	4.61	3.67	94.07	0.150	0.121
Точка 3h. Торфозем агроминеральный	0–20	6.19	5.93	88.02	0.334	0.060
	20–40	6.4	5.77	90.86	0.471	0.060

Таблица 2. Ботанический состав торфа (точка 1d)

Table 2. Botanical composition of peat (point 1d)

Глубина, см	0–20	20–40	40–50	200–220
Степ. разл., %	15	15–20	20–25	35–40
Названия видов				
<i>Picea</i>	+	+		+
<i>Betula</i>	+	+	+	+
Обрывки листьев	5	10	10	
<i>Calamagrostis</i>		15	15	
<i>Phragmites australis</i>	+	+	35	35 15 (свежие)
<i>Eriophorum</i> sp.	+	15		
<i>Carex rostrata</i>	5	5	10	+
<i>Carex lasiocarpa</i>	+	10		
<i>Carex chordorrhiza</i>		+		
<i>Thelypteris palustris</i> (корни и споры)	+	+		
<i>Menyanthes trifoliata</i>		+		
<i>Sphagnum fallax</i>				50
<i>Sphagnum obtusum</i>	30	15	+	+
<i>Sphagnum squarrosum</i>	60	25	20	5
<i>Sphagnum</i> sec. <i>Palustre</i>				5
Стебли сфагнов				25
<i>Calliergon cordifolium</i>	+	5		
<i>Calliergon</i> sp.			10	
<i>Drepanocladus aduncus</i>	+	+		
<i>Warnstorfia</i> sp.			+	

Примечание. Окраина выработки на месте мезотрофной части Кобелевского болота. Разнотравно-осоково-телиптерисово-белокрыльничково-сфагновое сообщество с ивой пепельной. Торфяная мезотрофная почва.

Таблица 3. Ботанический состав торфа (точка 1g)

Table 3. Botanical composition of peat (point 1g)

Глубина, см	0–20	20–40	40–50
Степень разложения, %	45–50	45	35
Включения	песок		
<i>Pinus</i>	10	10	+
<i>Salix</i>	+	+	
<i>Betula</i>	35	20	+
<i>Calamagrostis</i>	25	15	
<i>Phragmites australis</i>	20		
<i>Eriophorum</i> sp.		5	10
<i>Carex rostrata</i>		+	+
<i>Scheuchzeria palustris</i>		10	60
<i>Sphagnum</i> sec. <i>Cuspidata</i>	+		
<i>Sphagnum centrale</i>		10	+
<i>Sphagnum angustifolium</i>		10	+
<i>Sphagnum maius</i>			5
<i>Sphagnum cuspidatum</i>			5
Стебли сфагнов	10	20	20

Примечание. Окраина выработки на месте олиготрофной части Кобелевского болота. Разнотравно-тростниково-вейниковое сообщество. Торфяная олиготрофная вторично-эвтрофная почва.

Таблица 4. Ботанический состав торфа (точка 2а)

Table 3. Botanical composition of peat (point 2a)

Глубина, см	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120	120–140	140–160	160–180	180–200	200–220	220–240	240–260	260–280	280–300
Степень разложения торфа, %	35	25	25	25	25	30	30	30	35	35	35	35	35	40	35
Названия видов															
<i>Betula</i>	30	5				5	+	+				+			+
<i>Pinus</i>	15	+		+	10	5	5	10	15	15	10	10	10	15	10
<i>Poaceae</i> (<i>Calamagrostis</i>)	15	5								+		+		+	+
<i>Eriophorum</i> (<i>vaginatum</i>)	10	60	20	85	40	50	55	55	45	35	50	40	45	50	45
<i>Scheuchzeria palustris</i>		15	75	5	30	30	20	20	20	15	20	20	20	15	15
<i>Menyanthes trifoliata</i>	5														

Глубина, см	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120	120–140	140–160	160–180	180–200	200–220	220–240	240–260	260–280	280–300
Степень разложения торфа, %	35	25	25	25	25	30	30	30	35	35	35	35	35	40	35
Названия видов															
<i>Sph. angustifolium</i>							+	+	+	+	+		+	+	+
<i>Sph. balticum</i>		10			+					+	+		+		
<i>Sph. majus</i>		5		+	+		+					+			
<i>Sphagnum russowii</i>														+	+
<i>Sph. squarrosum</i>	25						+		5	5	+			+	5
<i>Sphagnum</i> sec. <i>Sphagnum</i>	+	+	+	10	10	10	15	10	10	15	10	15	15	10	10
Стебли сфагнов			5	+	10	+	5	5	5	15	10	15	10	10	15

Примечание. Окраина выработки на месте олиготрофной части Кобелевского болота, эвтрофицированное сосново-кустарничково-сфагновое болото (березняк разнотравно-осоково-зеленомошно-сфагновый). Торфяная олиготрофная вторично-эвтрофная почва.

Таблица 5. Ботанический состав торфа (точка 4а)

Table 3. Botanical composition of peat (point 4a)

Глубина, см	0–20	20–40	40–50
Степень разложения, %	40	40	>50
Включения	песок, диатомовые водоросли	–	–
<i>Pinus</i>		5	5
<i>Salix</i>	+		+
<i>Betula</i>	+	10	10
Обрывки листьев деревьев	25		
<i>Phragmites australis</i>	65	80	75
<i>Nuphar</i>	+	5	10
<i>Ceratophyllum</i>	+	+	
<i>Sphagnum</i> sec. <i>Cuspidata</i>		+	+
<i>Calliergon cordifolium</i>	5		
<i>Drepanocladus aduncus</i>	5		
<i>Mnium</i> sp.	+		
<i>Warnstorfia</i> sp.	+	+	
Стебли гипнов		+	

Примечание. Вторичное эвтрофное болото, центральная часть озера Черное-Спасское. Ивово-тростниково-разнотравно-зеленомошное сообщество. Торфяная эвтрофная почва.

Таблица 6. Баллы увлажнения и трофности для обследованных участков, рассчитанные по шкалам Л.Г. Раменского

Table 6. Moisture and trophicity scores for the surveyed sites, calculated using L.G. Ramensky's scales

Номер точки	Баллы по Раменскому		Краткая характеристика местообитания на современном этапе	Предположительный характер местообитания до этапа освоения
	Увлажнение	Трофность		
Участки на территории бывших торфоразработок, освоенных экскаваторным методом				
1a	90.2	6.5	Коса-перемычка между карьерами-копанями, мезотрофное кустарничково-очеретниково-белокрыльниково-сфагновое болотное сообщество с березой белой.	мезотрофное болото
1b	88.7	7.1	Коса-перемычка между карьерами-копанями, мезотрофное кустарничково-осоково-тростниково-сфагновое болотное сообщество с подростом березы белой, ольхи черной, ивой пепельной и крушиной ломкой.	-«-
1c	91.9	8.9	Коса-перемычка между карьерами-копанями, мезотрофное кустарничково-осоково-очеретниково-белокрыльниково-сфагновое болотное сообщество с ивой ушастой.	олиготрофное болото
1d	90.9	10.2	Окраина выработки, мезозвтрофное разнотравно-осоково-телиптерисово-белокрыльниково-сфагновое болотное сообщество с ивой пепельной.	мезотрофное болото

1e	96.8	10.1	Обводненный участок копаней с небольшой остаточной мощностью торфа, мезозвтрофное осоково-тростниково-белокрыльниковое с ольхой черной болотное сообщество.	олиготрофное болото
1f	88.1	11.1	Частично подтопленный участок копаней с небольшой остаточной мощностью торфа, мезозвтрофное разнотравно-осоково-тростниковое с ольхой черной, березой белой, ивой пепельной болотное сообщество.	-«-
1g	90.0	10.5	Окраина выработки, мезозвтрофные болотные сообщества – разнотравно-тростниково-вейниковое на микроповышениях, осоково-белокрыльниковое в понижениях.	-«-
1h	94.3	9.5	Берег копани, мезозвтрофное сабельниково-белокрыльниково-осоково-сфагновое с ивой пепельной болотное сообщество.	-«-
2a	79.2	7.0	Сохранившийся между торфяными выработками участок Петровско-Кобелевского болота, мезотрофный березняк кустарничково-осоково-белокрыльниково-сфагново-зеленомошный.	-«-

Участки на территории бывших торфоразработок, освоенных фрезерным методом				
3a	82.5	10.7	Дренированная карта фрезерного поля, ивняк тростниково-вейниковый.	мезотрофное болото в сочетании с участками олиготрофного болота
3b	84.7	11.07	Дренированная карта фрезерного поля, березняк с ивой вейниковый.	-«-
3c	72.1	8.5	Дренированная карта фрезерного поля, ивняк вейниково-тростниковый.	-«-
3d	62.9	9.6	Луг с маломощной почвой, овсяницево-вейниково-разнотравное сообщество.	-«-
3e	72.2	10.7	Насыпи отфрезерованного и смешанного с песком торфа, кипрейно-вейниково-тростниково-крапивное сообщество.	-«-
3f	75.1	10.6	Бывшие огороды, кипрейно-овсяницево-щучковое сообщество.	-«-
3g	78.3	11.8	Поле, заброшенное в 2000-х гг., центральная часть, злаково-разнотравный луг.	-«-
	81.7	12.5	Поле, заброшенное в 2000-х гг., окраина поля, примыкающая к мелиоративной канаве, хвощево-злаково-разнотравный луг.	-«-
3h	68.7	11.8	Поле, заброшенное после 2010-х гг., центральная часть, разнотравно-крапивно-злаковый луг.	-«-
3i	67.0	11.1	Поле, заброшенное после 2010-х гг., придорожная часть, крапивно-разнотравно-злаковый луг.	-«-

<i>Озеро Черное-Спасское</i>				
4a	91.2	10.9	Срединная часть заросшего озера, эвтрофное тростниково-осоково-зеленомошное с ивой пепельной и ольхой черной болотное сообщество.	заиленное озеро
4b	85.9	10.4	Окраинная часть заросшего озера, эвтрофное крапивно-тростниковое болотное сообщество с ивой ломкой, ольхой черной, ивой пепельной.	-«-

C. pseudocyperus L., *C. rostrata* Stokes, *Comarum palustre* L., *Eriophorum polystachion* Honck., *Lycopus europaeus* L., *Lysimachia vulgaris* L., *Lythrum salicaria* L., *Thyselium palustre* (L.) Raf., на мелководье – *Agrostis stolonifera* L., *Naumburgia thyrsoiflora* (L.) Rchb., *Typha latifolia* L.

В то же время на обследованных косах-перемычках встречаются растения, относящиеся к олиго-мезотрофной группе: *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Drosera rotundifolia* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Vaccinium uliginosum* L., – которые можно отнести к экологическим реликтам (по [Викторову, Ремезовой, 1988](#)) мезотрофной фазы развития болота в доиндустриальный период. Их состав и обилие пространственно варьируют. Так, на некоторых перемычках массово произрастает *Rhynchospora alba* (L.) Vahl. Если болотные кустарнички сохраняют средние, обычные для них размеры, то для трав свойственны укрупненные формы, часто граничащие с гигантизмом. Например, для *Drosera rotundifolia* характерны экземпляры, достигающие 20–25 см в высоту (что соответствует верхней границе нормальных значений), а отдельные экземпляры *Rhynchospora alba* достигают 78–83 см (при обычных для вида показателях 10–40 см ([Определитель растений Мещеры, 1986](#)) и до 50 см в Средней Европе ([Lauber et al., 2014](#))). Разрастание *Rhynchospora alba* в условиях антропогенной эвтрофикации подтверждается также наблюдениями ряда авторов ([Лапшина, Блойтен, 1999](#); [Шишконова и др., 2014](#)).

Древесная растительность кос-перемычек в основном представлена немногочисленным подростом *Betula pubescens* Ehrh. и *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Местами формируется негустой кустарниковый ярус, образованный *Frangula alnus* Mill., *Salix cinerea* L., реж – *S. pentandra* L., *S. aurita* L.

Моховой ярус хорошо развит, в нем доминируют олиго-мезотрофные виды – в наиболее отдаленных от берега и топких сегментах кос обильны *Sphagnum cuspidatum* Ehrh. ex Hoffm. и *S. flexuosum* Dozy & Molk., на сохранившихся кочках и в понижениях между ними встречаются *Sphagnum divinum* Flatberg & K. Hassel, *Polytrichum commune* Hedw., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., на их верхушках – *Polytrichum strictum* Brid. Среди

сфагновых мхов местами разрастается мезо-эвтрофный *Straminergon stramineum* (Dicks. ex Brid.) Hedenäs.

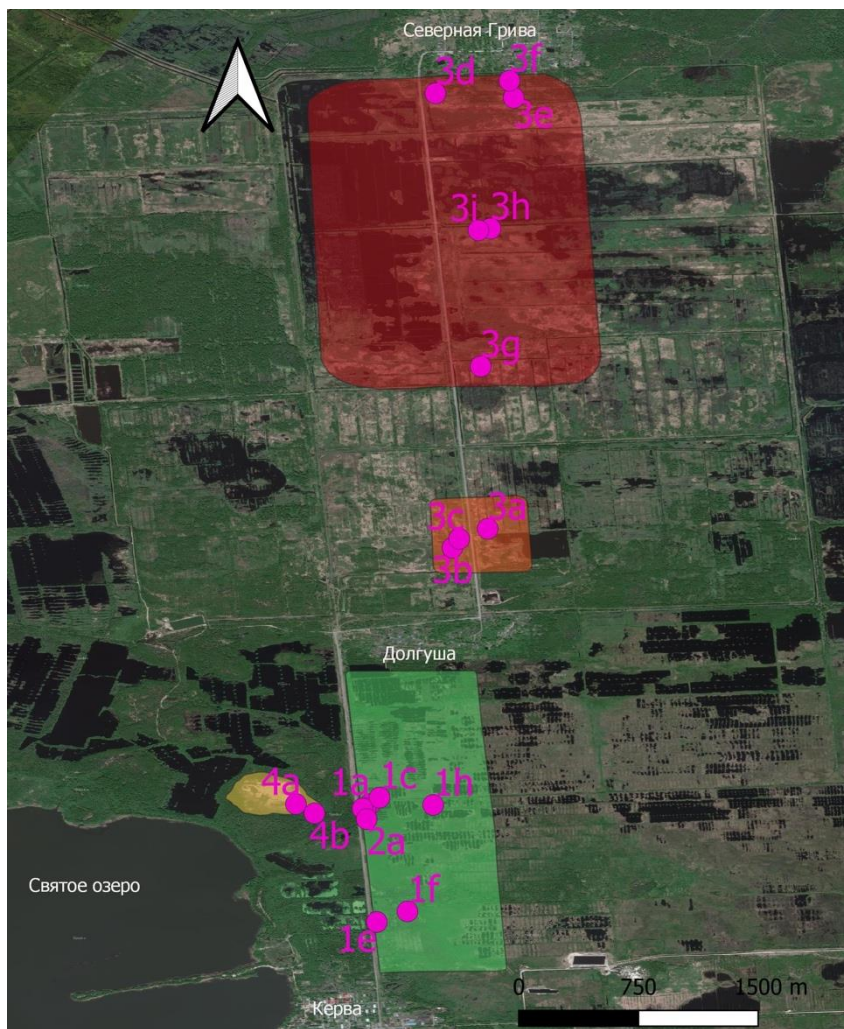


Рис. 3. Картохема почв ключевых участков.

Fig. 3. Map of key site soils.

Примечание.

	- Ключевые площадки
	- Комбинация: торфоземы минерально-торфяные, агроминеральные и агроторфяно-глеевые почвы
	- Торфяные эвтрофные остаточные
	- Комбинация торфяных олиготрофных и мезотрофных вторичных эвтрофицированных и торфяных эвтрофных остаточных почв
	- Торфяные эвтрофные тростниковые почвы

	- Key sites
	- Combination: torfozems mineral-peat, agromineral and agro-peat-gley soils
	- Peat eutrophic residual
	- Combination: Peaty oligotrophic and mesotrophic secondary eutrophic and peaty eutrophic residual soils
	- Peat eutrophic reedbed soils

Образовавшиеся на косах-перемычках сообщества, таким образом, приобрели преимущественно мезотрофный характер (их трофность варьирует от 7 до 9 баллов по шкале Л.Г. Раменского), однако отдельные перемычки сохраняют олигомезотрофный режим (их трофность составляет до 7 баллов).

Тренд устойчивой эвтрофикации отличает обследованные нами выработанные торфяники от ряда участков карьерных выработок на территории Национального парка “Мещера”, охарактеризованных В.К. Антипиным с соавторами ([2018](#)), в которых происходит поступательное замещение мезотрофных осоково-сфагновых сообществ олиготрофными пушицево-сфагновыми. Сходные с данными В.К. Антипина с соавторами выводы были сделаны Л.Е. Борзенков ([2005](#)) для сохраняющих слабое и среднее увлажнение участков фрезерных полей Подмосковной Мещеры. Она обращала внимание на то, что появившиеся эвтрофные и мезотрофные разнотравные болота с течением времени становятся олиготрофными и покрываются древесными породами. По нашим наблюдениям, на всех обследованных участках восстанавливающихся болот с характерной водно-болотной растительностью, примыкаю-

щих к дороге Керва – Долгуша – Северная Грива, происходит эвтрофикация, проявляющаяся в разной степени – в формировании от мезо-эвтрофных до собственно эвтрофных условий, что обусловлено в первую очередь особенностями геохимической ситуации, сложившейся в результате многолетней непрерывной работы Шатурской ГРЭС, близости автодороги, города, СНТ, поселков, мест отдыха горожан, а также воздействия пожаров.

Вдоль береговой линии торфяной выработки (копаней) растут мезотрофные и мезо-эвтрофные виды трав, встречающиеся на перемычках. К ним присоединяются *Achillea cartilaginea* Ledeb. ex Rchb., *Calamagrostis canescens* (Weber) Roth, *Epilobium adenocaulon* Hausskn., *E. palustre* L., *Scutellaria galericulata* L., *Thelypteris palustris* Schott. В понижениях моховой покров образован эвтрофными *Sphagnum squarrosum* Crome и *Calliergon giganteum* (Schimp.) Kindb., здесь же отмечен единственный олиго-мезотрофный элемент этого сообщества – *Sphagnum flexuosum*. На более возвышенных дренированных участках с доминированием *Calamagrostis canescens* найдены латки *Drepanocladus polygamus* (Bruch et al.) Hedenäs и *Polytrichum strictum*.

В отличие от кос-перемычек необводненные участки копаней (имеющие вид островов посреди водоема) с небольшой остаточной мощностью торфа отличает присутствие исключительно мезо-эвтрофных видов (ключ 1g). Здесь развивается подрост *Alnus glutinosa*, *Betula pubescens*, *Populus tremula* L., разрастаются *Salix cinerea*, *S. pentandra*. В травяном ярусе господствует *Phragmites australis*, реже *Calamagrostis canescens*, к ним примешиваются *Bidens frondosa* L., *B. tripartita*, *Carex canescens*, *C. chordorrhiza* Ehrh., *Comarum palustre*, *Galium trifidum* L., *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria*. На обводненных участках заросли образует *Calla palustris*, на мелководях, по окраинам островков к ней примешиваются *Carex pseudocyperus* L., *Cicuta virosa* L., *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult., *Typha latifolia* (точка 1e). Растительность обводненных карьеров представлена гидрофитами *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Sparganium natans* L., *Utricularia vulgaris* L., *Lemna minor* L., реже встречаются немногочисленные экземпляры *Nymphaea candida* J. Presl & C. Presl.

На пространствах копаней сохранились остатки стволов вы-

павших деревьев, произраставших здесь ранее (в основном берез, реже осин), пни со следами горения. На корягах нами собраны эпифитные нитрофильные лишайники: *Athallia pyracea* (Ach.) Arup et al., *Caloplaca cerina* (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr., *Polyozosia hagenii* (Ach.) S.Y. Kondr. et al., *Physcia adscendens* H. Oliver, *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. *Polyozosia hagenii* и *Physcia adscendens* одинаково успешно растут в природе и в антропогенно нарушенных местообитаниях. В то же время виды сем. Teloschistaceae (*A. pyracea*, *C. cerina*) обычно редко встречаются на ненарушенных болотах, а *X. parietina*, из этого же семейства, на таких болотах отсутствует.

Вскрытый нами на невыработанной окраине описанного выше болотного массива профиль торфяной почвы свидетельствует, судя по ботаническому составу (ключ 1g, табл. 3), о вторичной эвтрофикации шейхцерицево-сфагнувой олиготрофной почвы, проявившейся в появлении в верхних слоях торфа (0–40 см) остатков березы, вейника, тростника на фоне исчезновения олиготрофных элементов. Поэтому почва была диагностирована как торфяная олиготрофная вторично эвтрофная древесно-травяная (рис. 3). Современные экологические условия местообитания соответствуют сыролуговому увлажнению и мезо-эвтрофной градации активного богатства почв (табл. 6).

К обводненному массиву копаней Петровско-Кобелевского торфопредприятия, расположенному у дороги Керва – Долгуша, примыкает фрагмент сильно измененного, поврежденного в прошлые годы пожарами (на некоторых деревьях заметны следы горения) вторично эвтрофицированного олиготрофного сосново-кустарничково-сфагнувого болота (ряма) с перегнойно-торфяными олиготрофными вторично эвтрофицированными мощными древесно-пушицевыми почвами (ключевой участок 2а). В настоящее время это довольно сухая дренированная территория, прошлый облик которой можно воссоздать по составу торфа в залежи и отдельным экологическим реликтам – видам, характерным для ранее существовавшего здесь олиготрофного сообщества и сохранившимся на современной стадии.

Ботанический состав торфа почти по всей трехметровой залежи имеет верховой (олиготрофный) характер. Преобладают пушицево-сфагновый, в меньшей мере – пушицево-шейхцерицевый

виды торфа (табл. 4). Однако верхняя (0–20 см) часть залежи сложена эвтрофным торфом, позволяющим отнести данные почвы к вторично-эвтрофному подтипу олиготрофных почв, не выделяемому в Классификации почв России (2004). В этом горизонте свыше 70% остатков представлены мезоэвтрофными видами, включая березу, вейник, вахту трехлистную и сфагновый мох (*Sphagnum squarrosum*). Очевидно, что произошедшая эвтрофикация связана с техногенным влиянием периода добычи торфа. Смена процесса торфяного почвообразования отчетливо проявляется и в изменении зольности: составляя в нижнем олиготрофном горизонте почвы (20–60 см) около 2%, этот показатель резко возрастает в поверхностном эвтрофном горизонте, достигая значений более 5% (табл. 1). В то же время эвтрофикация сказалась на понижении кислотности по всему почвенному профилю (0–60 см), в результате чего значения pH торфа приблизились к нейтральным (6.3–6.6).

На большей части бывшего рямья в настоящее время сформировались мезотрофные условия, в то время как увлажнение соответствует сухим вариантам верховых болот (табл. 6). На месте рямья располагается вторичный березняк с примесью осины. Древесный ярус образован *Betula pubescens* с небольшой долей *Populus tremula*. Деревья на участке высотой до 12–13 м, диаметром до 15 см, сомкнутость крон массива 0.6–0.7, встречается много выпавшего жердняка. Рассеяно отмечается подрост *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris* L., *Populus tremula*, единично – *Picea abies* (L.) Н. Karst. Подлесок неравномерный – от очень редкого до средней густоты, доминирует *Frangula alnus*. Общее проективное покрытие (ОПП) травяно-кустарничкового яруса около 10%, растения в нем произрастают группами, чередующимися с пятнами без покрытия. Мохово-лишайниковый ярус занимает до 20% площади. Микрорельеф, по всей видимости, частично унаследован от первичного сообщества. Сохранились кочки, к которым приурочены деревья и немногочисленные экземпляры экологических реликтов – олиготрофных кустарничков, трав, мхов (*Andromeda polifolia*, *Chamaedaphne calyculata*, *Drosera rotundifolia*, *Eriophorum vaginatum* L., *Polytrichum strictum*, *Sphagnum divinum*). Во влажных понижениях разрастаются мезоэвтрофные сосудистые виды – *Calla palustris*, *Carex nigra* (L.) Reichard, *C. rostrata*, и мхи, для которых

характерна довольно широкая экологическая амплитуда – *Aulacomnium palustre*, *Sphagnum fimbriatum* Wilson. На относительно выровненных местообитаниях рассеянно встречаются *Melampyrum pratense* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., небольшие латки образуют *Sphagnum girgensohnii* Russow, *S. compactum* Lam. & DC., *Polytrichum commune*. На кочках и в нижних частях стволов моховой покров разнообразен, его составляют *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Sw., *D. scoparium* Hedw., *D. fuscescens* Turner, *Plagiothecium denticulatum* (Hedw.) Bruch et al., *P. latebricola* Bruch et al., *Pohlia cruda* (Hedw.) Lindb., *P. nutans* (Hedw.) Lindb., *Sciuro-hypnum curtum* (Lindb.) Ignatov, *Lophocolea heterophylla* (Schrad.) Dumort., *Tetraphis pellucida* Hedw., в небольшом количестве к ним примешиваются эпигейные лишайники *Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng., *C. deformis* (L.) Hoffm. На кочках дренированной периферии рья отмечены *Carex globularis* L., *Molinia caerulea* (L.) Moench. Наиболее пышно разрастаются растения, приуроченные к берегу обводненной выработки. Здесь, на фоне ковра из *Sphagnum squarrosum*, доминирует *Phragmites australis*, в качестве содоминатов выступают *Calla palustris*, *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Comarum palustre*, *Thelypteris palustris*, *Naumburgia thyrsoflora*. Стеблестой трав крупный, что указывает на общую эвтрофикацию этого местообитания. Так, в отдельных понижениях и вдоль берега отмечены экземпляры *Carex nigra* до 122 см высотой. В то же время вдоль самой кромки копаней на кочках сохраняются немногочисленные кустарнички *Andromeda polifolia*, *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum*, *V. vitis-idaea* L.

Весьма специфичную группу антропогенно измененных болотных ландшафтов исследуемой территории представляют собой фрезерные поля между поселками Долгуша и Северная Грива (ключевой участок 3). Массивы обследованной части отличает сильно выработанная торфяная залежь, местами с выходом на поверхность минеральных подстилающих горизонтов. Как отмечалось выше, ближе к Долгуше находятся преимущественно дренированные участки фрезерных полей, ранее, по всей видимости, не вовлеченных в сельскохозяйственный оборот. Они также повреждались пожарами, на что указывают обгоревшие стволы ив, кото-

рые к настоящему времени стали отрастать и сформировали довольно сомкнутые кустарниковые сообщества, в основном состоящие из *Salix cinerea* (точка 3а). Например, в выгоравшем ивняке тростниково-вейниковом восстановился густой ярус из *S. cinerea* высотой до 2.70 м, причем, судя по поврежденным пожаром сухим ветвям, ранее заросли ивы здесь достигали отметок 3.0–3.5 м. Отдельные экземпляры деревьев и их подроста (*Betula pubescens*, *Salix pentandra* высотой до 5–7 м) не образуют сомкнутого яруса. Изредка встречается невысокий подрост *Acer negundo* L. Стоит отметить, что до начала промышленного освоения данной территории ива, как доминирующий вид, не была характерна для ассоциаций, занимающих Кобелевское болото, и больше тяготела к переходной зоне с близким залеганием минерального горизонта, в противовес зарослям березы, составлявшим основной фон ([Герасимов, 1922](#)).

После повреждения деревьев и кустарников пожарами на стволах сохранились или успели восстановиться некоторые эпифитные лишайники. Так, на *Salix cinerea* обнаружены листоватые *Physcia adscendens*, *Parmelia sulcata* Taylor и накипные виды: *Athallia pyracea*, *Caloplaca cerina*, *Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach., *Catillaria nigroclavata* (Nyl.) Schuler, *Polyozosia hagenii*, – а на ранее поврежденной пожаром *Salix pentandra* с обгоревшей местами древесиной – листоватые: *Physcia adscendens*, *P. stellaris*, *Vulpicida pinastri* (Scop.) J.-E. Mattsson et M.J. Lai, *Xanthoria parietina*, – а также накипные лишайники: *Athallia pyracea*, *Caloplaca cerina*, *Gyalolechia flavorubescens* (Huds.) Søchting et al., *Polyozosia hagenii*, *Rinodina archaea* (Ach.) Arnold. Большинство встреченных здесь видов лишайников нитрофилы. Многие из этих лишайников встречаются в антропогенных местообитаниях и, согласно Л.Г. Бязрову ([2002](#)), относительно устойчивы к загрязнению воздуха.

Густота травяного яруса на выработанных фрезерных полях в этой части определяется плодородием и увлажнением почв. В наиболее сухих местообитаниях с самыми бедными почвами травяной ярус разрежен (его ОПП составляет 20–25%) (точка 3b). В его образовании в основном участвуют *Calamagrostis canescens* и *Phragmites australis*. На отдельных полях лежащие сухие стебли *Phragmites australis* и его опад образуют довольно значи-

тельный по мощности слой, представляющий в засушливые сезоны серьезную опасность при возникновении пожаров. Другие виды: *Agrostis canina* L., *Carex leporina* L., *Galium palustre* L., *Juncus effusus* L., *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria*, *Poa palustris* L., *Scutellaria galericulata*, *Solanum dulcamara* L., *Veronica scutellata* L., – немногочисленны или представлены единичными экземплярами. Большинство трав из этого списка характерно для низинных болот и влажных и мокрых лугов, в том числе занятых небогатыми кислыми оглеенными почвами с торфянистым или оторфованным верхним горизонтом. Небольшую примесь составляют *Galeopsis bifida* Boenn., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Potentilla norvegica* L. – виды, чаще приуроченные к нарушенным местообитаниям. Моховой ярус в самых сухих местообитаниях отсутствует, в более влажных появляются виды рода *Bryum*, *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., *Drepanocladus polygamus*, *Polytrichum juniperinum* Hedw., *Polytrichum strictum*.

Среди обширных дренированных массивов фрезерных выработок, занятых ивняками вейниково-тростниковыми, выделяются участки, активно зарастающие подростом мелколиственных деревьев (точка 3с). В основном здесь формируются молодые березняки с участием ивы козьей и осины, иногда с единичным подростом сосны. Береза и другие деревья образуют сомкнутый ярус высотой до 8–10 м. Подлесок не выражен, встречаются отдельные невысокие ивы, *Rubus idaeus* L. Травяной ярус разреженный, в более тенистых местообитаниях его ОПП составляет 5%, ближе к световым окнам – до 30%. Среди трав преобладают растения, характерные для светлых мелколиственных лесов, а также антропогенно нарушенных местообитаний. На фоне доминирования *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth обычны *C. epigeios* (L.) Roth, *Carduus crispus* L., *Chamaenerion angustifolium*, *Galium mollugo* L., *Hieracium umbellatum* L., *Poa nemoralis* L., *P. pratensis* L., *Valeriana officinalis* L. Также присутствуют немногочисленные экземпляры *Lythrum salicaria*, *Phragmites australis*, т. е. видов, часто приуроченных к низинным болотам. На поверхности почвы, наряду с редкими пятнами зеленых мхов, разрастаются листоватые лишайники рода *Peltigera*: *P. didactyla* (With.) J.R. Laundon, *P. praetextata* (Flörke ex Sommerf.) Zopf, – в сумме образуя покрытие не более 5% от пло-

щади участка. Оба вида широко распространены на территории Московской области, причем *P. didactyla* обычен для нарушенных местообитаний (Толпышева, 2016). Среди эпифитных лишайников на стволах березы встречаются *Cetraria sepincola* (Ehrh.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Melanohalea olivacea* (L.) O. Blanco et al., *Parmelia sulcata*, *Rinodina archaea*, *Lecanora pulicaris*. На *Salix caprea* найдены *Physcia adscendens*, *P. stellaris* (L.) Nyl., *P. tenella* (Scop.) DC, *Xanthoria parietina*, *Rinodina archaea*, *Catillaria nigroclavata*.

Почвы этой части массива выработанных болот характеризуются как остаточные торфяные эвтрофные тростниково-вейниковые (рис. 3). Происхождение торфа в данной почве может быть связано как с остатками нижних слоев выработанной залежи, так и с современным торфообразованием, происходящим после прекращения добычи торфа в отдельные более влажные сезоны.

Экологические условия по трофности обследованных участков фрезерных полей севернее поселка Долгуша, рассчитанные по экологическим шкалам, преимущественно соответствуют довольно богатым почвам. В зависимости от положения по отношению к дороге Долгуша – Северная Грива, перекрывающей сток с массива, их увлажнение характеризуется от влажнолугового до сыролугового.

Заметное влияние на состав и структуру растительности и почвенного покрова фрезерных полей оказало их сельскохозяйственное освоение и использование под посев многолетних трав. Работы по рекультивации территории были проведены на наиболее доступных к дороге Долгуша – Северная Грива и поселкам участках и заключались в планировке территории, вспашке, внесении минеральных удобрений, известковании, высеве многолетних трав. Наиболее активно для целей земледелия окультуренные массивы использовались в период 1980-х – начала 1990-х годов. В последующие годы в связи с происходящей стагнацией сельскохозяйственной отрасли и потерей интереса к малопродуктивным землям постепенно происходило их забрасывание, к которому добавилось поднятие воды в мелиоративной системе, также способствовавшее ухудшению состояния угодий.

Южнее поселка Северная Грива располагается массив мели-

орированного низинного болота, заброшенный к концу 1990-х годов. Его участки характеризует высокая неоднородность почвенного покрова, чьи компоненты в значительной степени варьируют по морфологическому строению профиля (соотношению торфяной и минеральной части). Соответственно, разнообразие растительности на данных местообитаниях указывает на пространственную вариативность трофности и гидроморфизма почв. Так, в наиболее дренированных позициях образуются сухие редины с доминированием *Hieracium pilosella* L., *Polytrichum juniperinum* и лишайниками (*Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng., *C. fimbriata* (L.) Fr.) (точка 3d). За их пределами, на участках с большим увлажнением и сохранившимся (15–20 см) агроторфяно-минеральным горизонтом PTR обильно разрастаются в том числе и сорно-рудеральные виды: *Bromus inermis* (Leyss.) Holub, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Chamaenerion angustifolium*, *Hieracium umbellatum*, *Tanacetum vulgare* L. В меньшем обилии здесь отмечены *Achillea millefolium* L., *Agrostis tenuis* Sibth., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Galium mollugo* и др. Под этими сообществами формируются торфоземы агроминеральные песчаные (рис. 3) с относительно глубоким залеганием почвенно-грунтовых вод (больше 1 м). Указанные почвы не могут быть отнесены к типу агроторфяно-глеевых из-за отсутствия признаков оглеения в минеральном горизонте.

На торфоземах агроминеральных с более мощным (до 35 см) агроторфяно-минеральным горизонтом появляются *Angelica sylvestris* L., *Artemisia vulgaris* L., *Urtica dioica* L. В целом для большинства растительных сообществ фрезерных полей, в той или иной степени вовлеченных ранее в сельскохозяйственное землепользование, *Urtica dioica* является одним из главных доминантов. Кроме того, этот вид доминирует в отдаленных от дороги труднодоступных местообитаниях, представляющих собой невыровненные насыпи отфрезерованного и смешанного с песком торфа высотой до 2–3 м (точка 3е). Здесь в труднопроходимые заросли крапивы внедряются лишь малочисленные экземпляры трав *Angelica sylvestris*, *Artemisia vulgaris*, *Calamagrostis epigeios*, *Chamaenerion angustifolium*, *Phragmites australis*, кустарников *Rubus idaeus*, *Salix cinerea* и подроста деревьев (*Populus tremula*).

В свою очередь, выровненные сегменты фрезерных полей,

непосредственно примыкающие к поселку Северная Грива, ранее, судя по сохранившемуся микрорельефу, использовались жителями под огороды (точка 3f). Почвы здесь представлены торфоземом минерально-торфяным (рис. 3), подстилаемым с 35 см торфом, с 55 см – суглинком, а с 65 см – глеевым песком. На таких участках формируются луговые сообщества с господством *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., обильны *Calamagrostis epigeios*, *Festuca ovina* L., *Urtica dioica*, *Chamaenerion angustifolium*. Также участие в травостое принимают *Carex leporina*, *Galium palustre*, *G. uliginosum* L., *Juncus filiformis* L., *Lythrum salicaria*, *Lysimachia vulgaris*, *Poa palustris*.

В полосе вдоль автодороги Долгуша – Северная Грива на месте фрезерных выработок нами было обследовано два поля в залежном состоянии. На поле, заброшенном в 2000-х годах, пространственное распределение растительности отражает неоднородность влияния таких факторов, как мощность и глубина залегания остаточного торфяного слоя, УГВ, неравномерность внесения удобрений, особенности применяемых травосмесей (точка 3g). Почва на данном участке характеризуется как агроторфяно-глеевая, залегающая на супеси с 20 см. УГВ составляет 20 см. Более влаголюбивая растительность в настоящее время сосредоточена в пониженных местообитаниях и у мелиоративных канав. Здесь представлен торфозем минерально-торфяной (слоистый), подстилаемый с 50 см песком. УГВ вскрыт на уровне 30 см.

В центре участка условия приближаются к мезофильным, однако и там наблюдается прогрессирующее заболачивание. Происходит активное закустаривание территории поля – в его центре появились группы из *Salix myrsinifolia* Salisb. до 1.5 м высотой, ближе к краю, ограниченному мелиоративными канавами, отдельные деревья *S. fragilis* L. (до 6–7 м высотой) и единичный подрост *Betula pubescens*. Для сомкнутого травяного яруса (ОПП 98%) характерна высокая видовая насыщенность и экологическая пестрота, выражающаяся в сочетании представителей разных свит (по [Ниценко, 1969](#)) – гидромезофильных (*Deschampsia cespitosa*, *Poa palustris*), лугово-болотных (*Epilobium palustre*, *Galium uliginosum*, *Lythrum salicaria*, *Lysimachia vulgaris*, *Lycopus europaeus*, *Epilobium hirsutum* L., *Juncus effusus*, *Valeriana officinalis*), нитрофильных (*Ur-*

tica dioica), в том числе болотных (*Solanum dulcamara*) видов и растений мелководий (*Phragmites australis*, *Typha latifolia*). На этом фоне выделяются немногочисленные агропериформы, указывающие на культурное прошлое этого угодья (*Trifolium hybridum* L., *Phleum pratense* L., *Alopecurus pratensis* L., *Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert, *Festuca pratensis* Huds.), последний злак сохранился в наибольшем обилии. Кроме вышеперечисленных, в составе травостоя присутствуют мезофильные луговые и рудеральные травы: *Campanula patula* L., *Calamagrostis epigeios*, *Equisetum arvense* L., *Cirsium arvense*, *Galium mollugo*, *Hieracium umbellatum*, *Ranunculus auricomus* L., *Stellaria graminea* L., *Vicia tetrasperma* (L.) Schreb. Ближе к мелиоративным канавам луговая растительность трансформируется в полуболотную – растения в целом становятся значительно выше, возрастает участие влаголюбивых компонентов – *Lysimachia vulgaris*, *Phragmites australis*, *Valeriana officinalis*, появляются *Scutellaria galericulata*, *Thelypteris palustris*. Моховой ярус под покровом сомкнутых трав здесь выражен слабо.

Второе поле, заброшенное после 2010 г., в настоящее время по экологическим условиям представляет собой мезофильный луг с довольно богатыми почвами в наиболее возвышенной части, и несколько более бедными – в пониженной, примыкающей к дороге Долгуша – Северная Грива. Здесь, как и на предыдущем поле, присутствует неоднородность напочвенного покрова, но заболачивания территории не отмечено, как не отмечено и активного поселения кустарников и древесного подроста на большей его площади. На основной возвышенной части (точка 3h), соответствующей торфоземам агроминеральным, подстилаемым мезотрофным (шейхцериево-древесным) торфом (с 50 до 100 см) и ниже 100 см – песком, господствует *Urtica dioica*. УГВ здесь составляет 95–100 см. Значительно участие агропериформ, главным образом злаков (предположительно сеянных), имеющих кормовое значение – *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Dactylis glomerata* L., *Elytrigia repens*, *Festuca pratensis*, *Galega orientalis* Lam., *Phalaroides arundinacea*, *Poa pratensis*. Довольно обильны сеgetальные и рудеральные травы: *Artemisia vulgaris*, *Cirsium arvense*, *Convolvulus arvensis* L., *Fallopia dumetorum* (L.) Holub, *Galium mollugo*, *Glechoma hederacea* L., *Melandrium album* (Mill.) Garcke, *Odontites vulgaris*

Moench, *Rumex thyrsiflorus* Fingerh., *Stachys palustris* L. Ближе к границе поля увеличивается участие *Chamaenerion angustifolium*, *Angelica sylvestris*. Виды более влажных местообитаний представлены немногочисленными экземплярами *Lysimachia vulgaris*, *Myosoton aquaticum* (L.) Moench, *Poa palustris*, *Solanum dulcamara*.

Для части поля, находящейся в понижении у дороги (точка 3i), характерно более низкое покрытие растительностью и невысокое видовое разнообразие. Травостой этой ключевой площади засорен малоценными представителями дикой флоры, при этом участие в нем кормовых злаков ничтожное, кроме того, произрастающие здесь виды в большинстве своем менее требовательны к плодородию почв, чем на основной части поля, в целом же все растения более низкие по высоте в сравнении с предыдущим местообитанием. УГВ здесь установился на глубине 105 см. Почвы в целом сходны с предыдущим участком, однако агроторфно-минеральный горизонт в этом случае имеет мощность 35 см. Ниже также залегает мезотрофный шейхцеригово-древесный торф, подстилаемый, в свою очередь, со 105 см песком. Доминирует, как и на предыдущем участке, *Urtica dioica*, обильны *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Deschampsia cespitosa*, *Galium mollugo*, *Glechoma hederacea*, *Poa pratensis*, *Potentilla norvegica*, небольшую примесь составляют *Artemisia vulgaris*, *Linaria vulgaris* Mill., *Vicea tetrasperma*. Моховой покров на поле представлен небольшими пятнами зеленых мхов.

Луговые сообщества на заложенных нами ключевых площадках отличаются малое видовое разнообразие – от 12 до 29 видов. Для сравнения можно привести данные А.Н. Иванова (1995) для лугов Центральной Мещеры, где количество видов варьирует от 42 до 49. При этом экологические условия, рассчитанные по шкале активного богатства почв, обследованных участков массивов фрезерных полей южнее поселка Северная Грива (табл. 6), ранее вовлеченных в сельскохозяйственный оборот, соответствуют довольно богатым лугам или низинным болотам, за исключением редины с небогатыми почвами. Различия в степени увлажнения более выражены. Наиболее дренированные редины соответствуют сухим и свежим лугам и лесам. Условия большинства обследованных местообитаний этой группы определены как влажнолуговые,

благоприятные для возделывания многолетних трав. В то же время для одного из заброшенных полей (точка 3g) характерно сыролуговое увлажнение. Подобные участки, в случае их использования в хозяйственных целях, требуют проведения мелиоративных мероприятий.

Содержание подвижных форм фосфора и калия во всех торфоземах очень низкое, приближающееся к значениям, свойственным торфяным олиготрофным почвам (табл. 1). Последующее вовлечение земель в сельскохозяйственный оборот потребует значительного их улучшения путем проведения соответствующих агротехнических мероприятий, в том числе внесения больших доз минеральных удобрений.

И.И. Лыткиным и А.М. Гребенниковым ([1999](#)) отмечалась неустойчивость во времени слаборекультивированных слабокультуренных торфяных почв на участках выработанных торфяников Мещерской низменности. По их наблюдениям, долговременное поддержание хозяйственной ценности почв таких массивов во многом определяется условиями гидромелиорации. Соблюдение оптимальных параметров увлажнения формирует условия для их прогрессирующего окультуривания, в то же время их нарушение может приводить как к деградационным процессам в случае избыточного осушения, так и к вторичному заболачиванию при переувлажнении. Для обследованных нами ранее окультуренных участков фрезерных полей характерны и процессы вторичного заболачивания, и деградации, протекающие на сохранившихся дренированных участках.

Нарушения при добыче торфа затронули не только собственно болота. Так, примечательна судьба одного из пяти наиболее крупных озер в окрестностях Шатуры – озера Черное-Спасское (находящегося на северо-востоке от озера Святого) (ключевой участок 4). Оно входит в Шатурскую озерную группу, все озера которой представляют единую гидрологическую систему и имеют водно-ледниковое происхождение ([Рассказов, Горбатов, 2012](#)). Черное-Спасское озеро занимает площадь 0.2 кв. км, достигает глубины 3.5 м и соединяется двумя каналами с озером Святым ([Вагнер, Дмитриева, 2004](#)). Материалы обследования, проведенного в доиндустриальный период ([Герасимов, 1922](#)), показали, что его котло-

вина имела блюдцеобразную форму и была полностью выполнена илом. В зимний сезон озеро Черное промерзало до дна. Во время торфопеработок, производимых в его окрестностях, согласно сведениям краеведов ([Шатурская Мещера, 2010](#)), оно было заполнено древесными фрагментами торфа, оставшимися от добычи, стало интенсивно заиливаться и постепенно заросло, прекратив к настоящему времени свое существование и трансформировавшись в болото.

Обследованный нами участок озера Черное-Спасское в наши дни представляет собой эвтрофное болото с торфяной эвтрофной тростниковой почвой, сформировавшейся за 80–100 лет на сплаvine. При УГВ 0–5 см значительных участков открытого зеркала воды в обследованной части не отмечено. Торф, образующий сплавину, имеет мощность до 50 см, ниже залегает водоносный горизонт. Сформировавшаяся залежь отражает историю этой территории на протяжении XX в. (табл. 5). Заболачивание началось со складирования на мелководье древесных остатков, в том числе и сосны с фрагментами стеблей сфагновых мхов секции *Cuspidata*, что подтверждает версию краеведов. Но болото на этой стадии развивалось еще по топяному типу, о чем свидетельствуют остатки кувшинок в этой же толще (20–50 см). На более позднем этапе (в слое 0–20 см) обнаруживаются остатки *Phragmites australis* с эвтрофными зелеными мхами (*Calliergon cordifolium* (Hedw.) Kindb., *Drepanocladus aduncus* (Hedw.) Warnst.).

В настоящее время центральная часть бывшего озера (точка 4а) занята сообществами с доминированием *Phragmites australis*. Ближе к окраине распространены ивово-тростниково-разнотравно-зеленомошные сообщества с участием единичных экземпляров невысокой *Alnus glutinosa*. Кустарниковый ярус местами густой, местами средней густоты образован *Salix cinerea* высотой до 4–5 м, рассеяно встречаются *Frangula alnus*, *Ribes nigrum* L. ОПП травяного яруса составляет 40–50%. Довольно обильны *Calamagrostis canescens*, *Carex canescens*, *Equisetum fluviatile* L., *Lycopus europaeus*, к ним местами примешиваются стебли *Phragmites australis*, в понижениях отмечены куртины *Thelypteris palustris*, *Carex pseudocyperus*, *Cicuta virosa*. На отдельных микроповышениях разреженно встречаются *Galium palustre*, *Mentha arvensis* L., *Scutellaria ga-*

lericulata, *Solanum dulcamara*, *Stellaria longifolia* H.L. Muhl. ex Willd., до 40% площади занимают пятна *Calliergon cordifolium*.

На окраине молодого эвтрофного болота, вдоль береговой линии бывшего озера сформировалось ивово-кочедыжниково-крапивно-тростниковое сообщество (точка 4b). УГВ составляет 50 см. Мощность торфа в этой части болота более 120 см, что указывает на длительный процесс заболачивания, начавшийся в период, предшествующий хозяйственному освоению территории. В этой части озера на фоне немногочисленных деревьев ивы с примесью единичных экземпляров *Alnus glutinosa*, редких кустарников (*Salix cinerea*, *Ribes nigrum*, *Rubus idaeus*) появляются густые заросли из высокого тростника, крапивы, ближе к окраине к ним примешиваются *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Solanum dulcamara*, *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Scutellaria galericulata*, *Iris pseudacorus* L. Подобная сомкнутость трав резко снижает покрытие мохового яруса – под их покровом сохраняются отдельные латки *Calliergon giganteum*. Эвтрофикация проявляется не только в обилии видов-нитрофилов и видов, характерных для влажных низинных болот, но и в высоком виталитете отдельных растений. Например, высота экземпляров *Athyrium filix-femina* достигает 120 см (что близко к высоким показателям нормальных значений для данного вида), а высота *Thelypteris palustris* – 76 см (при обычных 30–60 см) ([Определитель растений Мещеры, 1986](#)).

ВЫВОДЫ

1. История природопользования в течение последних ста лет существенно изменила почвенно-растительный покров обследованной территории, повысив его неоднородность за счет техногенного и частично агрогенного воздействия и обусловив возросшее почвенное и биологическое разнообразие. На месте мелиорированных выработанных торфяников произошло появление новых, ранее не существовавших здесь сообществ – луговых, травяно-кустарниковых фитоценозов, мелколиственных лесов, сухих редин на дренированных участках с почти полностью выработанной залежью. Часть из них пребывает в относительно устойчивом состоянии (ивняки тростниково-вейниковые), а часть, по мере повышения увлажнения, обнаруживает тенденцию к переходу в лу-

гово-болотные формации (бывшие сельскохозяйственные земли, заброшенные в конце XX – начале XXI вв.).

2. В настоящее время собственно олиготрофные и олиго-мезотрофные болота прекратили существование. Наиболее близкими к олиго-мезотрофным условиям являются сохранившиеся косы-перемычки экскаваторных копаней на месте урочища Петровско-Кобелевского торфопредприятия на севере от Кервы. Они служат рефугиумами для видов олиготрофной флоры. Однако прогрессирующая эвтрофикация карьеров-водоемов и увеличение доли мезоэвтрофных компонентов может привести к постепенному замещению существующих на современном этапе сообществ на мезоэвтрофные.

3. Отмеченную рядом авторов на отдельных восстанавливающихся после торфодобычи участках (гидрокарьеры, фрезерные поля) болот Мещеры тенденцию к олиготрофизации как относительно устойчивую, “конечную” стадию трансформации сообществ нельзя распространить на обследованную нами часть, прилегающую к трассе Керва – Долгуша – Северная Грива, вследствие общей повышенной эвтрофикации за счет в целом увеличенного антропогенного загрязнения территории.

4. Значительная часть территории фрезерных полей, ранее используемых в качестве селхозугодий, в настоящее время затоплена. В то же время среди бывших полей, избежавших затопления, велика доля местообитаний, возвращение которых в сельскохозяйственный оборот нецелесообразно: в эту категорию земель входят участки со значительным участием болотных видов (имеющие сыролуговое или болотно-луговое увлажнение), кустарников, а также сухие малопродуктивные редины. Потенциально пригодные для сенокосов и пастбищ поля или их части невелики по площади, для них характерны влажнолуговые сообщества, отличающиеся малой долей ценных в кормовом отношении трав.

5. Почвенный покров на свободных от открытой водной поверхности территориях отличается высоким почвенным разнообразием и представлен торфяными олиготрофными вторично эвтрофными, торфяными мезотрофными, торфяными эвтрофными почвами (остаточными и сплавинными), а на подвергнутой сель-

скохозяйственному освоению части – торфоземами минерально-торфяными, торфоземами агроминеральными (типичными) и агроторфяно-глеевыми. Небольшие по площади ареалы почв (почвоподобных образований) представлены оскальпированными песками и насыпями органоминерального состава. Все компоненты почвенного покрова очень бедны в агрохимическом отношении. Возвращение в сельскохозяйственный оборот потенциально пригодных земель возможно при условии существенного их улучшения.

6. Озеро Черное-Спасское в настоящее время превратилось в молодое эвтрофное болото, сформированное на сплавине. История его заболачивания подтверждается исследованиями шатурских краеведов и ботаническим составом торфяной залежи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А.* Почвы олиго-мезотрофных и мезотрофных болот бореального пояса Западной Сибири: возможности геоботанической диагностики в рамках типа торфяных мезотрофных почв // Почвоведение. 2021. № 5. С. 568–581.
2. *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А.* Некоторые аспекты систематики и диагностики торфяных почв бореальных болот // Почвоведение. 2019. № 8. С. 901–909.
3. *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А., Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В.* Структура почвенного покрова заболоченной равнины северо-таежной подзоны Западной Сибири (бассейн р. Казым) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 208–218.
4. *Алябина И.О.* Картографическая оценка разнообразия почв России // Вестник Московского ун-та. Сер. 17: почвоведение. 2018. № 1. С. 8–15.
5. *Антипин В.К., Бойчук М.А., Возбранная А.Е., Миронов В.Л., Сиринов А.А.* Структура и динамика растительного покрова на выработанных торфяниках национального парка “Мещера” // Особо охраняемые природные территории: современное состояние и перспективы развития. Материалы Всероссийской юбилейной научно-практической конференции, посвященной 25-летию национального парка “Мещера”. 2018. С. 223–230.
6. *Борзенков Л.Е.* Динамика растительного покрова болот Подмосковной Мещеры в процессе антропогенеза: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. 25.00.36. М., 2005. 25 с.
7. *Бязров Л.Г.* Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный

мир, 2002. 336 с.

8. *Вазнер Б.Б., Дмитриева В.Т.* Озера и водохранилища Московского региона: Учеб. пособие. М.: МГПУ, 2006, 105 с.

9. *Викторов С.В., Ремезова Г.Л.* Индикационная геоботаника. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 168 с.

10. *Герасимов Д.А.* Некоторые данные о строении озер Кобелевского торфяника // Изв. Инсторфа. 1922. Вып. 2. С. 83–98.

11. *Григорьев М.П., Герасимов Д.А.* Шатурская болотная система. О строении и происхождении Шатурского болота // Работы Торфяной академии. Вып. 1. М., 1921. 68 с.

12. *Дьяконов К.Н.* Географические проблемы изучения мелиоративных осушительных систем // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. № 6. 1979. С. 71–80.

13. *Исаченко Т.И., Юрковская Т.К.* Основные типы сочетаний растительности Мещеры и отражение их на карте // Геоботаническое картографирование 1973. С. 3–16.

14. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П.* Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: МГУ, 2002. 155 с.

15. *Иванов А.Н.* Болотные геосистемы Центральной Мещеры // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 1995. № 5. С. 86–94.

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

17. *Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С.* Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 3–16.

18. *Лапина Е.Д., Блоитен В.* Типы нарушений и естественное восстановление растительности олиготрофных болот на нефтяных месторождениях Томской области // Крыловия. Т. 1. № 1. 1999. С. 129–140.

19. *Лукьянова Т.С., Сушкова И.В., Шмелев Е.А.* О дальнейшей судьбе увлажненных территорий Западной Мещеры // Научное мнение. 2011. № 2. С. 159–162.

20. *Лыткин И.И., Гребенников А.М.* Относительная устойчивость к деградации антропогенно-нарушенных болотных экосистем при их окультуривании // Сб. “Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого управления природопользованием”. М., 1999. С. 335–337.

21. Национальный Атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, 2011. 632 с.

22. *Ниценко А.А.* Об изучении экологической структуры растительного

покрова // Бот. журн. 1969. Т. 54. № 7. С. 1002–1014.

23. Определитель растений Мещеры. Часть 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 240 с.

24. Очагов Д.М., Райнен Р., Бутовский Р.О., Алещенко Г.М., Еремкин Г.С., Есенова И.М. Экологические сети и сохранение биоразнообразия Центральной России: Исследование на примере торфяных болот Петушинского района. М., 2000. 80 с.

25. Почвенная карта РСФСР. М 1 : 2 500 000. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.

26. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Государственное издательство сельского хозяйства, 1956. 530 с.

27. Рассказов А.А., Горбатов Е.С. Анализ геологического строения и истории развития озерных котловин как основа для геоэкологического мониторинга (на примере Шатурской группы озер) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 1. С. 66–73.

28. Савин И.Ю. Природа Шатурского края. URL: <http://shatura-nature.narod.ru>.

29. Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 412–422.

30. Сперанская Е.С. Влияние осушения на луговые комплексы (на примере Мещерской низменности) // Географические проблемы осушительных мелиораций. М., 1990. С. 54–78.

31. Толтышева Т.Ю. Виды рода *Peltigera* на территории Московской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2. С. 230–234.

32. Тюремнов С.Н., Абрамова Л.И., Лисс О.Л., Страшинова С.В. Процесс зарастания выработанных торфяников // Природные условия и возможности хозяйственного использования торфокарьерных площадей. М., 1968. С. 26–59.

33. Харитонова Т.И. Инволюция постмелиорированных ландшафтов Центральной Мещеры: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2015. 24 с.

34. Шатурская Мещера. Историко-краеведческий альманах. Выпуск 3. Шатура, 2010. 88 с.

35. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Алексеев Ю.Е., Шведчикова Н.К. Экология представителей семейства Осоковые (*Syraceae*) в нарушенных местообитаниях нефтяных месторождений Среднего Приобья // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол. 2014. Т. 119. № 4. С. 68–78.

36. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000 в формате классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 223–240. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-223-240](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240).
37. Элеваторные торфоразработки. 17.08.2012. URL: <https://gorenskiyles.livejournal.com/16220.html>.
38. Baisheva E.Z., Muldashev A.A., Martynenko V.B., Fedorov N.I., Bikbaev I.G., Minaeva N.Yu., Sirin A.A. Plant diversity and spatial vegetation structure of the calcareous spring fen in the “Arkaulovskoye Mire” Protected Area (Southern Urals, Russia) // Mires and Peat. 2019. Vol. 24. Art. 13. DOI: [10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1890](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1890).
39. Gerasimova M.I., Golovleva I.A., Konyushkova M.V., Sorokin A.S., Krasilnikov P.V. Assessment of soil diversity using maps with different scales in Eastern Fennoscandia, Russia // Geoderma Regional. 2020. Vol. 21. e00274. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00274](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00274).
40. Lauber K., Wagner G., Gygax A. Flora Helvetica. Bern: Haupt Verlag (Nachdruck der 5 Auflage), 2014. 1656 p.
41. Minaeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // Mires and Peat. 2017. Vol. 19. Art. 01.
42. Normander B., Levin G., Auvinen A.-P., Bratli H., Stabbetorp O., Hedblom M., Glimskär A., Gudmundsson G.A. Indicator framework for measuring quantity and quality of biodiversity – Exemplified in the Nordic countries // Ecological Indicators. 2012. Vol. 13. P. 104–116. DOI: [10.1016/j.ecolind.2011.05.017](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.017).
43. Read H.J., Bealey C.E. The restoration of heathland and mire from secondary woodland: How realistic are target vegetation communities? // Journal for Nature Conservation. 2021. Vol. 62. 125943. DOI: [10.1016/j.jnc.2020.125943](https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125943).
44. Remm L., Lõhmus A., Leibak E., Kohv M., Salm J.-O., Lõhmus P., Rosenvald R., Runnel K., Vellak K., Rannap R. Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and practical approach in Estonian mires // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 250. 10943. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.10943](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.10943).
45. Renou-Wilson F., Moser G., Fallon D., Farell C.A., Müller C., Wilson D. Rewetting degraded peatlands for climate and biodiversity benefits: Results from two raised bogs // Ecological Engineering. 2019. Vol. 127. P. 547–560. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2018.02.014](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.014).
46. Spitale D. A warning call from mires of the Southern Alps (Italy): Impacts which are changing the bryophyte composition // Journal for Nature

- Conservation. 2021. Vol. 61. 125994. DOI: [10.1016/j.jnc.2021.125994](https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.125994).
47. Wittenebel M., Tiemeyer B., Dettmann U. Peat and other organic soils under agricultural use in Germany: Properties and challenges for classification // *Mires and Peat*. 2021. Vol. 27. Art. 19. DOI: [10.19189/MaP.2020.SJ.StA.2093](https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SJ.StA.2093).
48. Wolejko L., Grootjans A.P., Pakalne M., Strazdiņa L., Aleksāns O., Elshehawi S., Grabowska E. The biocenotic value of Slitere National Park, Latvia, with special reference to inter-dune mires // *Mires and Peat*. 2019. Vol. 24. Art. 13. DOI: [10.19189/MaP.2018.AJB.361](https://doi.org/10.19189/MaP.2018.AJB.361).

REFERENCES

1. Avetov N.A., Kuznecov O.L., Shishkonakova E.A., Pochvy oligo-mezotrofnyh i mezotrofnyh bolot boreal'nogo pojasa Zapadnoj Sibiri: vozmozhnosti geobotanicheskoy diagnostiki v ramkah tipa torfjanyh mezotrofnyh pochv (Soils of oligo-mesotrophic and mesotrophic bogs of the boreal belt of Western Siberia: Possibilities of geobotanical diagnostics within the type of mesotrophic peat soils), *Pochvovedenie*, 2021, No. 5, pp. 568–581.
2. Avetov N.A., Shishkonakova E.A., Nekotorye aspekty sistematiki i diagnostiki torfjanyh pochv boreal'nyh bolot (Some aspects of systematics and diagnostics of peat soils in boreal mires), *Pochvovedenie*, 2019, No. 8, pp. 901–909.
3. Avetov N.A., Shishkonakova E.A., Kinzhaev R.R., Arzamazova A.V., Struktura pochvennogo pokrova zabolochennoj ravniny severo-taezhnoj podzony Zapadnoj Sibiri (Soil cover pattern of the mire plain of the north taiga subzone in West Siberia (the Kazym River Basin)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 208–218.
4. Aljabina I.O., Kartograficheskaja ocenka raznoobrazija pochv Rossii (Cartographic assessment of soil diversity in Russia), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17: pochvovedenie*, 2018, No. 1, pp. 8–15.
5. Antipin V.K., Bojchuk M.A., Vozbrannaja A.E., Mironov V.L., Sirin A.A., Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova na vyrabotannyh torfjanikah nacional'nogo parka “Meshhera” (The structure and dynamics of the vegetation cover on the cut-over peatlands of the Meshchera National Park), *Osobo ohranjaemye prirodnye territorii: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija* (Specially Protected Natural Territories: Current State and Development Prospects), Proc. All-Russia Conference dedicated to the 25th anniversary of the Meshchera National Park, 2018, pp. 223–230.
6. Borzenok L.E., *Dinamika rastitel'nogo pokrova bolot Podmoskovnoy Meshchery v protsesse antropogeneza: Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk.* 25.00.36 (Vegetation dynamics in the bogs of Meschera near Moscow during

anthropogenesis, Extended abstract of cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 2005, 25 p.

7. Bjazrov L.G., *Lishajniki v jekologicheskom monitoringe* (Lichens in ecological monitoring), Moscow: Nauchnyj mir, 2002, 336 p.

8. Vagner B.B., Dmitrieva V.T., *Ozera i vodohranilishha Moskovskogo regiona* (Lakes and reservoirs of the Moscow region), Moscow: MGPU, 2006, 105 p.

9. Viktorov S.V., Remezova G.L., *Indikacionnaja geobotanika* (Indication geobotany), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1988, 168 p.

10. Gerasimov D.A., Nekotorye dannye o stroenii ozer Kobelevskogo torfjanika (Some data on the structure of the lakes of the Kobelevsky peat bog), *Izv. Instorfa*, 1922, Vol. 2, pp. 83–98.

11. Grigor'ev M. P., Gerasimov D.A., Shaturskaja bolotnaja sistema. O stroenii i proishozhdenii Shaturskogo bolota (Shaturskaya mire system. On the structure and origin of the Shatura mire), *Raboty Torfjanoj akademii*, 1921, Vol. 1, 68 p.

12. D'jakonov K.N., Geograficheskie problemy izuchenija meliorativnyh osushitel'nyh sistem (Geographical problems of studying meliorative drainage systems), *Vestnik Moskovskogo universiteta Ser. 5. Geografija*, 1979, No. 6, pp. 71–80.

13. Isachenko T.I., Jurkovskaja T.K., Osnovnye tipy sochetanij rastitel'nosti Meshhery i otrazhenie ih na karte (The main types of vegetation combinations in Meshchera and their reflection on the map), *Geobotanicheskoe kartografirovanie*, 1973, pp. 3–16.

14. Zejdel'man F.R., Shvarov A.P., *Pirogennaja i gidrotermicheskaja degradacija torfjanyh pochv, ih agrojekologija, peschanye kul'tury zemledelija, rekul'tivacija* (Pyrogenic and hydrothermal degradation of peat soils, their agroecology, sand cultures of agriculture, reclamation), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2002. 155 p.

15. Ivanov A.N., Bolotnye geosistemy Central'noj Meshhery (Mire geosystems of Central Meshchera) // *Vestnik Moskovskogo universiteta Ser. 5. Geografija*, 1995, No. 5, pp. 86–94.

16. *Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Ojkumena, 2004, 342 p.

17. Krasil'nikov P.V., Gerasimova M.I., Golovanov D.L., Konjushkova M.V., Sidorova V.A., Sorokin A.S., Pochvennoe raznoobrazie i ego znachenie v kontekste sovremennoj geografii pochv (Soil diversity and its significance in the context of modern soil geography), *Pochvovedenie*, 2018, No. 1, pp. 3–16.

18. Lapshina E.D., Blojten V., Tipy narushenij i estestvennoe vosstanovlenie rastitel'nosti oligotrofnyh bolot na nefjtjanyh mestorozhdenijah Tomskoj oblasti (Types of disturbances and natural revegetation of oligotrophic bogs in

the oil fields of the Tomsk Region), *Krylovija*, 1999, Vol. 1, No. 1, pp. 129–140.

19. Luk'janova T.S., Sushkova I.V., Shmelev E.A., O dal'nejšej sud'be uvlazhennyyh territorij Zapadnoj Meshhery (On the further fate of the wetlands of Western Meshchera), *Nauchnoe mnenie*, 2011, No. 2. pp. 159–162.

20. Lytkin I.I., Grebennikov A.M., Otnositel'naja ustojchivost' k degradacii antropogenno-narushennyh bolotnyh jekosistem pri ih okul'turivanii (Relative resistance to degradation of anthropogenically disturbed bog ecosystems during their cultivation), In: *Bolota i zabolochennye lesa v svete zadach ustojchivogo upravlenija prirodoopol'zovaniem* (Mires and swampy forests in the light of the objectives of sustainable environmental management), Moscow, 1999, pp. 335–337.

21. *Nacional'nyj Atlas pochv Rossijskoj Federacii* (National Atlas of Soils of the Russian Federation), Moscow: Astrel', 2011, 632 p.

22. Nicenko A.A., Ob izuchenii jekologicheskoj struktury rastitel'nogo pokrova (On the study of the ecological structure of vegetation cover), *Bot. zhurn*, 1969, Vol. 54, No. 7, pp. 1002–1014.

23. *Opredelitel' rastenij Meshhery. Chast' 1* (Key to Meshchera plants. Part 1), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986, 240 p.

24. Ochagov D.M., Rajnen R., Butovskij R.O., Aleshchenko G.M., Eremkin G.S., Esenova I.M., *Jekologicheskie seti i sohranenie bioraznoobrazija Central'noj Rossii: Issledovanie na primere torfjanyh bolot Petushinskogo rajona* (Ecological networks and biodiversity conservation in Central Russia: A study on the example of peat mires in the Petushinsky district), Moscow, 2000, 80 p.

25. *Pochvennaja karta RSFSR* (Soil Map of RSFSR). 1:2 500 000. Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.

26. Ramenskij L.G., Cacenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A., *Jekologicheskaja ocenka kormovyh ugodij po rastitel'nomu pokrovu* (Ecological assessment of forage land by vegetation cover), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo sel'skogo hozjajstva, 1956, 530 p.

27. Rasskazov A.A., Gorbato E.S., Analiz geologicheskogo stroenija i istorii razvitiya ozernyh kotlovyn kak osnova dlja geojekologicheskogo monitoringa (na primere Shaturskoj gruppy ozer) (Analysis of the geological structure and history of the development of lake basins as a basis for geoecological monitoring (on the example of the Shatura group of lakes)), *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2012, No. 1, pp. 66–73.

28. Savin I.Yu., *Priroda Shaturskogo kraja* (Nature of the Shatura region), URL: <http://shatura-nature.narod.ru>.

29. Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ja.I., Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare (Depth of burning of peat and loss of carbon during forest underground fire), *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 412–422.
30. Speranskaja E.S., Vlijanie osusheniya na lugovye komplekсы (na primere Meshherskoj nizmennosti) (Effect of drainage on meadow complexes (on the example of the Meshcherskaya lowland)), In: *Geograficheskie problemy osushitel'nyh melioracij* (Geographical problems of drainage reclamation), Moscow, 1990, pp. 54–78.
31. Tolpysheva T.Yu., Vidy roda Peltigera na territorii Moskovskoj oblasti (Species of the genus Peltigera in the Moscow region), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 230–234.
32. Tjurenov S.N., Abramova L.I., Liss O.L., Strashnova S.V., Process zarastaniya vyrabotannyh torfjanikov (The process of overgrowing worked out peatlands), In: *Prirodnye uslovija i vozmozhnosti hozjajstvennogo ispol'zovaniya torfokar'ernyh ploshhadej* (Natural conditions and opportunities for economic use of peat quarry areas), Moscow, 1968, pp. 26–59.
33. Haritonova T.I., Involyucija postmeliorirovannyh landshaftov Central'noj Meshchery. Avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk (Involution of post-reclaimed landscapes of Central Meshchera. Synopsis of Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 2015. 24 p.
34. Shaturskaja Meshhgora. Istoriko-kraevedcheskij al'manah. Vypusk 3 (Shaturskaya Meshchera. Historical and local history almanac. Release 3), Shatura, 2010, 88 p.
35. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Alekseev Ju.E., Shvedchikova N.K., Jekologija predstavitelej semejstva Osokovyje (Syperaceae) v narushennyh mestoobitanijah nefjanyh mestorozhdenij Srednego Priob'ja (Ecology of Representatives of the Sedge Family (Cyperaceae) in Disturbed Habitats of Oil Fields in the Middle Ob Region), *Bjul. Mosk. o-va ispytatelej prirody. Otd. biol.*, 2014, Vol. 119, No. 4, pp. 68–78.
36. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V. Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 223–240, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-223-240](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240).
37. Elevator peat mining. 08/17/2012.
URL: <https://gorenskiyles.livejournal.com/16220.html> (17.08.2012).
38. Baisheva E.Z., Muldashev A.A., Martynenko V.B., Fedorov N.I., Bikbaev I.G., Minaeva N.Yu., Sirin A.A. Plant diversity and spatial vegetation structure of the calcareous spring fen in the “Arkaulovskoye Mire” Protected Area (Southern Urals, Russia), *Mires and Peat*, 2019, Vol. 24, Art. 13, DOI:

[10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1890.](#)

39. Gerasimova M.I., Golovleva I.A., Konyushkova M.V., Sorokin A.S., Krasilnikov P.V. Assessment of soil diversity using maps with different scales in Eastern Fennoscandia, Russia // *Geoderma Regional*, 2020, Vol. 21, e00274. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00274.](#)

40. Lauber K., Wagner G., Gygas A., *Flora Helvetica*, Bern: Haupt Verlag (Nachdruck der 5. Auflage), 2014, 1656 p.

41. Minaeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A., Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity, *Mires and Peat*, 2017, Vol. 19, Art. 01.

42. Normander B., Levin G., Auvinen A-P, Bratli H., Stabbetorp O., Hedblom M., Glimskär A., Gudmundsson G.A., Indicator framework for measuring quantity and quality of biodiversity – Exemplified in the Nordic countries, *Ecological Indicators*, 2012, Vol.13, pp. 104–116, DOI: [10.1016/j.ecolind.2011.05.017.](#)

43. Read H.J., Bealey C.E., The restoration of heathland and mire from secondary woodland: How realistic are target vegetation communities? *Journal for Nature Conservation*, 2021, Vol. 62, 125943, DOI: [10.1016/j.jnc.2020.125943.](#)

44. Remm L., Lõhmus A., Leibak E., Kohv M., Salm J-O., Lõhmus P., Rosenvald R., Runnel K., Vellak K., Rannap R., Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and practical approach in Estonian mires, *Journal of Environmental Management*, 2019, Vol. 250, 10943, DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.](#)

45. Renou-Wilson F., Moser G., Fallon D., Farrell C.A., Müller C., Wilson D., Rewetting degraded peatlands for climate and biodiversity benefits: Results from two raised bogs, *Ecological Engineering*, 2019, Vol. 127, pp.547-560, DOI: [10.1016/j.ecoleng.2018.02.014.](#)

46. Spitale D., A warning call from mires of the Southern Alps (Italy): Impacts which are changing the bryophyte composition, *Journal for Nature Conservation*, 2021, Vol. 61, 125994, DOI: [10.1016/j.jnc.2021.125994.](#)

47. Wittenebel M., Tiemeyer B., Dettmann U., Peat and other organic soils under agricultural use in Germany: Properties and challenges for classification, *Mires and Peat*, 2021, Vol. 27, Art. 19, DOI: [10.19189/MaP.2020.SJ.StA.2093.](#)

48. Wofejko L., Grootjans A.P., Pakalne M., Strazdiņa L., Aleksāns O., Elshehawi S., Grabowska E., The biocenotic value of Slitere National Park, Latvia, with special reference to inter-dune mires, *Mires and Peat*, 2019, Vol. 24, Art. 13, DOI: [10.19189/MaP.2018.AJB.361.](#)

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-77-96



Ссылки для цитирования:

Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Виндекер Г.В. Распознавание пахотных почв по фотографиям, получаемым в рамках краудсорсинговых технологий // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 77-96. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-77-96

Cite this article as:

Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Vindeker G.V., Recognition of arable soils from photographs obtained as part of crowdsourcing technologies, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 77-96, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-77-96

Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта РФ в лице Минобрнауки (соглашение № 075-15-2022-321).

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the scientific project (Agreement No. 075-15-2022-321).

Распознавание пахотных почв по фотографиям, получаемым в рамках краудсорсинговых технологий

© 2022 г. Е. Ю. Прудникова^{1,2*}, И. Ю. Савин^{1,2**},
Г. В. Виндекер^{1***}

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

* <https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0002-0463-42411>, e-mail: gretelericka@gmail.com.

²Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Россия,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила в редакцию 19.04.2022, после доработки 17.05.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: В статье рассматриваются возможности использования фотографий, получаемых при использовании краудсорсинговых

технологий для оперативной инвентаризации пахотных почв. Объектом исследования выступает спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв тестовых участков, измеренная с помощью спектрорадиометра HandHeld-2, регистрирующего отражение в диапазоне 325–1 075 нм, и их изображение на фотографиях, полученных обычными фотокамерами. Тестовые участки расположены в Тульской, Московской и Тверской областях. Почвы тестовых участков – дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы выщелоченные. На основе анализа фотографий поверхности и информации, полученной с помощью спектрорадиометра, был рассчитан набор спектральных параметров в цветовых системах RGB, YMC и HSI, а также их соотношения (45 параметров). Данные параметры использовались для разделения анализируемых типов почв с помощью деревьев классификации. Точность классификации по результатам валидации варьирует в пределах 63–100%. При этом параметры цветовых систем HSI и YMC оказались более информативны, чем параметры цветовой системы RGB. Установленные правила классификации в дальнейшем могут применяться для определения классификационного положения почв по изображениям, собранным с помощью краудсорсинговых технологий.

Ключевые слова: инвентаризация почв, краудсорсинг, дистанционные данные, деревья принятия решений.

Recognition of arable soils from photographs obtained as part of crowdsourcing technologies

© 2022 E. Yu. Prudnikova^{1,2*}, I. Yu. Savin^{1,2**},
G. V. Vindeker^{1***}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

***<https://orcid.org/0000-0002-0463-42411>, e-mail: gretelericka@gmail.com.

²Institute of Ecology, RUDN University,
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

Received 19.04.2022, Revised 17.05.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The study focuses on the possibilities of using photographs obtained using crowdsourcing technologies for the operational inventory of arable soils. The object of the study is the spectral reflectance of the open surface of arable soils of the test plots, measured using a HandHeld-2 spectroradiometer

operating in the range of 325–1 075 nm, and their image in photographs taken with conventional cameras. Test sites are located in the Tula, Moscow and Tver regions. The soils of the test plots are sod-podzolic, gray forest, and leached chernozems. Based on the analysis of photographs of the surface and information obtained using a spectroradiometer, a set of spectral parameters in the RGB, YMC and HSI color systems, as well as their ratios (45 parameters), was calculated. These parameters were used to separate the analyzed soil types using classification trees. The accuracy of classification based on the results of validation varies from 63–100%. At the same time, the parameters of the HSI and YMC color systems turned out to be more informative than the parameters of the RGB color system. The established classification rules can later be used to determine the classification position of soils from images collected using crowdsourcing technologies.

Keywords: soil inventory, crowdsourcing, remote data, decision trees.

ВВЕДЕНИЕ

Краудсорсинг (англ. crowdsourcing, от crowd – толпа и sourcing – использование или привлечение ресурсов) – привлечение к решению тех или иных проблем инновационной производственной деятельности широкого круга лиц на добровольных началах с применением информационных технологий. Среди краудсорсинговых проектов встречаются проекты для голосования и сбора идей, по обработке научных материалов, конкурсные платформы, краудсорсинговые агрегаторы, справочные ресурсы, проекты по совместному использованию данных, различные формы совместной работы с контентом и поддержки коллективных инноваций. Одним из примеров известных краудсорсинговых проектов является Википедия.

Также фотографии, размещаемые в Google Earth¹ пользователями, являются примером краудсорсинговой базы данных географически привязанных изображений различных объектов (в том числе почв), которые можно использовать для их анализа и оценки.

Изображение пахотных почв и посевов является источником информации об их свойствах. Изображения, получаемые со спутников или с помощью БПЛА, достаточно широко используются

¹ <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>

для оценки и мониторинга почв и их свойств ([Chen et al., 2000](#); [Савин, Симакова, 2012](#); [Dou et al., 2019](#)). Фотографии поверхности, сделанные в поле, применяются для оценки проективного покрытия почвы растительностью (посевами, сорняками) и состояния открытой поверхности пахотных почв ([Prudnikova, Savin, 2021](#)).

По цифровым фотографиям Пузаченко и др. ([2004](#)) анализировали строение почвенного профиля. Zhang и Hartemink ([2019](#)) использовали цифровые изображения для выделения почвенных горизонтов. Ху и др. ([2019](#)) применяли фотографии для определения засоления и неоднородности поверхности почв. Levin и др. ([2005](#)) изучали возможность применения цифровых фото для оценки содержания оксида железа и илестых и глинистых частиц в песчаных почвах полупустынь. Persson ([2005](#)) показал возможность применения цифровых фото для определения влажности почв. V. Rossel и др. ([2008](#)) оценивали возможность применения цифровых фото для определения содержания органического углерода и оксида железа.

Также ведутся исследования по направлению использования мобильных телефонов и их фотокамер для оперативной оценки свойств почв. В работе Chodium и др. ([2013](#)) изучалась возможность применения iPhone для количественного анализа почвы на содержание взрывчатых веществ. Aitkenhead (2013)² продемонстрировал приложение для смартфона, связывающее камеру, анализ изображений и их обработку, для оценки содержания углерода в почве. Нап и др. ([2016](#)) предложили новый сенсор оценки почвенного цвета, основанный на смартфоне, для определения типа почв.

Несмотря на перспективность использования цифровых фотографий почв для анализа их различных характеристик, на сегодняшний день отсутствуют подходы, позволяющие использовать для этих целей краудсорсинговые данные. Поскольку получаемые в рамках краудсорсинговых технологий данные отличаются высокой неоднородностью (разные фотокамеры, разные условия съем-

² <http://www.hutton.ac.uk/research/groups/information-and-computational-sciences/esmart>

ки (освещенность, угол съемки)), необходима разработка подхода, учитывающего эту неоднородность.

Целью исследования на данном этапе было установить информативные параметры спектральной отражательной способности почв (СОС), которые инвариантны к разным условиям съемки, но позволяют наиболее точно определять тип почвы, а также установить пороговые значения информативных параметров для трех типов почв (дерново-подзолистой, серой лесной и чернозема) на основе компьютерного анализа фотографий их поверхности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования выступает спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв тестовых участков и их изображение на фотографиях, полученных обычными фотокамерами. Тестовые участки расположены в Тульской, Московской и Тверской областях. Почвы тестовых участков – дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы выщелоченные.

Стратегия исследования

В основе краудсорсинговой технологий оперативной инвентаризации пахотных почв лежит характер их изображения на фотографиях, а также их СОС в оптическом диапазоне, которые связаны с их свойствами ([Rossel et al., 2006](#)).

При этом используются фотографии, полученные в разных условиях съемки и для разного состояния поверхности: при ярком освещении, при темном освещении, под разными углами, для трансформированной поверхности, для свежеспаханной поверхности. Поскольку при съемке СОС в поле прибор калибруется на условия освещения с помощью специальной эталонной панели, спектральные кривые не зависят от условий освещенности в отличие от фотографий.

Фотографии используются для расчетов различных параметров изображения для почв и посевов. Те же параметры рассчитываются для кривых СОС. Затем с помощью дерева классификации выбираются параметры, информативные для определения классификационного положения почв, а также устанавливаются

правила классификации. При этом параметры, полученные по фотографиям и по кривым СОС, анализируются совместно. Таким образом выявляются информативные спектральные параметры, которые инвариантны к разным условиям съемки, но позволяют наиболее точно определять тип почвы.

Полевые работы

В 2021 г. в ходе полевых выездов собиралась следующая информация: спектры открытой поверхности пахотных почв и фотографии поверхности (табл. 1).

Таблица 1. Собранные полевые данные
Table 1. Collected field data

Тип почвы	Количество точек с фото	Количество спектров	Общее количество точек
Дерново-подзолистая почва	13	25	38
Серая лесная почва	10	35	45
Чернозем	10	10	20

Съемка СОС проводилась спектрорадиометром HandHeld-2, работающим в диапазоне 325–1 075 нм. Прибор располагался перпендикулярно измеряемой поверхности на расстоянии около 150 см. Съемка в каждой точке проводилась в 5-кратной повторности. Измерения СОС при использовании данного прибора проводятся с использованием яркости, отраженной от образца, и яркости, отраженной от белой эталонной панели со 100%-ной отражающей способностью.

Съемка поверхности проводилась разными фотокамерами в разных условиях (под разными углами и разным направлением падения солнечных лучей, в разных условиях освещения, с разного расстояния), для разного состояния поверхности почв (свежевспаханная, с посевами, со стерней) для того, чтобы максимально полно имитировать именно краудсорсинговый путь сбора исходных данных.

Анализ фотографий поверхности пахотных почв

Полученные изображения анализировались в программе ILWIS Academic 3.3. Сначала был проведен визуальный анализ фотографий, по результатам которого были замаскированы участки с посторонними объектами, тенью от людей и посторонних предметов (при их наличии). Далее с помощью операции Color separation изображения были разложены на каналы в цветовых системах RGB (RED, GREEN, BLUE), YMC (YELLOW, MAGENTA, CYAN), HSI (HUE, SATURATION, INTENSITY), и канал GRAY.

Пересчет из системы RGB в YMC, HSI и канал GRAY проводился по следующим формулам:

$$Yellow = 255 - Blue \quad (1)$$

$$Magenta = 255 - Green \quad (2)$$

$$Cyan = 255 - Red \quad (3)$$

$$Hue = (255/2\pi) * \arctan2(1/2 \sqrt{3} * (Green - Blue), Red - (Green + Blue) / 2) * 240/255 \quad (4)$$

$$Saturation = \sqrt{(Red^2 + Green^2 + Blue^2 - Red * Green - Red * Blue - Green * Blue) * 240/255} \quad (5)$$

$$Intensity = 1/3 * (Red + Green + Blue) * 240/255 \quad (6)$$

$$Gray = 0.3 * Red + 0.59 * Green + 0.11 * Blue \quad (7)$$

После этого каждое изображение было классифицировано на 2 основных класса: “почва” и “другое” (посевы, листья и прочее) с помощью классификации с обучением.

Выбор комбинации каналов для классификации каждого изображения осуществлялся на основе визуальной оценки качества разделения классов при сочетании разных каналов. Чаще всего для классификации использовалась комбинация каналов RED, GREEN, BLUE.

По завершении классификации для каждого изображения определялось среднее значение отражения в каждом канале для класса “почва”. Далее полученные значения переносились в MS

Excel, где дополнительно рассчитывались отношения между каналами (45 параметров).

Предварительная обработка и анализ данных о СОС

Для каждой точки на основе 5 повторностей рассчитывалась средняя спектральная кривая. После чего проводилась фильтрация данных о СОС методом Савицкого-Голея. Фильтрация осуществлялась в программе R с помощью функции “*savitzkyGolay*” пакета “*prospectr*”³.

Затем СОС пересчитывалась в те же параметры, которые рассчитывались на основе анализа фотографий, включая 45 соотношений между каналами. Сначала проводился пересчет в отражение в RGB с помощью пакетов “*pavo*”⁴, “*grDevices*”⁵ программы R, а затем расчет остальных параметров по формулам, представленным выше (формулы 1–7).

Дисперсионный анализ влияния типа почв на значения отражения в различных цветовых системах

Для определения существования статистически значимых различий между параметрами отражения, рассчитанными в разных цветовых системах, для разных типов почв использовался однофакторный дисперсионный анализ. Для дисперсионного анализа использовалась функция “*aov*” пакета “*stats*”⁶ программы R.

В случае наличия статистически значимых различий далее проводился апостериорный анализ. Использовался Критерий Тьюки достоверно значимой разности, который рассчитывался с помощью функции “*TukeyHSD*” пакета “*stats*” программы R.

В результате для каждого параметра отражения в разных цветовых системах устанавливалось наличие или отсутствие статистически значимого влияния типа почв, а также при наличии такого влияния – типы почвы, значимо различающиеся между собой по величине данного параметра.

³ <https://cran.r-project.org/web/packages/prospectr/index.html>

⁴ <https://cran.r-project.org/web/packages/pavo/index.html>

⁵ <https://www.rdocumentation.org/packages/grDevices/versions/3.6.2>

⁶ <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/00Index.html>

Определение типа почв с помощью дерева классификации

При определении типа почв с помощью дерева классификации в основе лежали параметры отражения почв, рассчитанные в разных цветовых системах. Для построения дерева классификации использовался пакет “*rpart*”⁷ программы R.

Предварительно до построения дерева данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30. Для этого использовалась функция “*createDataPartition*” пакета “*caret*”⁸. Дерево строилось на обучающей выборке и проверялось на тестовой.

Для каждого дерева классификации устанавливался свой параметр сложности *cp*. Параметр *cp* определялся с помощью функции “*train*” пакета “*caret*” в диапазоне от 0.01 до 0.5 с шагом 0.01. Функция “*train*” устанавливает сетку параметров настройки для классификации, подгоняет модель и вычисляет качество модели на основе ресамплинга. В результате для каждого значения *cp* рассчитывается точность модели. В итоге выбирается такое значение параметра сложности, при котором получается модель с наибольшей точностью. Определение значения оптимального параметра сложности проводится на обучающей выборке.

Точность классификации оценивалась как отношение количества точек тестовой выборки с правильно определенным типом почв к общему числу точек тестовой выборки, выраженное в процентах. Также строилась матрица ошибок классификации, которая показывает какое количество точек каждого типа было классифицировано верно и какое количество было отнесено к другим типам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральная отражательная способность почв в разных цветовых системах

⁷ <https://www.rdocumentation.org/packages/rpart/versions/4.1-15/topics/rpart>.

⁸ <https://cran.r-project.org/web/packages/caret/vignettes/caret.html>.

В целом, наибольшие значения отражения отмечаются в системе YMC, а наименьшие в канале SATURATION системы HSI (рис. 1).

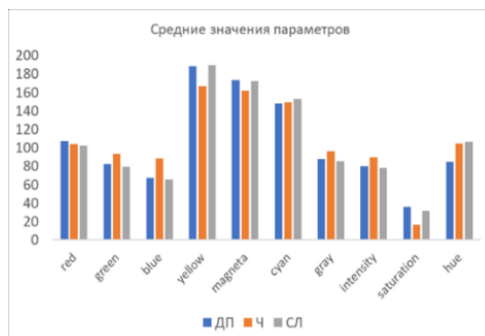
При этом идет снижение средних значений отражения в ряду RED – GREEN – BLUE системы RGB, YELLOW – MAGNETA – CYAN системы YMC, HUE – INTENSITY – SATURATION системы HSI. Отражение в канале GRAY близко к отражению в канале INTENSITY.

В каналах RED, GREEN и GRAY в случае спектров наибольшим отражением характеризуется дерново-подзолистая почва, в то время как по результатам анализа фотографий в этом канале сильнее всего отражает чернозем. В канале BLUE по спектрам три анализируемых типа почвы имеют очень близкое среднее отражение, в то время как по фотографиям прослеживается достаточно сильная разница. При этом наибольшее среднее отражение также отмечается для чернозема.

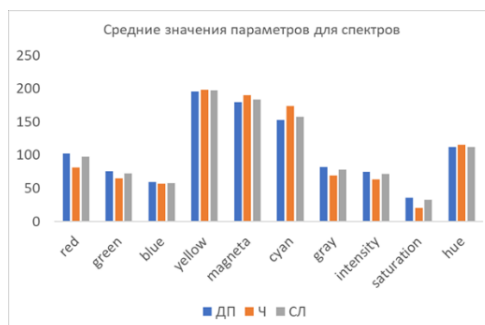
В цветовой системе YMC при анализе фото чернозем имеет в основном наименьшее среднее значение отражения, а дерново-подзолистая почва – наибольшее, за исключением канала MAGNETA, в котором наименьшим средним отражением характеризуется серая лесная почва. При анализе спектров в канале YELLOW все три анализируемых типа почв характеризуются близким отражением, в остальных каналах системы YMC выщелоченный чернозем имеет наибольшее среднее значение отражения, а среднее отражение дерново-подзолистой и серой лесной почвы практически одинаковое.

В цветовой системе HSI при анализе спектров чернозем характеризуется наименьшим значением среднего отражения в каналах INTENSITY и SATURATION, в то время как дерново-подзолистая и серая лесная почвы имеют близкие значения отражения. В канале HUE анализируемые типы почв имеют близкие средние значения отражения. Что касается фото, в каналах INTENSITY и HUE чернозем характеризуется наибольшим средним отражением, а дерново-подзолистая почва – наименьшим. В канале SATURATION отмечаются те же закономерности, что и в случае спектров.

а)



б)



в)



Рис. 1. Средние значения параметров в разных цветовых системах для разных типов почв: ДП – дерново-подзолистая почва, СЛ – серая лесная почва, Ч – чернозем. По оси ОУ – значения отражения.

Fig. 1. Average values of parameters in different color systems for different soil types: ДП – sod-podzolic soil, СЛ – grey forest soil, Ч – leached chernozem. Along OY axe – spectral reflectance values.

Дисперсионный анализ показал, что статистически значимо СОС анализируемых типов почв различается в канале BLUE цветовой системы RGB, в канале YELLOW цветовой системы YMC и каналах HUE и SATURATION системы HSI (табл. 2).

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа по оценке влияния типа почв на их СОС в разных цветовых системах

Table 2. Results of analysis of variance on the assessment of the influence of soil type on their spectral reflectance in different color systems

Параметры отражения	Df	Sum_sq	Mean_sq	F	p-value
RED	2	562	281.1	0.445	0.642
GREEN	2	1 965	982.4	1.483	0.232
BLUE	2	6 695	3347	5.762	0.004
YELLOW	2	6 578	3289	5.578	0.005
MAGNETA	2	1 240	620.2	0.798	0.453
CYAN	2	470	235.2	0.372	0.69
HUE	2	11 263	5631	6.458	0.023
SATURATION	2	5 162	2581	51.46	<0.0001
INTENSITY	2	1 221	610.4	1.09	0.34
GRAY	2	1 063	531.3	0.852	0.429

Примечание. Df – число степеней свободы; Sum_sq – сумма квадратов (разница между средним значением для группы и общим средним); Mean_sq – среднее значение суммы квадратов, вычисленное делением суммы квадратов на степень свободы для каждого параметра; F – статистика теста из F-теста; p-value – уровень статистической значимости F-статистики.

Note. Df – degrees of freedom; Sum_sq – sum of squares (the difference between group and total means); Mean_sq – mean sum of squares, calculated as a ratio of sum of squares to the degrees of freedom for each parameter; F – statistics for F-test; p-value – the level of statistical significance for F-statistics.

Апостериорный тест показал, что в случае отражения в канале BLUE системы RGB и отражения в канале YELLOW цветовой системы YMC статистически значимые различия наблюдались между дерново-подзолистой почвой и черноземом (p-value 0.01 в обоих случаях) и между черноземом и серой лесной почвой (p-

value 0.004 и 0.005 соответственно), в то время как серая лесная и дерново-подзолистые почвы не различались между собой (p-value 0.94 и 0.95 соответственно).

В случае отражения в канале HUE цветовой системы HSI статистически значимые различия наблюдались между дерново-подзолистой почвой и черноземом (p-value 0.04) и между дерново-подзолистой и серой лесной почвой (p-value 0.003), в то время как чернозем и серые лесные почвы не различались между собой (p-value 0.98).

Для канала SATURATION цветовой системы HSI наблюдались те же закономерности, что и в случае отражения в канале BLUE системы RGB и отражения в канале YELLOW цветовой системы YMC. Статистически значимые различия наблюдались между дерново-подзолистой почвой и черноземом (p-value < 0.0001) и между черноземом и серой лесной почвой (p-value < 0.0001), в то время как серая лесная и дерново-подзолистые почвы не различались между собой (p-value 0.05).

Определение типа почв на основе их СОС в разных цветовых системах с помощью дерева классификации

Для разделения дерново-подзолистой почвы и чернозема информативным оказалось отношение SATURATION/HUE. Классификация осуществляется за один шаг: в случае если данное отношение меньше 0.26, то почвы относят к черноземам; если больше или равно – к дерново-подзолистым. По результатам валидации точность классификации составила 100%.

Для разделения чернозема и серой лесной почвы информативным было соотношение YELLOW/MAGNETA. Классификация осуществляется за один шаг: в случае если данное соотношение меньше 1.035, то почвы относят к черноземам, если больше – к серым лесным.

По результатам валидации точность классификации составила 89.5% – две точки с серой лесной почвой были ошибочно отнесены к черноземам (табл. 3).

Таблица 3. Матрица ошибок по результатам валидации для дерева классификации для чернозема и серой лесной почвы

Table 3. Error matrix based on validation results for the classification tree for chernozem and gray forest soil

		Предсказанные	
		Ч	СЛ
Наблюдаемые	Ч	4	2
	СЛ	0	13

Для разделения серой лесной и дерново-подзолистой почвы информативными оказались два параметра: отражение в канале RED и соотношение MAGNETA/HUE. Классификация осуществляется в два шага. Сначала используется соотношение MAGNETA/HUE. В случае если оно меньше 1.55, то почва классифицируется как серая лесная, если больше или равно 1.55, то классификация продолжается дальше на основе отражения в канале RED. Если оно больше или равно 83.5, то почву относят к дерново-подзолистой, если меньше – к серой лесной.

Точность классификации по результатам валидации составила 71% (табл. 4). Ошибки возникают на обоих этапах классификации. На первом шаге при анализе соотношения MAGNETA/HUE три точки с дерново-подзолистой почвой были ошибочно отнесены к серой лесной почве. Все ошибки сделаны при классификации спектров. На втором этапе при анализе параметра RED четыре точки с серой лесной почвой были ошибочно отнесены к дерново-подзолистой: из них три ошибки возникли при классификации спектров, и одна – при классификации фото.

Для разделения трех типов почв информативными оказались четыре параметра: соотношение SATURATION/HUE, RED, RED/GREEN и CYAN/HUE. Полученное дерево классификации на первом шаге использует соотношение SATURATION/HUE (рис. 2). В случае если данное соотношение <0.25 , для дальнейшего разделения используется параметр RED, если ≥ 0.25 – соотно-

шение CYAN/HUE. В случае если $RED \geq 94.5$, то почвы классифицируют как черноземы, если данный параметр < 94.5 , – как серые лесные. Если соотношение $CYAN/HUE < 1.3$, то почвы также классифицируют как серые лесные, если оно ≥ 1.3 , то для дальнейшего разделения используется параметр $RED/GREEN$. Если он больше 1.4, то почвы классифицируются как серые лесные, если меньше – как дерново-подзолистые.

Таблица 4. Матрица ошибок по результатам валидации для дерева классификации для дерново-подзолистой и серой лесной почвы

Table 4. Error matrix based on validation results for the classification tree for sod-podzolic and gray forest soil

		Предсказанные	
		ДП	СЛ
Наблюдаемые	ДП	8	3
	СЛ	4	9

Точность классификации по результатам валидации составила 63% (табл. 5). Пять точек с серой лесной почвой (три фото и два спектра) были классифицированы как дерново-подзолистые, а три точки с дерново-подзолистой почвой (спектры) были классифицированы как серая лесная почва. Кроме того, три точки с черноземом (спектры) были ошибочно отнесены к серой лесной почве. Таким образом, черноземы и дерново-подзолистые почвы разделяются без ошибок, как и в случае построения дерева классификации только для этих двух типов почв. В то же время в процессе классификации серая лесная почва смешивается с дерново-подзолистой, а дерново-подзолистая и чернозем – смешиваются с серой лесной.

Таким образом, при построении деревьев классификации для двух (в разных комбинациях) или всех трех анализируемых типов почв чаще всего использовался параметр HUE цветовой системы HSI в составе разных спектральных отношений.

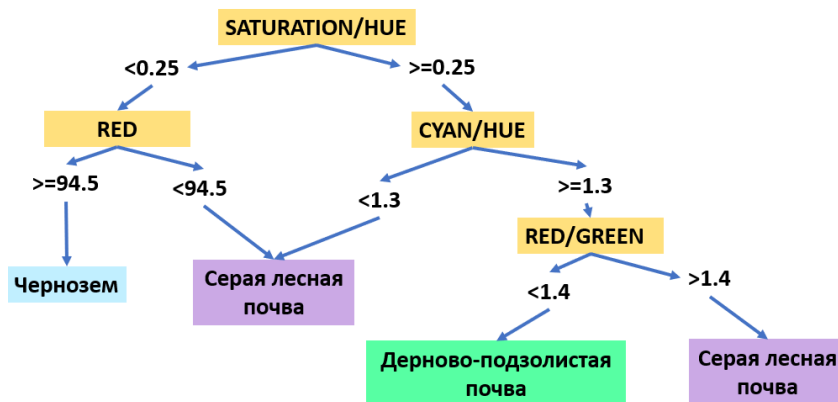


Рис. 2. Дерево классификации для разделения трех анализируемых типов почв на основе рассчитанных параметров отражения в разных цветовых системах.

Fig. 2. Classification tree for three analysed soil types based on spectral parameters in different color systems.

Таблица 5. Матрица ошибок по результатам валидации для дерева классификации для анализируемых типов почв

Table 5. Error matrix based on validation results for the classification tree for analysed soil types

		Предсказанные		
		ДП	Ч	СЛ
Наблюдаемые	ДП	8	0	3
	ДП	0	3	3
	ДП	5	0	8

По значениям данного параметра между собой статистически достоверно различаются дерново-подзолистые и черноземы, а также дерново-подзолистые и серые лесные (табл. 2). Спектральное отношение SATURATION/HUE оказалось информативным для двух деревьев из четырех построенных: для разделения чернозема и дерново-подзолистой почвы и для разделения всех анализируемых типов почв. По значениям параметра SATURATION достоверно различаются между собой дерново-подзолистые почвы и черноземы, а также черноземы и серые лесные почвы. Таким образом, чаще всего в процессе классификации использовались именно параметры цветовой системы HSI (кроме INTENSITY).

На втором месте по частоте использования параметры цветовой системы YMC (спектральное отношение YELLOW/MAGNETA), в том числе в сочетании с параметром HUE цветовой системы HSI (спектральные отношения MAGNETA/HUE, CYAN/HUE). При этом статистически значимые отличия между анализируемыми типами почв (дерново-подзолистыми почвами и черноземами, черноземами и серыми лесными) среди параметров цветовой системы YMC отмечались только для параметра YELLOW.

Параметры цветовой системы RGB использовались при классификации реже всего, из них чаще всего использовалось отражение в канале RED: в двух случаях как отдельный параметр, и в одном случае в составе спектрального отношения RED/GREEN. При этом ни для параметра RED, ни для параметра GREEN не отмечалось статистически достоверных различий между анализируемыми типами почв. Данные параметры использовались в деревьях классификации на втором или третьем шаге классификации.

Параметры цветовых систем HSI и YMC оказались более информативными для разделения анализируемых типов почв, по сравнению с параметрами цветовой системы RGB, которые в основном и используются для оценки почв по фотографиям их поверхности. При этом следует отметить, что параметры цветовых систем HSI и YMC рассчитываются на основе параметров цветовой системы RGB (формулы 1–7), то есть являются ее производными. Таким образом, осуществляемые математические преобразования значений отражения в каналах RED, GREEN и BLUE для

получения значения параметров в других цветовых системах, а также последующий расчет спектральных отношений позволили усилить разницу в спектральных характеристиках между анализируемыми типами почв и тем самым повысить их информативность для дальнейшей классификации.

Точность детектирования почв, по-видимому, можно повысить и путем задания строгих условий съемки (например, снимать только в надир, только с высоты 1 метр, только в полдень, только на фотокамеру с широкоформатным объективом и т. п.). Но это сделает сбор подобных данных более ограниченным и не позволит включать в анализ фотографии, полученные в прошлые годы и в других странах мира.

ВЫВОДЫ

На данном этапе разработки предлагаемый подход к распознаванию пахотных почв на основе краудсорсинговых данных позволяет определять типовую принадлежность почв по изображениям их поверхности с точностью 63–100%.

Информативными параметрами для классификации могут выступать такие параметры как соотношения SATURATION/HUE, YELLOW/MAGNETA, CYAN/HUE, MAGNETA/HUE, RED/GREEN и отражение в канале RED.

Лучше всего разделяются дерново-подзолистая почва и чернозем, достаточно высока точность классификации и при разделении чернозема и серой лесной почвы. Наименее точная классификация отмечается при разделении трех типов почв. При этом чаще всего серые лесные почвы смешиваются с дерново-подзолистыми.

Привлечение большего количества фотографий и определение наиболее благоприятных для классификации условий съемки, а также фиксирование типа камеры и условий съемки, скорее всего, позволят повысить точность разделения почв различных типов.

Установленные правила классификации в дальнейшем могут применяться для определения классификационного положения почв по изображениям, собранным с помощью краудсорсинговых технологий. Полученная при этом информация может быть использована для обновления почвенных карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.
2. Chen F., Kissel D.E., West L.T., Adkins W. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery // Soil Science Society of America Journal. 2000. Vol. 64. No. 2. P. 746–753.
3. Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., Nic Daeid N. Using the iPhone as a device for a rapid quantitative analysis of trinitrotoluene in soil // Talanta. 2013. Vol. 115. P. 143–149.
4. Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Yu Z., Cui Y. Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China // Geoderma. 2019. Vol. 356. P. 113896.
5. Han P., Dong D., Zhao X., Jiao L., Lang, Y. A smartphone-based soil color sensor: For soil type classification // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 123. P. 232–241.
6. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26. P. 5475–5492.
7. Persson M. Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis // Vadose Zone Journal. 2005. Vol. 4. P. 1119–1122.
8. Prudnikova E., Savin I. Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 2313.
9. Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Puzachenko M.Yu., Kozlov D.N. Soil structure analysis with the use of digital color images // Eurasian Soil Science. 2004. Vol. 37. No. 2. P. 109–121.
10. Rossel R.V., Fouad Y., Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents // Biosystems Engineering. 2008. Vol. 100. P. 149–159.
11. Rossel R.V., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // Geoderma. 2006. Vol. 131. No. 1–2. P. 59–75.
12. Xu L., Zheng C., Wang Z., Nyongesah M.J. A digital camera as an alternative tool for estimating soil salinity and soil surface roughness // Geoderma. 2019. Vol. 341. P. 68–75.
13. Zhang Y., Hartemink A.E. A method for automated soil horizon delineation using digital images // Geoderma. 2019. Vol. 343. P. 97–115.

REFERENCES

1. Savin I. Yu., Simakova M. S., Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for inventory and monitoring of soils in Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.
2. Chen F., Kissel D.E., West L.T., Adkins W., Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery, *Soil Science Society of America Journal*, 2000, Vol. 64, No. 2, pp. 746–753.
3. Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., Nic Daeid N., Using the iPhone as a device for a rapid quantitative analysis of trinitrotoluene in soil, *Talanta*, 2013, Vol. 115, pp. 143–149.
4. Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Yu Z., Cui Y., Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China, *Geoderma*, 2019, Vol. 356, p. 113896.
5. Han P., Dong D., Zhao X., Jiao L., Lang, Y., A smartphone-based soil color sensor: For soil type classification, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, Vol. 123, pp. 232–241.
6. Levin N., Ben-Dor E., Singer A., A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments, *International Journal of Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, pp. 5475–5492.
7. Persson M., Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis, *Vadose Zone Journal*, 2005, Vol. 4, pp. 1119–1122.
8. Prudnikova E., Savin I., Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 12, p. 2313.
9. Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Puzachenko M.Yu., Kozlov D.N., Soil structure analysis with the use of digital color images, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 2, pp. 109–121.
10. Rossel R.V., Fouad Y., Walter C., Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents, *Biosystems Engineering*, 2008, Vol. 100, pp. 149–159.
11. Rossel R. V., Walvoort D. J. J., McBratney A. B., Janik L. J., Skjemstad J. O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, No. 1–2, pp. 59–75.
12. Xu L., Zheng C., Wang Z., Nyongesah M.J., A digital camera as an alternative tool for estimating soil salinity and soil surface roughness, *Geoderma*, 2019, Vol. 341, pp. 68–75.
13. Zhang Y., Hartemink A.E., A method for automated soil horizon delineation using digital images, *Geoderma*, 2019, Vol. 343, pp. 97–115.

УДК 631.417.2:631.445.24

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-97-115



Ссылки для цитирования:

Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р., Шляпина Я.В. Характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы при длительном воздействии разных систем удобрения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 97-115. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-97-115

Cite this article as:

Zavyalova N.E., Vasbieva M.T., Yamaltdinova V.R., Shlyapina Ya.V., Characteristics of humic acids in sod-podzolic soil under long-term exposure to different fertilization systems, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 97-115, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-97-115

Характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы при длительном воздействии разных систем удобрения

© 2022 г. Н. Е. Завьялова*, М. Т. Васбиева,
В. Р. Ямалтдинова, Я. В. Шляпина**

*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
614532, Пермский край, Пермский район,
с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия,*

** <https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com,*

*** <https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbievamt15@gmail.com.*

*Поступила в редакцию 05.03.2022, после доработки 25.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022*

Резюме: В условиях длительного стационарного опыта изучены элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения. Минеральные удобрения способствовали формированию гуминовых кислот с повышенным содержанием алифатических компонентов, отношением Н : С = 1.45 и высокой степенью окисленности (ω = 0.41). Низкое содержание азота в гуминовых кислотах (от 2.0 до 2.6 ат. %), при различных системах удобрения связано, прежде всего, с его низким содержанием в растительной биомассе возделываемых в севообороте

культур. Органическая система удобрения привела к обогащению структурных агрегатов гуминовых кислот ароматическими группами и азотом. Высокая интенсивность поглощения группы $>C=O$ карбоновых кислот в области 1717 см^{-1} и двойных связей углеродных атомов при 1627 см^{-1} подтверждает это положение. Наибольшее количество карбоксильных групп в своем составе имеют гуминовые кислоты варианта “навоз 10 т/га” и “навоз 5 т/га + экв. NPK”. Наиболее слабо колебания группы $>C=O$ карбоновых кислот выражены в гуминовых кислотах почвы при минеральной системе удобрения. Варианты с органоминеральной системой удобрения занимают промежуточное положение по содержанию в гуминовых кислотах основных конституционных элементов. По данным термографического анализа при длительном применении минеральных удобрений отношение потери массы в низкотемпературной области к потере массы в высокотемпературной области (Z) около 0,9, т. е. в структуре гуминовых кислот увеличивается доля компонентов алифатической природы, по сравнению с таковой в неудобренной или унавоженной почвой.

Ключевые слова: минеральные и органические удобрения, элементный состав гуминовых кислот, инфракрасные спектры, термогравиметрия.

Characteristics of humic acids in sod-podzolic soil under long-term exposure to different fertilization systems

© 2022 N. E. Zavyalova*, M. T. Vashieva,
V. R. Yamaltdinova, Ya. V. Shlyapina

Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,
12 Kul'tury Str., Lobanovo village, Permskii raion,
Permskii krai 614532, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbievamt15@gmail.com.

Received 05.03.2022, Revised 25.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The elemental composition and structure of humic acids in the soddy-podzolic heavy loamy soil of the Cis-Urals were studied during long-term application of organic, mineral and organo-mineral fertilizers under conditions of a long-term stationary experiment. Mineral fertilizers contributed to the formation of humic acids with increased content of aliphatic components, the ratio $H : C = 1.45$ and a high degree of oxidation ($\omega = 0.41$). The low content of nitrogen in humic acids (from 2.0 to 2.6 at.%), with

various fertilizer systems, is primarily due to its low content in the plant biomass of crops cultivated in crop rotation. The organic fertilizer system resulted in the enrichment of the structural aggregates of humic acids with aromatic groups and nitrogen. The high intensity of absorption of the $>C=O$ group of carboxylic acids in the region of 1717 cm^{-1} and double bonds of carbon atoms at 1627 cm^{-1} confirms this position. Humic acids of the “manure 10 t/ha” and “manure 5 t/ha + equiv. NPK” have the largest number of carboxyl groups in their composition. The vibrations of the $>C=O$ group of carboxylic acids are most weakly expressed in soil humic acids with a mineral fertilizer system. Organo-mineral fertilizer system demonstrates intermediate results in terms of the content of the main constitutional elements in humic acids. Mineral fertilizers application reduces the amount and thermal stability of the structural components of humic acids, thereby contributing to the degradation of the most stable part of macromolecule, which can lead to the loss of potential soil fertility. The use of mineral fertilizers on sod-podzolic heavy loamy soil led to the enrichment of humic acids with aliphatic fragments, and of organic ones – increased the content of stable components of aromatic nature, but lowered their thermal stability. According to thermogravimetric analysis the ratio of weight loss in the low-temperature zone and the weight loss in the high-temperature zone (Z) during long-term use of mineral fertilizers is 0.9, i. e. the proportion of components of aliphatic nature in the structure of humic acids increases in comparison with unfertilized or manure fertilized soil.

Keywords: mineral and organic fertilizers, elemental composition, infrared spectra, thermogravimetry.

ВВЕДЕНИЕ

По классической теории гумусообразования гуминовые вещества – это сложные природные соединения, образующиеся в процессе разложения и трансформации растительных остатков и остатков животного происхождения с образованием более устойчивых к биологическому разложению соединений ([Орлов, 1990](#)). Почвенные гуминовые вещества (ГВ) участвуют почти во всех биогеохимических процессах и функциях почв, поэтому их характеристика очень важна ([Mohinuzzaman et al., 2020](#)). Их изучение может помочь решить важные научные и практические вопросы современного земледелия. Несмотря на длительный период изучения ГВ, их структура до сих пор рассматривается только гипотетически, дискуссия об их природе продолжается. Гуминовые ве-

щества – это гетерополимеры с ароматической центральной частью и совокупностью алифатических компонентов, образующих периферическую часть или супрамолекулярные ассамблеи (Иванов и др., 2017). По новой концепции ГВ представляют собой “супрамолекулярные ассоциации самособирающихся гетерогенных и относительно небольших молекул, образующихся в результате деградации и разложения мертвого биологического материала” (Baveye, Wander, 2019; Kleber et al., 2007). Эти органические фрагменты “непрерывно перерабатываются сообществом редуцентов в сторону меньшего размера молекул” (Kleber, Lehmann, 2019). Однако выдвинутая теория не дает достаточных оснований для окончательного решения вопроса об образовании, строении и свойствах и о самом существовании ГВ как отдельного класса природных соединений (Olk et al., 2019). Исследователи Русской школы почвоведов работают в основном в разрезе макромолекулярной природы ГВ, считая их важнейшим компонентом органического вещества почв. Чтобы изучить структуру и функциональные свойства органического вещества почвы, почвоведы уже более 200 лет проводят экстракцию щелочью фракций гуминовых и фульвокислот почвы (Olk et al., 2019). Среди компонентов органического вещества гуминовые кислоты характеризуются наибольшей биологической устойчивостью. Их состав и структура зависят от условий почвообразования и изменяются при антропогенном воздействии на почву (Орлов, 1974; Stepanov, 2008). ГВ являются устойчивыми почвенными образованиями, изменение их структурного состояния наблюдается только при длительном воздействии на почву антропогенных факторов, в частности удобрений. Длительные стационарные опыты являются своеобразным полигоном для изучения влияния органических и минеральных удобрений на органическое вещество почвы. В Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН имеются полевые опыты длительностью 45–54 года, которые заложены на дерново-подзолистой почве, составляющей около 70% площадей пашни в регионе исследования. Для изучения состава и структуры гуминовых кислот наиболее доступными и информативными на сегодняшний день являются методы элементного анализа, инфракрасной спектроскопии и термографического анализа, позволяющие не только

подтвердить принадлежность изучаемых почвенных образований к классу гуминовых кислот, но и дать информацию об их строении и свойствах.

Цель работы – выявить влияние минеральной, органической и органоминеральной систем удобрения почвы на структуру и свойства гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на препаратах гуминовых кислот (ГК), выделенных из дерново-подзолистой почвы (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) длительного стационарного опыта, заложенного в 1971 г. на опытном поле Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН. Использовали почвенные образцы пахотного (0–20 см) слоя, отобранные в конце шестой ротации севооборота после уборки овса в следующих вариантах: 1 – без удобрений (контроль); 2 – навоз 10 т/га в год; 3 – NPK эквивалентно 10 т/га навоза; 4 – навоз 5 т/га + NPK эквивалентно 5 т/га навоза; 5 – навоз 10 т/га + NPK эквивалентно 10 т/га навоза. Севооборот восьмипольный: чистый пар, озимая рожь, пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го года пользования, клевер 2-го года пользования, ячмень, картофель, овес. Навоз КРС вносили в севообороте в два приема: под рожь и картофель. Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли, в зависимости от количества, под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последствие. За пять ротаций севооборота с навозом при насыщенности пашни 10 т/га в год в почву поступило N – 1 400, P – 950, K – 2 070 кг/га ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год). Солома в опыте после уборки отчуждалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевины, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый.

Агрохимические свойства изучаемой дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных систем удобрения изложены ранее ([Ямалтдинова и др., 2020](#)). Препаративное выделение ГК осуществляли 3-кратным экстрагированием 0.1 н раствором NaOH из декальцированной почвы. Для очистки от илистой фракции применяли коагулятор Na_2SO_4 и центрифугирова-

ние. Из раствора ГВ, очищенного от минеральных примесей, ГК осаждали подкислением 10%-ым раствором HCl до pH 2–3. Для дальнейшей очистки препаратов проводили их двухкратное пересаживание. Повторность выделений препаратов двухкратная. Препараты высушивали при температуре 40 °С. Элементный состав ГК определяли на CHN – элементном анализаторе фирмы “Perkin – Elmer” (США), количество кислорода вычисляли по разности (все расчеты приведены на обеззоленную и безводную навеску, зольность препаратов составляла 8–12%). Повторность определения структурных элементов ГК –шестикратная. ИК-спектры поглощения регистрировали на Фурье-спектрометре VERTEX-80v (фирмы “Bruker”, Германия) в диапазоне 4 000–400 см⁻¹ при спектральном разрешении 2 см⁻¹. Обработку спектров проводили с помощью пакета прикладных программ OPUS. Термический анализ препаратов гуминовых кислот проводили на приборе Q1500Д (производство ВНР). Вес навески образца 40–50 мг. Скорость поднятия температуры 10°С/мин. В качестве эталона использовали прокаленный оксид Al (Al₂O₃). Анализ проводили в интервале от комнатной температуры до 1000°С. Повторность снятия ИК-спектров и кривых дифференциального термического анализа – трехкратная. Коэффициент Z рассчитывали как отношение потери массы вещества в низкомолекулярной области к потере массы в высокомолекулярной области ([Шевцова и др., 2020](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гуминовые кислоты (ГК) выделены из дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы с низким содержанием гумуса (2.08–2.34%) и общего азота (0.12–0.16%), pH_{KCl} 4.7–5.2, в зависимости от вариантов опыта. Слабокислой реакцией среды (pH_{KCl} 5.2) и максимальным содержанием гумуса характеризовалась почва варианта “навоз 10 т/га”.

Для изучения строения ГК, наличия в их составе основных конституционных элементов и направления трансформации органического вещества под действием различных систем удобрения нами использован метод элементного анализа.

Длительное применение органических удобрений (насыщенность пашни навозом по 10 т/га в год) способствовало форми-

рованию ГК с повышенным содержанием ароматических структурных фрагментов с более высоким содержанием углерода (36.9 ат. %), чем в других вариантах длительного опыта (табл. 1). Для этого варианта выявлено более низкое значение отношения $N : C$, которое составило 1.07, и минимальная степень окисленности структурных фрагментов ($\omega = 0.05$) (рис. 1). В унавоженной почве агрегаты ГК более обогащены азотом, атомное отношение $C : N$ минимально и составляет 13.9.

При минеральной системе удобрения (NPK экв. 10 т навоза) ГК характеризуются низким содержанием углерода и повышенным – водорода, структурой со значительно большим количеством алифатических групп, отношение $N : C$ составляет 1.45, степень окисленности – 0.07.

ГК варианта без удобрений наиболее окислены ($\omega = 0.41$), слабо обуглерожены (30.4 ат. %), характеризуются невысоким содержанием азота (2.1 ат. %). Отношение $N : C$ равное 1.34 указывает на преобладание алифатических фрагментов в структуре ГК этого варианта.

Низкое содержание азота в ГК при различных системах удобрения, которое изменяется от 2.0 до 2.6 ат. %, связано, прежде всего, с его низким содержанием в растительной биомассе и условиями ее трансформации в почве в климатических условиях Предуралья. В почву поступают в основном пожнивно-корневые остатки зерновых культур, обедненные азотом и другими элементами питания, доля многолетних бобовых трав не превышает 25%, при этом травостой отчуждается. Дерново-подзолистые почвы Предуралья характеризуются низкой биологической активностью, кислой реакцией среды и другими неблагоприятными факторами гумусообразования ([Завьялова и др., 2020](#)).

Варианты с органоминеральной системой удобрения занимают промежуточное положение по содержанию основных конституционных элементов, составляющих ГК, трансформация органического вещества протекает в направлении образования ГК с преобладанием в их структуре группировок, обогащенных атомами водорода, атомное отношение $N : C$ варьирует в интервале 1.29–1.36.

Таблица 1. Элементный состав гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы

Table 1. The elemental composition of humic acids in sod-podzolic soil

Вариант	Содержание, %					Атомные отношения			Степень окисленности, (ω)
	С	Н	О	N	S	Н : С	О : С	С : N	
Контроль (без удобрений)	<u>42.0</u> 30.4	<u>4.7</u> 40.6	<u>48.9</u> 26.6	<u>3.4</u> 2.1	<u>1.0</u> 0.3	1.34	0.87	14.3	0.41
Навоз 10 т/га	<u>51.7</u> 36.9	<u>4.6</u> 39.5	<u>38.7</u> 20.7	<u>4.3</u> 2.6	<u>0.7</u> 0.2	1.07	0.56	13.9	0.05
NPK экв. 10 т навоза	<u>44.9</u> 30.5	<u>5.4</u> 44.1	<u>45.3</u> 23.1	<u>3.4</u> 2.0	<u>1.0</u> 0.2	1.45	0.76	15.3	0.07
Навоз 5 т+NPK экв. навозу	<u>46.0</u> 32.3	<u>5.0</u> 41.8	<u>45.1</u> 23.7	<u>3.4</u> 2.0	<u>0.5</u> 0.1	1.29	0.74	15.8	0.18
Навоз 10 т + NPK экв. навозу	<u>42.6</u> 30.4	<u>4.8</u> 41.2	<u>48.9</u> 26.2	<u>3.2</u> 2.0	<u>0.5</u> 0.1	1.36	0.86	15.6	0.37

Примечание. Над чертой – массовая доля, под чертой – атомная доля (все расчеты приведены на обеззоленные безводные препараты).

Note. Mass fraction above the line, atomic fraction below the line (all calculations are performed for anhydrous ash-free preparations).

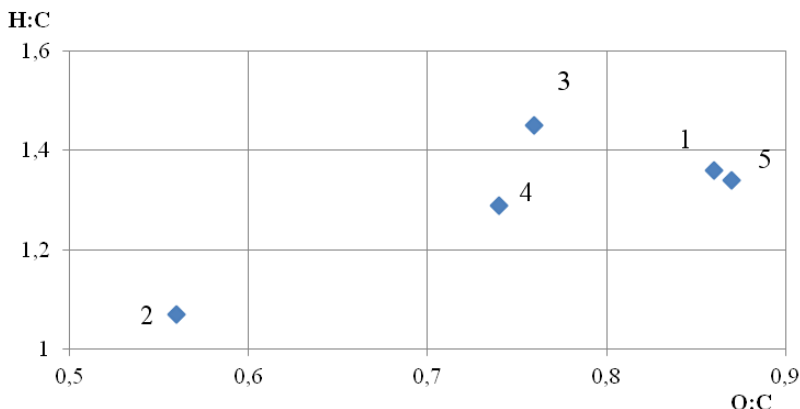


Рис. 1. Диаграмма атомных отношений ГК дерново-подзолистой почвы в длительном опыте: 1 – контроль (без удобрений), 2 – навоз 10 т/га, 3 – NPK экв. 10 т навоза, 4 – навоз 5 т/га + экв. NPK, 5 – навоз 10 т/га + экв. NPK.

Fig. 1. Diagram of atomic ratios of humic acids in sod-podzolic soil in long-term experiment: 1 – control (without fertilizer); 2 – 10 t/ha manure; 3 – NPK eq. 10 t manure; 4 – 5 t/ha + NPK eq.

Метод инфракрасной спектроскопии позволяет идентифицировать атомные группировки, дает информацию о типе связей и элементах структуры ГК ([Орлов, 1990](#); [Старых и др., 2019](#); [Шевцова и др., 2019](#)). ГК почвы длительного стационарного опыта имеют полосы поглощения в диапазоне длины волны от 500 до 3 500 см^{-1} (рис. 2). Изучаемые системы удобрения оказали слабое влияние на наличие наиболее характерных атомных группировок и интенсивность полос их поглощения. Полоса поглощения при 3 436–3 465 см^{-1} обусловлена валентными колебаниями групп OH, связанных межмолекулярными водородными связями. Поглощение в данной области максимально для ГК варианта “навоз 10 т/га”, минимально для почвы контрольного варианта.

На ИК-спектрах полосы поглощения в области 2 927 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями C–H метильных (CH_3) и метиленовых (CH_2) группировок.

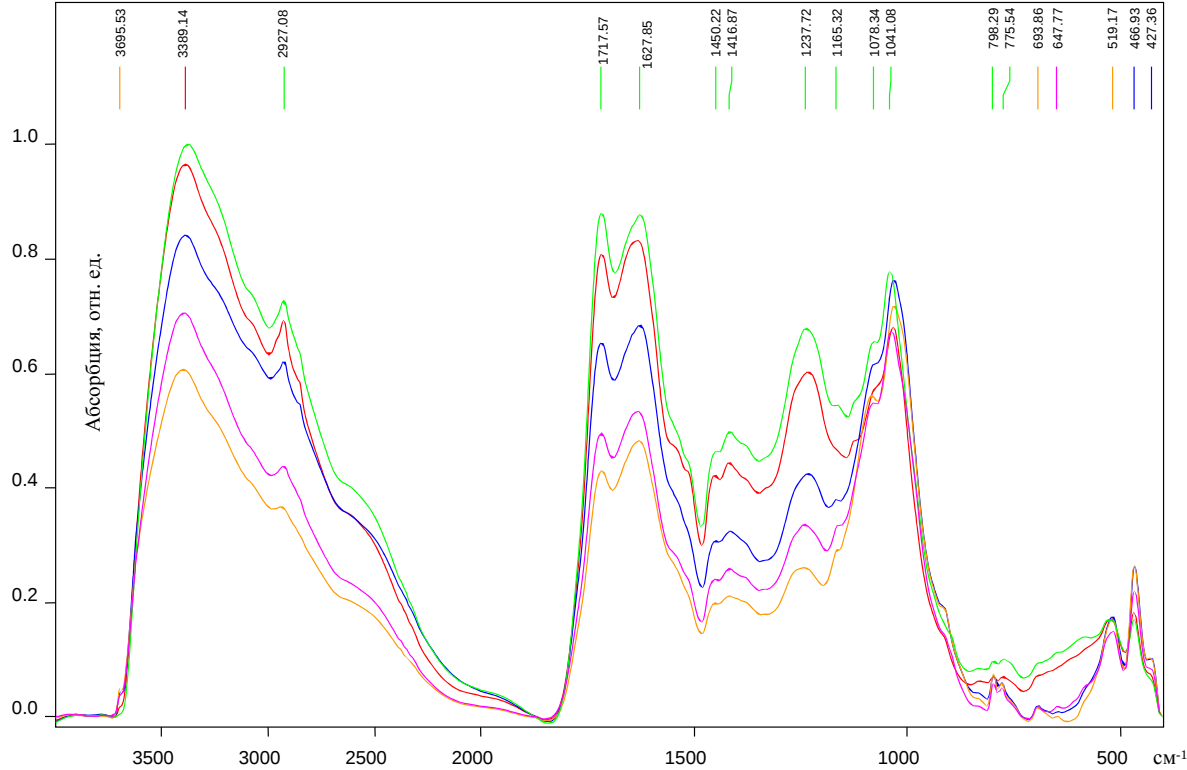


Рис. 2. Инфракрасные спектры гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы. Синий – контроль (без удобрений), красный – навоз 10 т/га, розовый – NPK экв. 10 т навоза, зеленый – навоз 5 т/га + экв. NPK, коричневый – навоз 10 т/га + экв. NPK.

Fig. 2. Infrared spectra of humic acids of sod-podzolic soil. Blue colour – control (no fertiliser); red – 10 t/ha manure; pink – NPK eq. 10 t of manure; green – 5 t/ha + NPK eq.; brown – 10 t/ha + NPK eq.

Наиболее интенсивно эти полосы проявились в спектрах ГК вариантов “навоз 10 т/га” и “навоз 5 т/га + экв. NPK”, что свидетельствует о наличии в структуре этих кислот достаточного количества концевых метильных групп. Эта полоса значительно слабее в варианте “навоз 10 т/га + экв. NPK”, что может быть вызвано уменьшением в структуре ГК содержания метильных и метиленовых группировок в результате деструкции органического вещества. Наличие вышеуказанных групп подтверждено деформационными колебаниями связи C–H в группах CH_2 в области $1450\text{--}1416\text{ см}^{-1}$.

В области волновых чисел $1717\text{--}1627\text{ см}^{-1}$ четко проявляются полосы поглощения, присутствующие у препаратов ГК всех изучаемых вариантов опыта. Они могут быть обусловлены наличием карбоксилат-ионов и деформационными колебаниями NH_2 амидов (полоса Амид II). Полоса 1717 см^{-1} обусловлена колебаниями группы $>\text{C}=\text{O}$ карбоновых кислот ([Орлов, 1990](#)). Судя по интенсивности этой полосы, наибольшее количество карбоксильных групп в своем составе имеют ГК варианта “навоз 10 т/га” и “навоз 5 т/га + экв. NPK”. Наиболее слабо колебания группы $>\text{C}=\text{O}$ карбоновых кислот выражены в ГК почвы при исключительно минеральной системе удобрения. На незначительное участие ароматических колец указывает полоса поглощения в области 1627 см^{-1} , которая обусловлена валентными колебаниями сопряженных двойных связей углеродных атомов ($\text{C}=\text{C}$) ароматических структур в ГК. Наиболее выражена эта полоса в ИК-спектре варианта при длительном внесении навоза и в варианте “навоз 5 т/га+экв. NPK”. Слабо проявляется данная полоса при минеральной системе удобрения и в варианте “навоз 10 т/га + экв. NPK”. В области волновых чисел $1237\text{--}500\text{ см}^{-1}$ трактовка полос поглощения доста-

точно затруднительна. В этой области могут проявляться кислородсодержащие группировки различной природы (спирты, эфиры, фенолы), то есть группы ОН. Можно предположить, что в пределах волновых чисел $1\,237\text{--}1\,000\text{ см}^{-1}$ полосы поглощения обусловлены кислородсодержащими группировками ГК. Результаты ИК-спектроскопии указывают на принадлежность исследуемых препаратов к особому классу природных соединений – гуминовым кислотам. Длительное применение органической системы удобрения дерново-подзолистой почвы сопровождалось формированием в составе макромолекул ГК большого количества ароматических групп, по сравнению с другими изучаемыми вариантами. Более высокая интенсивность поглощения группы $>\text{C}=\text{O}$ карбоновых кислот в области $1\,717\text{ см}^{-1}$ и двойных связей углеродных атомов при $1\,627\text{ см}^{-1}$ подтверждает это положение.

Результаты термографического анализа препаратов гумусовых веществ позволили условно выделить долю участия фрагментов различной термостабильности в составе ГК. В ходе пиролиза ГК происходит расщепление углеродного скелета, отщепление функциональных групп и другие превращения как исходных веществ, так и продуктов их взаимодействия ([Орлов, 1974](#)). Для количественной оценки участия структурных фрагментов разной устойчивости в построении агрегатов ГК использовали коэффициент Z – отношение потери массы вещества в низкотемпературной области к потере массы в высокотемпературной области ([Шевцова и др., 2020](#)).

Наиболее богаты температурными эффектами ГК контрольного варианта. При их термодеструкции в низкотемпературной области ($200\text{--}400\text{ °C}$) происходит разрушение трех структурных компонентов, достигающих максимальной скорости при 220 , 290 и 400 °C (табл. 2).

Здесь происходит термическое разрушение боковых алифатических цепочек, отщепление функциональных групп и частичное окисление образовавшихся продуктов, т. е. происходит разрушение структурных компонентов, входящих в состав периферической части макромолекул ГК ([Шевцова и др., 2020](#)).

Таблица 2. Термографическая характеристика гуминовых кислот

Table 2. Thermographic characteristics of humic acids

Вариант	Температура эффекта, °С Потеря массы, % от общей							Z
	адсорбционная влага	низкотемпературная область (200–400 °С)			высокотемпературная область (>400 °С)			
Контроль (без удобрений)	<u>80</u> 23.8	<u>220</u> 11.9	<u>290</u> 11.9	<u>400</u> 8.3	<u>540</u> 19.0	<u>600</u> 15.5	<u>660</u> 7.1	0.772
Навоз 10 т/га	<u>70</u> 16.7	<u>220</u> 11.1	<u>285</u> 13.9	<u>370</u> 9.7	<u>505</u> 34.7		<u>575</u> 9.7	0.782
НРК экв. 10 т навоза	<u>60</u> 18.6	<u>200</u> 8.6	<u>291</u> 14.3	<u>385</u> 11.4	<u>495</u> 40.0			0.858
Навоз 10 т + НРК экв. навозу	<u>70</u> 17.1	<u>215</u> 25.8			<u>515</u> 28.6		<u>565</u> 15.7	0.806

Разрушение структурных компонентов в высокотемпературной области также происходит в результате трех реакций, достигающих максимальной скорости при 540, 600 и 660 °С. В этой области происходит разрушение более устойчивых алифатических цепей, предположительно соединяющих между собой ароматические кольца, отщепление более устойчивых функциональных групп, а также отдельных гетероциклов и ароматических колец. Выше 600 °С может происходить деструкция конденсированной ароматики, выделение углерода и его окисление ([Орлов, 1974](#); [Шевцова и др., 2020](#)).

Отношение потери массы в низкотемпературной области к таковой в высокотемпературной (Z) = 0.77, т. е. в составе ГК данного варианта преобладают более термоустойчивые структурные компоненты, предположительно ароматической природы.

Разрушение структурных фрагментов ГК унавоженной почвы (вариант “навоз 10 т/га”) в интервале температур 200–400 °С происходит также в процессе трех реакций, но при этом наблюдается суммарное увеличение потери массы с 32.1% (вариант “без удобрений”) до 34.7% и уменьшение термостабильности наиболее термоустойчивого компонента, предположительно алифатической природы, до 370 °С.

В высокотемпературной области (>400 °С) внесение навоза также изменяет термические свойства ГК. Возрастает однородность супрамолекулярных агрегатов, фиксируется только два экзотермических эффекта. При этом суммарная потеря массы в высокотемпературной области увеличивается до 44.4%. Несмотря на эти изменения, в термических свойствах ГК под влиянием навоза отношение потерь масс в низкотемпературной и высокотемпературной областях практически не отличается от неудобряемой почвы, Z = 0.78. Унавоживание дерново-подзолистой почвы способствует обогащению ГК структурными фрагментами алифатической природы и приводит к накоплению ароматических группировок в структуре ГК.

Под влиянием минеральных удобрений в низкотемпературной области (200–400 °С) происходят такие же изменения в структуре ГК, как и в варианте “навоз 10 т/га в год”: разрушение структурных компонентов в низкотемпературной области происходит в

результате трех реакций, достигающих максимальной скорости при 200, 290 и 385 °С, – однако в высокотемпературной области (>400 °С) наблюдаются отличия. В этом интервале температур зафиксирован только один термоэффект, скорость разрушения которого достигает максимальной величины при 495 °С (потеря массы 40%). Таким образом, применение минеральных удобрений уменьшает количество и термоустойчивость структурных компонентов ГК, способствуя тем самым деградации их наиболее устойчивой части, что может привести к потере потенциального плодородия почвы. Показатель Z равен 0.86, т. е. в структуре ГК увеличивается доля компонентов алифатической природы, по сравнению с неудобренной или унавоженной почвой.

Иной характер термодеструкции наблюдается для ГК почвы варианта “навоз 10 т/га + NPK экв. 10 т/га навоза”. В низкотемпературной области проявляется только одна термическая реакция, достигающая максимальной скорости при 215 °С. Это свидетельствует о том, что алифатические структурные фрагменты представлены близкими по термоустойчивости компонентами. Более стабильная часть молекул ГК состоит из двух групп компонентов, которые по содержанию и термоустойчивости близки к таковым в ГК варианта “навоз 10 т/га”. Низкая термостабильность структурных агрегатов способствует более высокой биологической и химической активности гумусовых соединений, т. е. повышению эффективного плодородия почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низкое качество растительной биомассы, поступающей в почву, тяжелый гранулометрический состав, кислая реакция среды, промывной водный режим, низкая биологическая активность и другие факторы способствовали образованию ГК с высокой долей алифатических фрагментов, обедненных углеродом и азотом. Длительное применение органической системы удобрения дерново-подзолистой почвы сопровождалось формированием ГК с более высоким содержанием углерода, узким соотношением Н : С (1.07), что свидетельствует о наличии в составе макромолекул ГК большого количества ароматических групп, по сравнению с другими изучаемыми вариантами. Высокая интенсивность поглоще-

ния группы $>C=O$ карбоновых кислот в области $1\,717\text{ см}^{-1}$ и двойных связей углеродных атомов при $1\,627\text{ см}^{-1}$ подтверждает это положение. По данным элементного анализа и ИК-спектроскопии минеральная система удобрения привела к образованию ГК с преобладанием структурных фрагментов алифатической природы, отношение $H : C$ составляет 1.45, интенсивность колебания группы $>C=O$ карбоновых кислот и группы $C=C$ ароматических структур в спектрах варианта “НРК экв. 10 т навоза” минимальна. Результаты дифференциально-термического анализа препаратов гумусовых веществ также позволяют заключить, что применение минеральных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве привело к обогащению гуминовых кислот алифатическими фрагментами, а органических – увеличило содержание стабильных компонентов ароматической природы, но понизило их термостабильность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялова Н.Е., Широких И.Г., Ямалудинова В.Р. Микробиологическое состояние дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении органических и минеральных удобрений // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 151–159. DOI: [10.25750/1995-4301-2020-1-151-159](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-151-159).
2. Иванов А.Л., Козут Б.М., Семенов В.М., Тюрина Оберландер М., Ваксман Шанбахер Н. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 3–38. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-3-38](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38).
3. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
4. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1974. 333 с.
5. Старых С.Э., Куприянов А.Н., Белопухов С.Л., Мазиров М.А. Изучение влияния длительного применения удобрений на органическое вещество дерново-подзолистой почвы методом ИК-спектроскопии // Агрохимический вестник. 2019. № 2. С. 17–22. DOI: [10.24411/0235-2516-2019-109999021](https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-109999021).
6. Шевцова Л.К., Черников В.А., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Термическая характеристика и применение пиролитической масс-спектрометрии для исследования изменений свойств и структуры гуминовых кислот почв под влиянием удобрений.

Сообщение 2 // Агрохимия. 2020. № 11. С. 3–13. DOI: [10.31857/S0002188120110095](https://doi.org/10.31857/S0002188120110095).

7. Шевцова Л.К., Черников В.В., Сычев В.Г., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 // Агрохимия. 2019. № 10. С. 3–15. DOI: [10.1134/S0002188119100120](https://doi.org/10.1134/S0002188119100120).

8. Ямалтдинова В.Р., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Влияние систем удобрений на агрохимические показатели и накопление тяжелых металлов в почве и яровой пшенице (*Triticum Aestivum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. 2020. № 3. С. 39–43. DOI: [10.26178/AE.2020.78.61.004](https://doi.org/10.26178/AE.2020.78.61.004).

9. Baveye P.C., Wander M. The (bio) chemistry of soil humus and humic substances: why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? // *Frontiers in Environmental Science*. 2019. Vol. 7 (27). P. 1–6. DOI: [10.3389/fenvs.2019.00027](https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027).

10. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems // *J. Environ. Qual.* 2019. Vol. 48. P. 207–216. DOI: [10.2134/jeq2019.01.0036](https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036).

11. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces // *Biogeochem.* 2007. Vol. 85. P. 9–24.

12. Mohinuzzaman M., Yuan J., Yang X., Senesi N., Li S.-L., Ellam R.M., Mostofa K.M.G., Liu C.-Q. Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils // *Science Total Environment*. 2020. Vol. 720. No. 137395. P. 1–14. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137395](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137395).

13. Olk D.C., Bloom P.R., Nobili M. De, Chen Y., McKnight D.M., Wells M.J.M., Weber J. Using humic fractions to understand natural organic matter processes in soil and water: Selected studies and applications // *J. Environ. Qual.* 2019. Vol. 48 (6). P. 1633–1643.

14. Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Farenhorst A., Senesi N., Chin Y.P., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Harir M. Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters // *J. Environ. Qual.* 2019. Vol. 48 (2). P. 217–232. DOI: [10.2134/jeq2019.02.0041](https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041).

15. Stepanov A.A. Specificity of humic substances extracted from fissures and genetic horizons of peat-podzolic soil // *Eurasian Soil Science*. 2008. Vol. 41. P. 837–843. DOI: [10.1134/S106422930808005X](https://doi.org/10.1134/S106422930808005X).

REFERENCES

1. Zav'yalova N.E., Shirokikh I.G., Yamaltdinova V.R., *Mikrobiologicheskoe sostoyanie dernovo-podzolistoy pochvy Predural'ya pri dlitel'nom primenении organicheskikh i mineral'nykh udobreniy* (Microbiological status of the Pre-Urals sod-podzolic soil with long-term use of organic and mineral fertilizers), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2020, No. 1, pp. 151–159, DOI: [10.25750/1995-4301-2020-1-151-159](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-151-159).
2. Ivanov A.L., vanov A.L., Kogut B.M., Semenov V.M., Turina Oberlander M., Waksman Schanbacher N., *The Development of Theory on Humus and Soil Organic Matter: from Turin and Waksman to Present Days*, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp. 3–38, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-3-38](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38).
3. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Humic acids, soils and the general theory of humification), Moscow: Izd-vo MGU, 1990, 325 p.
4. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv* (Soil humic acids), Moscow: Izd-vo MGU, 1974, 333 p.
5. Sarykh S.E., Kupriyanov A.N., Belopukhov S.L., Mazirov M.A., *Izucheniye vliyaniya dlitel'nogo primeneniya udobreniy na organicheskoy veshchestvo dernovo-podzolistoy pochvy metodom IK-spektroskopii* (Studying the effect of long-term application of fertilizers on organic matter of soddy-podzolic soil by the method of IR-spectroscopy), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2019, No. 2, pp. 17–22, DOI: [10.24411/0235-2516-2019-109999021](https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-109999021).
6. Shevtsova L.K., Chernikov V.A., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I. *Termicheskaya kharakteristika i primeneniye piroliticheskoy mass-spektrometrii dlya issledovaniya izmeneniy svoystv i struktury guminovykh kislot pochv pod vliyaniem udobreniy. Soobshcheniye 2* (Thermal characteristics and application of pyrolytic mass spectrometry to study changes in the structure of humic acids under the influence of fertilizers. Message 2), *Agrokhiimiya*, 2020, No. 11, pp. 3–13, DOI: [10.31857/S0002188120110095](https://doi.org/10.31857/S0002188120110095).
7. Shevtsova L.K., Chernikov V.V., Sychev V.G., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I. *Vliyanie dlitel'nogo primeneniya na sostav, svoystva i strukturnye kharakteristiki gumusovykh kislot osnovnykh tipov pochv. Soobshcheniye 1* (Effect of long-term application of fertilizers on the composition, properties and structural characteristics of humic acids in main soil types. Report 1), *Agrokhiimiya*, 2019, No. 10, pp. 3–15, DOI: [10.1134/S0002188119100120](https://doi.org/10.1134/S0002188119100120).
8. Yamaltdinova V.R., Vashbieva M.T., Fomin D.S., *Vliyanie sistem udobreniy na agrokhimicheskie pokazateli i nakopleniye tyazhelykh metallov v*

pochve i yarovoy pshenitse (*Triticum Aestivum* L.) (The influence of fertilizer systems on agrochemical indicators and the accumulation of heavy metals in soil and spring wheat (*Triticum aestivum* L.)), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2020, No. 3, pp. 39–43, DOI: [10.26178/AE.2020.78.61.004](https://doi.org/10.26178/AE.2020.78.61.004).

9. Baveye P.C., Wander M., The (bio) chemistry of soil humus and humic substances: why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? *Frontiers in Environmental Science*, 2019, Vol. 7 (27), pp. 1–6, DOI: [10.3389/fenvs.2019.00027](https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027).

10. Kleber M., Lehmann J., Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems, *J. Environ. Qual.*, 2019, Vol. 48, pp. 207–216, DOI: [10.2134/jeq2019.01.0036](https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036).

11. Kleber M., Sollins P., Sutton R., A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces, *Biogeochem.*, 2007, Vol. 85, pp. 9–24.

12. Mohinuzzaman M., Yuan J., Yang X., Senesi N., Li S.-L., Ellam R.M., Mostofa K.M.G., Liu C.-Q., Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils, *Science Total Environment*, 2020, Vol. 720, No. 137395, pp. 1–14, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137395](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137395).

13. Olk D.C., Bloom P.R., Nobili M. De, Chen Y., McKnight D.M., Wells M.J.M., Weber J., Using humic fractions to understand natural organic matter processes in soil and water: Selected studies and applications, *J. Environ. Qual.*, 2019, Vol. 48 (6), pp. 1633–1643.

14. Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Farenhorst A., Senesi N., Chin Y.P., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Harir M., Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters, *J. Environ. Qual.*, 2019, Vol. 48 (2), pp. 217–232, DOI: [10.2134/jeq2019.02.0041](https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041).

15. Stepanov A.A., Specificity of humic substances extracted from fissures and genetic horizons of peat-podzolic soil, *Eurasian Soil Science*, 2008, Vol. 41, pp. 837–843, DOI: [10.1134/S106422930808005X](https://doi.org/10.1134/S106422930808005X).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-116-156



Ссылки для цитирования:

Кравцов Ю.В., Смоленцева Е.Н. Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 116-156. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-116-156

Cite this article as:

Kravtsov Yu.V., Smolentseva E.N., Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 116-156, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-116-156

Благодарность:

Лабораторный анализ почвенных образцов, подготовка материалов к публикации выполнены по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, полевые работы и частично подготовка результатов к публикации – при финансовой поддержке Новосибирского государственного педагогического университета.

Acknowledgments:

The laboratory analysis of soil samples and preparation of materials for publication were carried out under the state assignment of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; the field work and partial preparation of results for publication were funded by the Novosibirsk State Pedagogical University.

Особенности современного генезиса плакорных почв Ишимской степи

© 2022 г. Ю. В. Кравцов¹, Е. Н. Смоленцева²

¹Новосибирский государственный педагогический университет, Россия, 630126, Новосибирск, Вилуйская ул., 28,
<https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>, e-mail: kravtsov60@mail.ru.

²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Россия, 630099, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2,
<https://orcid.org/0000-0003-0900-4692>,
e-mail: esmolenceva@issa-siberia.ru.

Поступила в редакцию 03.04.2022, после доработки 31.05.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: Установлены основные направления генезиса плакорных почв Ишимской степи в зависимости от их хозяйственного использования (пашня, лесополоса, залежь) в течение 1950-х – 2020-х гг. В пределах исследуемого региона диагностированы почвы на различных по характеру использования угодьях. Показано, что региональной морфогенетической особенностью всех плакорных почв является темная языковатость, которая отражается на их классификационном статусе выделением одноименного подтипа. В преобладающих по площади агроземях выявлена дифференциация агротемногумусового горизонта на два подгоризонта под влиянием плоскорезной обработки. Определены признаки постагрогенной трансформации почв, происходящей под лесополосами и под залежами с травянистой растительностью. Постагрогенные почвы характеризуются зернисто-комковатой структурой, более высокими запасами гумуса и общего азота в слое 0–20 см, по сравнению с агроземами. В почве лесополосы сформировался грубогумусированный горизонт, не характерный для степных почв. Почва под травянистой длительной залежью имеет признаки проградации темногумусового горизонта до состояния близкого к целинному. Дополнительное поверхностное увлажнение, которое испытывают почвы микропонижений, обуславливает в них более высокое содержание гумуса и запасы его в слое 0–100 см, более глубокое выщелачивание карбонатов, формирование глинисто-иллювиального горизонта в бескарбонатной зоне и препятствует образованию гипсового горизонта. Повышение уровня грунтовых вод в современный период, которое является следствием массовой распашки и функционирования полевых лесополос на исследуемой территории, обусловило появление гидроморфизма в плакорных почвах и формирование квазиглееватых подтипов. Полученные результаты свидетельствуют о региональной специфике генетических свойств плакорных почв Ишимской степи, отличающих их от европейских аналогов, а также о влиянии на них агрогенной трансформации, что отражается на морфологии почв, их гумусном состоянии, характере карбонатного и гипсового профиля, процессах галогенеза и разнообразии солевых профилей.

Ключевые слова: чернозем, агрозем, агрогенная трансформация почв, уровень грунтовых воды, залежь, лесополоса, гипс, Западная Сибирь.

Features of modern genesis of the Ishim steppe watershed plain soils

© 2022 Yu. V. Kravtsov¹, E. N. Smolentseva²

¹*Novosibirsk State Pedagogical University,
28 Vilyuyskaya str., Novosibirsk 630126, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-0462-9194>, e-mail: kravtsov60@mail.ru.*

²*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
8/2 Akademika Lavrentieva ave., 630099 Novosibirsk, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-0900-4692>,
e-mail: esmolenceva@issa-siberia.ru.*

Received 03.04.2022, Revised 31.05.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The genesis main directions of the Ishim steppe watershed plain soils depending on their economic use (arable land, forest belt, abandoned land) during the 1950s – 2020s were revealed. Within the studied region, soils were diagnosed on lands of different use. It is shown that the regional morphogenetic feature of all watershed plain soils is the tonguing of the humus horizon, which is reflected in their classification status by the allocation of a dark-tonguic subtype of the soils. Differentiation of the agrodarkhumus horizon into two subhorizons under the influence of plane-cutting processing was revealed in the agrozem, prevailing by area. The manifestation of postagrogenic transformation of soils occurring under forest belts and under deposits with herbaceous vegetation is determined. Postagrogenic soils are characterized by a granular structure, higher reserves of humus and total nitrogen in a layer of 0–20 cm compared to agrozems. In the soil of the forest belt, a coarse-humus neo-horizon was formed, which is not typical of steppe soils. The soil under abandoned for a long time grassland has signs of dark humus horizon progradation to a state close to a virgin one. The additional surface moistening of micro-subsidence soils causes them to have a higher humus content and its reserves in the 0–100 cm layer, deeper leaching of carbonates, the formation of a clay-illuvial horizon in the carbonate-free zone and prevents the formation of a gypsum horizon. The groundwater level raising in the modern period, which is a consequence of the mass plowing and functioning of impenetrable protective forest belts in the study area, caused the appearance of neo-hydromorphism in watershed plain soils and the formation of quasi-clay subtypes. The results indicate the regional specificity of the genetic properties of the Ishim steppe watershed plain soils that distinguish them from their European counterparts, as well as the influence of agrogenic transformation as an anthropogenic factor on them. This influence is reflected in the morphology of soils, their humus state, the

nature of the carbonate and gypsum profiles, the processes of halogenesis in them and the variety of salt profiles.

Keywords: Chernozem, agrozem, soil agrogenic transformation, groundwater level, fallow, forest belt, gypsum, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Степные почвы длительно используются в богарном земледелии. Среди негативных последствий этого использования известны: снижение содержания гумусовых веществ ([Шеглов, 2003](#); [Лебедева, 2011](#); [Чупрова, 2017](#); [Мамонтов и др., 2020](#) и пр.) и уменьшение количества илистой фракции в пахотном слое ([Слесарев, Кудряшова, 1988](#); [Рейнгард, 2009](#)), ухудшение структуры и снижение водопрочности почвенных агрегатов ([Мамонтов и др., 2020](#)), дефляция и эрозия почв ([Гусаров и др., 2018](#)). В последние годы усилия исследователей сосредоточены не только на изучении последствий многолетней эксплуатации степных почв в земледелии ([Лебедева и др., 2013](#); [Лисецкий, Родионова, 2015](#) и др.), но и на поиске вариантов восстановления их продуктивности ([Азаренко и др., 2020 и др.](#)).

Ишимская степь (Ишим-Иртышское степное междуречье) – важный аграрный регион Сибири. Одной из его особенностей, по сравнению с другими степными районами Западной Сибири, является высокая доля пашни в составе земельных угодий, которая достигает 80% ([Доклад..., 2017](#)). В регионе доминируют выровненные плакорные участки местности, на которых во второй половине XX столетия диагностировались крупные массивы черноземов южных ([Градобоев и др., 1960](#); [Черноземы..., 1988](#)). В настоящее время в связи длительным землепользованием и обновлением классификационной парадигмы требуется актуализировать информацию о состоянии почв Ишимской степи, в том числе об их классификационном статусе, признаках и свойствах.

Некоторые агрогенные изменения в почвах степи Западной Сибири становились предметом изучения и ранее. Так, было показано влияние распашки на почвенные процессы и микробиоту черноземов южных ([Почвообразование..., 1991](#)). Отмечено развитие эрозии и дефляции почв в южных районах Омской области ([Рейнгард, 2009](#)). Исследовалась динамика содержания фосфора и

калия в пахотных почвах степи Омской области ([Башкатова, Шмидт, 2020](#)). Одним из важных достижений предыдущих изысканий является доказательство атмосферного засоления почв Ишим-Иртышского степного междуречья ([Сеньков, 2004](#)).

Однако новейшие данные по антропогенным изменениям генетических особенностей почв Ишимской степи отсутствуют. Основным фактором антропогенной трансформации ишимских степных почв в настоящее время является масштабная их распашка, уничтожение естественных травяных ценозов и культивирование на распаханых землях преимущественно яровых зерновых и многолетних трав. Эти процессы вызывают также изменения гидрологического состояния плакорных почв Ишимской степи: уменьшение вертикальной мощности слоя эваподесукативного иссушения (с 2 м до 0.8 м), формирование во втором метровом слое горизонта с влажностью на уровне 70–100% наименьшей влагоемкости ([Кравцов, 2009б; 2014](#)). Аналогичные явления отмечались и в черноземах степной зоны европейской части России ([Лебедева, 2004](#)).

Вторым по времени появления фактором антропогенных изменений в почвах Ишим-Иртышского степного междуречья можно считать функционирование непрочищаемых полезащитных лесополос, высаженных в 1970–1980-х годах. Они вызвали подъем грунтовых вод выше критической глубины в плакорных почвах вследствие накопления снега с их подветренной стороны и поступления талых вод в почвенно-грунтовую толщу ([Черноземы..., 1988; Кравцов, 2009а](#)). Выявлено устойчивое положение уровня этих вод выше критической глубины в первые десятилетия XXI столетия ([Кравцов и др., 2017](#)). Вместе с тем средняя урожайность традиционных для региона яровых зерновых в промежуток 2000–2017 гг. при устойчивом положении уровня минерализованных грунтовых вод выше критической глубины оказалась более высокой (18.3 ц/га), по сравнению с промежуток 1986–2000 гг. (11.9 ц/га), когда грунтовые воды фиксировались ниже критической глубины ([Кравцов и др., 2017](#)). Результаты влияния вышеназванных факторов на плакорные почвы необходимо изучать для оптимизации землепользования в регионе.

Цель работы – показать региональную специфику плакор-

ных почв Ишимской степи и выявить особенности их современного генезиса в связи с многолетней эксплуатацией в богарном земледелии и положением грунтовых вод выше критической глубины. Для этого предполагается уточнить особенности современной морфологии плакорных почв Ишимской степи, их гумусного состояния, гранулометрического состава, карбонатного и гипсового профилей, основных физико-химических свойств и солевых профилей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ишимская степь расположена в южной части одноименной равнины с высотами 110–125 м. Среди форм мезорельефа типичны плоские поверхности междуречий (плакоры), занимающие более 70% территории, и крупные (диаметром до 5–6 км и глубиной до 10 м) котловины с пологими склонами. Для микрорельефа характерны понижения диаметром 50–100 м глубиной до 1 м (блюдообразные западины), на долю которых приходится 5–20% площади междуречья.

Почвообразующие породы представлены верхнеплейстоценовыми лессовидными отложениями мощностью 1–10 м. Подстилающими породами являются серо-бурые глины сладководской свиты ниже- и среднеплейстоценового возраста ([Волков, 1965](#)). Подстилающие и материнские породы характеризуются высоким содержанием илистой фракции – до 40–45% ([Слесарев, Кудряшова, 1988](#)).

Климатические условия Ишимской степи типичны для степной зоны Западной Сибири. Параметры климата представлены по материалам наблюдений метеорологической станции “Русская Поляна” ФГБУ “Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды”. Среднегодовая температура воздуха составляет 2.0 °С, средняя температура июля – +20.4 °С, января – –16.9 °С. Вегетационный период со среднесуточными температурами выше 10 °С длится 130 дней, сумма температур выше 10 °С достигает 1 800–1 900 °С. Для района исследований типична продолжительная (130–150 дней) морозная зима. Ишимская степь характеризуется недостаточным атмосферным

увлажнением. Годовая сумма осадков достигает 360 мм, а испаряемость – 500–700 мм.

Гидрографическая сеть района представлена мелководными (до 3 м глубины) озерами. Для Ишимской степи характерен слабый естественный дренаж. Грунтовые воды встречаются в неогеновых, ниже- и среднелейстоценовых глинах и покровных суглинках. Зеркало водоносного горизонта на плакорных участках отмечается на глубине 2–17 м. Грунтовые воды характеризуются минерализацией 0.5–1 г/л, местами – до 10–20 г/л и сульфатно-хлоридным составом ([Сеньков, 2004](#)). В связи с высоким содержанием илистой фракции в почвах и породах Ишимской степи грунтовые воды горизонтально практически неподвижны ([Сеньков, 2004](#)).

Исследуемая территория расположена в зоне настоящих разнотравно-ковыльных степей, которые сейчас практически полностью распаханы. Известно, что в 1980-е годы в Ишимской степи на плакорных участках были развиты крупные по площади массивы черноземов южных, в понижениях микро- и мезоформ рельефа – почвы различной степени гидроморфности ([Черноземы..., 1988](#)). Соответственно современному почвенно-экологическому районированию ([Урусевская и др., 2013](#)) территория входит в состав Черлакского округа черноземов южных языковатых глинистых и тяжелосуглинистых Западно-Сибирской степной провинции черноземов языковатых обыкновенных и южных, лугово-черноземных солонцеватых и солончаковатых почв и солонцов луговых и луговатых.

Для изучения особенностей современного педогенеза Ишимской степи были выбраны почвы на плакорных участках в окрестностях пос. Русская Поляна Русско-Полянского района Омской области (рис. 1). На территории района доля сельхозугодий составляет 94.5% от общей площади, доля пашни – 80.3%, что выше, чем в среднем по степной зоне Омской области ([Рейнгард, 2009](#)). Объектами исследования (табл. 1) явились старопахотные почвы (чернозем южный карбонатный солончаковатый и лугово-черноземная выщелоченная), чернозем южный обычный под лесополосой (посадки тополя 1973 г.) и старозалежная (50–60 лет) почва (чернозем южный обычный). Исследуемая четырехрядная

лесополоса имеет длину 2 км. Расстояние между рядами посадок тополя – 2 м, среднее расстояние между деревьями в ряду – 2–4 м. Высота древостоя колеблется от 5 до 15 м. Все разрезы заложены на одной плакорной поверхности. Пахотные почвы и почва под лесополосой расположены в непосредственной близости друг от друга, залежная почва – на расстоянии около 10 км от них (рис. 1). Из разрезов были отобраны образцы почв по генетическим горизонтам, в том числе для определения плотности сложения ([Теории и методы..., 2007](#)).

В почвенных образцах определены следующие показатели: содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) – по методу Тюрина, общего азота – методом Кьельдаля, карбонатов – газовойметрии по Голубеву, гипса – солянокислым методом, значение pH водной суспензии – потенциометрически ([Теория и практика..., 2006](#)). Гранулометрический состав почв определяли по методу Качинского с диспергацией образцов пирофосфатом натрия ([Теории и методы..., 2007](#)). Характеристика цвета почвенных горизонтов дана по шкале Манселла. Содержание легкорастворимых солей и значение удельной электропроводности (УЭП) были определены в водной вытяжке (при соотношении почва : вода = 1 : 5): катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} и K^{+}) – атомно-абсорбционным методом, анионы (CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-}) – по общепринятым методикам ([Теория и практика..., 2006](#)). Количество обменных оснований получили методом Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой ([Руководство..., 1990](#)).

Названия почв даны по трем классификационным системам:

- 1) классификации почв СССР ([Классификация почв..., 1977](#)) (табл. 1);
- 2) классификации почв России (КПР) ([Классификация и диагностика..., 2004](#); [Полевой определитель..., 2008](#)) (табл. 2);
- 3) международной классификации почв World Reference Base for Soil Resources (WRB) ([IUSS, 2015](#)).

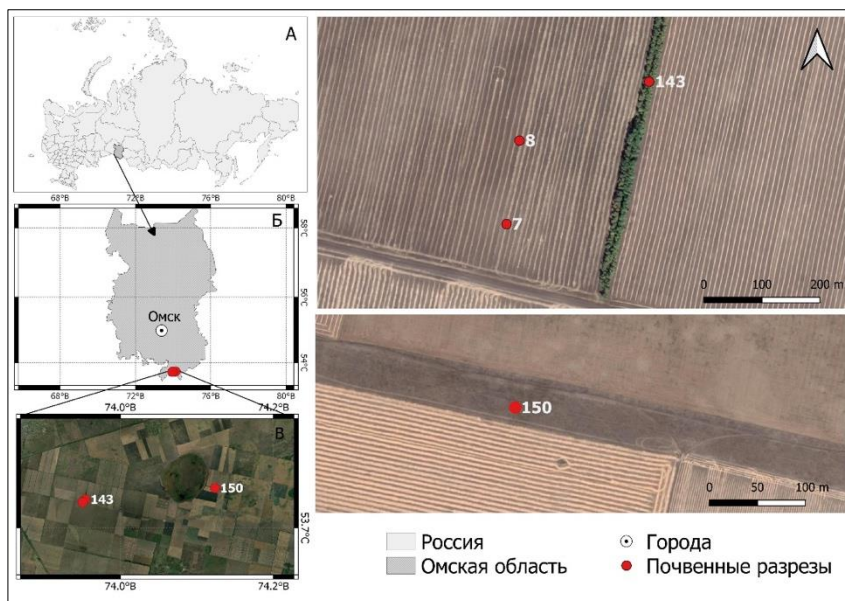


Рис. 1. Расположения объектов исследования.

Fig. 1. Location of research objects.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфогенетические особенности почв Ишимской степи

Диагностическими горизонтами в изученных почвах являются темногомусовый (AU), агротемногомусовый (PU), аккумулятивно-карбонатный (BCA) и глинисто-иллювиальный (BI) ([Полевой определитель..., 2008](#)). Пахотные почвы относятся к отделу агроземов, почвы под залежью и лесополосой – к отделу аккумулятивно-гумусовые ([Полевой определитель..., 2008](#)). Типовая и подтиповая принадлежность, а также формула профиля каждой почвы представлены в таблице 2.

Таблица 1. Объекты исследования и характеристика их местоположения
Table 1. Research objects and characteristics of their location

Разрез	Название почвы (Классификация почв..., 1977)	Координаты, высота над над у. м.	Рельеф	Угодье	Уровень грунтовых вод в июне 2019 г., см
7	Чернозем южный карбонатный солончаковатый	53.719° с. ш., 73.950° в. д.; 121 м	Равнина, плакор, микроповышение	Пашня, паровое поле	350
8	Лугово-черноземная выщелоченная	53.721° с. ш., 73.950° в. д.; 120 м	Равнина, плакор, микрозападина	Пашня, паровое поле	250
143	Чернозем южный обычный	53.721° с. ш., 73.954° в. д.; 121 м	Равнина, плакор, микроповышение	Лесополоса, посадки тополя	300
150	Чернозем южный обычный	53.730° с. ш., 74.123° в. д.; 122 м	Равнина, плакор, микроповышение	Старая залежь, степь настоящая разнотравно- ковыльная	до 600 не обнаружено

Таблица 2. Классификационный статус изученных почв Ишимской степи
Table 2. Classification status of the studied soils of the Ishim steppe

Разрез	Название почвы (тип, подтип) по КПП (Полевой..., 2008)	Формула профиля по КПП	Название почвы по WRB (IUSS, 2015)
7	Агрозем темный дисперсно-карбонатный гипсодержащий засоленный темноязыковатый	PU'-PU''-ABlc,s,yu-BCAdc,s,yu-BCAcs,s-BCca,s-Cca,s	Calcic Gypsic Chernozem (Clayic, Aric, Endoprotosalic Tonguichernic)
8	Агрозем темный глинисто-иллювиальный квазиглееватый темноязыковатый	PU'-PU''-BIyu-BCAdc-BCca,q-Cca,q	Luvic Calcic Phaeozem (Clayic, Aric, Tonguichernic)
143	Чернозем дисперсно-карбонатный гипсодержащий засоленный темноязыковатый постагрогенный грубогумусированный	AUao-AUpa-AU-AByu-BCAdc,yu-Bcs,s-BCca,s-Cca,s	Calcic Gypsic Chernozem (Clayic, Tonguichernic)
150	Чернозем дисперсно-карбонатный гипсодержащий засоленный темноязыковатый постагрогенный	AUrz-AUpa-AByu-BCAdc,yu-BCAdc,s,yu-Bcs,s-BCca,s-Cca,s	Cambic Gypsic Calcisol (Clayic, Hypocalcic, Tonguic)

Пахотные почвы (разрезы 7 и 8) характеризуются поверхностным агротемногумусовым горизонтом с соответствующими ([Полевой определитель..., 2008](#)) морфохроматическими признаками (табл. 3). Особенности технологической обработки – поверхностной плоскорезной вспашки – на современном этапе привели к разделению этого горизонта на два подгоризонта: верхний (PU') более рыхлый с порошисто-комковатой структурой и нижний (PU'') более плотный с глыбисто-крупнокомковатой структурой. Замена отвальной вспашки на безотвальную и, как следствие, отсутствие ежегодного перемешивания горизонта PU привели к его вертикальной дифференциации по плотности и структуре.

Спецификой морфологии чернозема дисперсно-карбонатного постагрогенного под лесополосой (разрез 143) является формирование в верхней его части признаков грубогумусированности, что не характерно для степных почв. Подгоризонт AUao представляет собой гомогенную механическую смесь измельченного и слабо трансформированного древесного опада с минеральными компонентами. Залегающий ниже постагрогенный темногоумусовый горизонт AUра отличается от PU пахотных почв мелкокомковато-зернистой структурой с высокой долей копролитов среди агрегатов, а также большей мощностью гумусового профиля (AU + AB). Это свидетельствует об улучшении состояния гумусового горизонта и о постагрогенной трансформации почвы. Вместе с тем окраска горизонта AUра более светлая (10 YR 3/2), чем в остальных почвах (табл. 3), что, на наш взгляд, может быть связано с влиянием древесной растительности и дополнительного поверхностного увлажнения. В старозалежной почве, благодаря восстановившейся растительности с преобладанием дерновинных злаков, на поверхности сформирована дернина AUrz ([Хитров, Герасимова, 2022](#)). Расположенный ниже темногоумусовый (AU) горизонт имеет порошисто-зернисто-комковатую структуру, которая идентична таковой же в целинных черноземах. Характер растительности и структура гумусового горизонта являются важными показателями постагрогенной трансформации ([Мамонтов и др., 2020](#)) и свидетельствуют о восстановлении почвы до состояния близкого к целинному.

Изученные почвы имеют небольшую мощность гумусового горизонта (табл. 3) и характеризуются ([Полевой определитель..., 2008](#)) как мелкие (разрезы 7, 8, 150) и маломощные (разрез 143), что отличает их от европейских аналогов и является региональным признаком западносибирских черноземов ([Хмелев, 1989; Смоленцева, 2018](#)). Максимальная мощность (38 см) зафиксирована в почве под лесополосой. Малая мощность гумусового горизонта является причиной того, что на территории Ишимской степи отсутствуют агрочерноземы (агропочвы). Целинные черноземы Ишимской степи при распашке сразу превратились в агроземы темные, минуя стадию агрочерноземов, в отличие от агрогенной трансформации степных черноземов в европейской части России ([Лебедева, 2004](#)). Отсутствие стадии агропочв (агрочерноземов) является региональной спецификой агрогенной трансформации черноземов Ишимской степи, что также характерно для других областей черноземной зоны Западной Сибири ([Смоленцева, 2021](#)).

Изученные почвы различаются по глубине залегания карбонатов, и, соответственно, по мощности бескарбонатной зоны (табл. 3). Максимальная ее мощность (80 см) зафиксирована в агроземе темном глинисто-иллювиальном (почва в микрозападине), что обусловлено влиянием дополнительного поверхностного увлажнения. Почвы нормального увлажнения (разрезы 7 и 150) сходны по размерам зоны выщелачивания (табл. 3). Слабое вскипание от 10%-ной HCl с поверхности агрозема темного дисперсно-карбонатного (разрез 7) свидетельствует о присутствии в зоне выщелачивания остаточных карбонатов, что подтверждается аналитически. В почве под лесополосой карбонаты также расположены глубже, чем в почвах нормального увлажнения. Срединным горизонтом в изученных почвах нормального увлажнения является аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСА. Мощность его составляет 40–42 см, при дополнительном увлажнении она увеличивается до 60 см. Характерной особенностью черноземных почв Ишимской степи является отсутствие миграционных и редкая встречаемость сегрегационных форм педогенных карбонатов.

Таблица 3. Особенности профилей почв Ишимской степи

Table 3. Features of soil profiles of the Ishim steppe

Свойства	Разрезы (уголье)			
	7 (пашня)	8 (пашня)	143 (лесополоса)	150 (залежь)
Мощность горизонта, см:				
дернина (AU _{rz})	нет	нет	нет	3
темногумусовый (AU)	нет	нет	33	18
агротемногумусовый (PU)	25	25	нет	нет
грубогумусированный (AU _{ao})	нет	нет	5	нет
Цвет гумусового горизонта (PU или AU) по шкале Манселла	10 YR 3/1	10 YR 3/1	10 YR 3/2	10 YR 3/1
Глубина “вскипания” от 10% HCl, см	с поверхности	80	50	35
Аккумулятивно-карбонатный горизонт, от ... до ..., см	40–80	80–140	56–100	35–77
Мощность зоны аккумуляции карбонатов, см	40	60	44	42
Гипсовый горизонт, от ... до ..., см	90–130	отсутствует	100–140	120–160
Пятна оржавления, от ... до ..., см	250–300	150–180	220–230	нет
Пятна оглеения, от ... до ..., см	нет	150–250	270–280	нет

Карбонатные новообразования в горизонте ВСА представлены диффузно рассеянными скоплениями, образующими светлые расплывчатые пятна, что соответствует дисперсно-карбонатному подтипу черноземов ([Полевой определитель..., 2008](#)). В бескарбонатной зоне почвы в микропонижении под горизонтом PU формируется глинисто-иллювиальный (ВІ) горизонт с однодвухпорядковой ореховато-призматической структурой. Грани агрегатов покрыты однослойными глинистыми кутанами.

Для всех изученных почв характерна языковатая граница между гумусовым и срединными горизонтами, которая представляет собой языки-трещины глубиной до 60–80 см, заполненные материалом гумусового горизонта. Они являются результатом колебаний объема и растрескивания почвенной массы под действием сильного иссушения в летнее время ([Градобоев и др., 1960](#); [Черноземы..., 1988](#); [Смоленцева, 2018](#) и пр.). Таким образом, темная языковатость (у_ц) как эволюционный признак ([Полевой определитель..., 2008](#)) накладывается в исследуемых почвах на карбонатно-аккумулятивный ВСа_су_ц и глинисто-иллювиальный ВІу_ц горизонты и обуславливает их региональную модификацию. Эта региональная морфогенетическая особенность черноземов Ишимской степи, наследуемая также их агрогенными аналогами, отражается на классификационном статусе почв выделением темнаязыковатого подтипа.

В профилях трех почв (разрезы 7, 143 и 150) присутствует также гипсовый горизонт, в котором гипс представлен сегрегационными формами. Глубина верхней границы гипсового горизонта в изученных почвах зависит от характера поверхностного увлажнения. Ближе всех к поверхности (90 см) он расположен в разрезе 7, имеющем нормальное увлажнение, в разрезе 143 под лесополосой при дополнительном увлажнении – на глубине 100 см (табл. 3). Агрозем глинисто-иллювиальный, расположенный в микрозападине, не имеет гипсового горизонта во всей зоне аэрации. В залежной почве (р. 150) гипсодержащий горизонт обнаружен на глубине 120 см. Основная масса гипсовых новообразований сосредоточена в слое мощностью 15–20 см. Надо отметить, что гипсовый горизонт в плакорных почвах Ишимской степи в связи с их тяжелым высоко илистым гранулометрическим соста-

вом залегает ближе к поверхности по сравнению с черноземами и их агрогенными аналогами в других степных регионах России. Например, в Ростовской области он обнаруживается на глубине 210–250 см ([Морозов и др., 2018](#)), в легкосуглинистых темно-каштановых почвах Кулунды – на глубине 190–200 см ([Ильин, 1967](#)).

Повышение уровня грунтовых вод (УГВ) на современном этапе ([Кравцов, 2009а; 2014; Кравцов и др., 2017](#)) вызывает изменения морфогенетических свойств почв микропонижения и лесополосы: в них зафиксированы новообразования окисного и закисного железа в виде пятен и примазок (табл. 3). Это свидетельствует о возникновении глубинного оглеения как дополнительного почвообразовательного процесса и формировании квазиглеевого подтипа почв на исследуемой территории. Таким образом, мы разделяем высказанное ранее мнение ([Черноземы..., 1988](#)), что глубинный гидроморфизм плакорных почв Ишимской степи является не реликтовым, а современным (неогидроморфизм по [Шеглову \(2003\)](#)), особенно хорошо проявляющимся в гумидные климатические циклы на фоне значительной агрогенной трансформации почвенного покрова.

Гумусное состояние

Характеристика гумусного состояния почв Ишимской степи дана по Д.С. Орлову ([Орлов и др., 2004](#)). Как уже отмечалось выше, почвы характеризуются небольшой мощностью гумусового горизонта (табл. 3) и низким, реже средним, содержанием гумуса в поверхностном горизонте (табл. 4). Агрозем темный дисперсно-карбонатный имеет самое низкое содержание гумуса в верхнем горизонте и низкие его запасы в слое 0–20 см. Самый высокий запас гумуса в слое 0–20 см имеет агрозем темный глинисто-иллювиальный в микропонижении. Это почти в 2 раза больше, чем в агроземе темном дисперсно-карбонатном и на 24% выше, чем в почве под лесополосой. Запас гумуса в слое 0–20 см остальных почв – средний (рис. 2). Для слоя 0–100 см выявлены аналогичные закономерности. В слое 0–100 см запас гумуса во всех изученных почвах средний (рис. 2). По шкале грааций пахотных почв России по степени гумусированности ([Семенов, Когут, 2015](#))

залежная почва характеризуется как сильно гумусированная (6.0–6.9% гумуса) и сходная по содержанию гумуса с целинными почвами, что свидетельствует о значительной постагрогенной трансформации этой почвы.

Таким образом, почвы Ишимской степи характеризуются резко убывающим распределением гумуса по профилю (табл. 4), что является региональным “сибирским” признаком. Это одно из главных отличий западносибирских черноземов от европейских. Оно обусловлено спецификой гидротермического режима черноземной области Западной Сибири, который отражается, прежде всего, на количественных параметрах гумусово-аккумулятивного процесса и определяет особенности профильного распределения гумуса и его запасов ([Хмелев, 1989](#); [Кленов, 2000](#)).

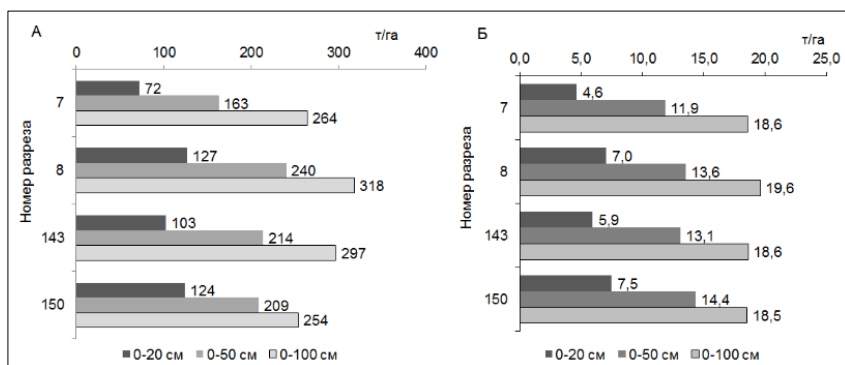


Рис. 2. Послойные запасы гумуса (А) и общего азота (Б) в почвах Ишимской степи, т/га. Условными знаками показана мощность расчетного слоя в см. Названия почв по номеру разреза даны в таблице 2.
Fig. 2. Humus (А) and nitrogen (Б) content (t/ha) in different layers of the soils of the Ishim steppe. The symbols in the figure show the thickness of the calculated layer in cm.

Агрозем на микроповышении (р. 7) имеет среднее содержание общего азота в горизонте PU и наименьшее по сравнению с остальными почвами, старозалежная почва характеризуется самым высоким его содержанием (табл. 4).

Аналогично характеризуются запасы азота в слое 0–20 см (рис. 2). Запасы азота в метровом слое изученных почв Ишимской степи сходные. Обогащенность гумуса азотом средняя во всех почвах (табл. 4). Старозалежная почва характеризуется увеличением запасов общего азота в поверхностном слое по сравнению с остальными почвами. Смена типа использования (пашня – лесополоса) также приводит к изменению гумусового состояния почв: растут запасы гумуса и общего азота, особенно в слое 0–20 см, и обогащенность гумуса азотом. Данная тенденция характерна и для почв других регионов России ([Беляев, 2007](#)).

Гранулометрический состав

Изученные почвы имеют сходный характер распределения ила и физической глины (ФГ) по профилю (рис. 3). Для разрезов 7, 8 и 150 характерно значительное обеднение илом и ФГ в верхней части профиля (пахотного или постагрогенного горизонтов) и резкое увеличение их содержания в срединном горизонте без образования выраженного максимума относительно почвообразующей породы. Обедненность верхней части профиля этих почв вышеупомянутыми фракциями может быть обусловлена их дефляционным выносом при пахотном использовании ([Рейнгард, 2009](#)).

Иной характер распределения ила и ФГ имеет почва под лесополосой (р. 143). В профиле выражено два максимума их содержания: один в гумусовом горизонте, другой – в аккумулятивно-карбонатном. На наш взгляд, верхний максимум ила и ФГ обусловлен эоловой аккумуляцией материала, выдуваемого с окружающих пашен, недостаточно защищенных лесополосами. А второй максимум, возможно, связан с перераспределением этих фракций под влиянием дополнительного поверхностного увлажнения, характерного для лесополос. Проявление глинисто-иллювиального процесса в почвах под лесополосами установлено, например, для Среднерусской возвышенности ([Смирнова и др., 2020](#)) и Алтайского края ([Беховых, 2018](#)). Все почвы имеют сходное содержание ила глубже 60 см в срединных горизонтах и почвообразующей породе, где оно составляет 30–40%. По сравнению с остальными почвами

залежная почва содержит меньше ФГ во всем профиле, что обусловлено естественной пространственной гетерогенностью гранулометрического состава почвообразующих пород ([Волков, 1965](#)). При этом с глубины 40 см залежная почва тяжелосуглинистая, как и остальные почвы, а в верхней части профиля (AU+AB) – среднесуглинистая.

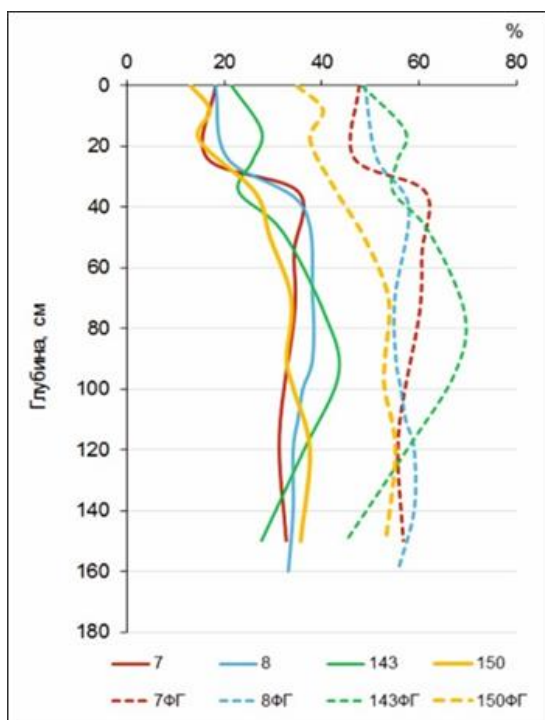


Рис. 3. Содержание ила (сплошная линия) и физической глины (пунктирная) в почвах Ишимской степи. Цифрами в легенде здесь и далее обозначены номера разрезов, название почв приведено в таблице 2.
Fig. 3. The content of silt (solid line) and physical clay (dotted line) in the soils of the Ishim steppe. The numbers in the legend here and further indicate the numbers of sections, the name of the soils is given in Table 2.

Карбонатный профиль

Для морфогенетической характеристики черноземов и их агрогенно трансформированных аналогов важным показателем является карбонатный профиль (КП), который подразделяют на различные зоны ([Лебедева, Овечкин, 2003](#); [Лебедева, 2011](#); [Щеглов, 2003](#) и пр.). Для характеристики КП почв Ишимской степи мы использовали зонирование, предложенное А.А. Сеньковым ([2004](#)), в соответствии с которым выделяют зону выщелачивания, иллювиально-аккумулятивную зону и зону автохтонных карбонатов почвообразующей породы (или литогенных карбонатов).

Зона выщелачивания карбонатов в изученных почвах отличается как по их содержанию, так и по мощности (рис. 4). Почвы нормального увлажнения – чернозем под залежью (р. 150) и агрозем дисперсно-карбонатный (р. 7) – сходны по ее размерам. Агрозем дисперсно-карбонатный (р. 7) вскипает от 10%-ной HCl с поверхности, что свидетельствует о присутствии в зоне выщелачивания остаточных карбонатов (около 4%) (рис. 4), остальные почвы не вскипают в этой зоне и не содержат остаточных карбонатов. Самую мощную зону выщелачивания (80 см) имеет агрозем глинисто-иллювиальный (р. 8), расположенный в микрозападине. В почве под лесополосой (р. 143) мощность зоны выщелачивания больше, чем в почвах нормального увлажнения (рр. 7 и 150), и составляет 50 см. В зоне выщелачивания разреза 7 содержатся остаточные карбонаты (около 4%), в других почвах – 1–2%.

Таким образом, мощность зоны выщелачивания карбонатов плакорных почв Ишимской степи зависит от характера поверхностного увлажнения: при нормальном увлажнении она составляет 35–40 см, при дополнительном (снеготалыми водами в почвах микрозападин и лесополос) – она увеличивается до 50–80 см. В почвах лесополосы возможно также дополнительное влияние древесной растительности на этот параметр ([Беховых, 2018](#); [Смирнова и др., 2020](#)).

Наиболее резкие различия КП плакорных почв Ишимской степи характерны для иллювиально-аккумулятивной зоны (ИАЗ). При нарастании поверхностного увлажнения ее мощность увеличивается, она становится более растянутой, верхняя граница углубляется (рис. 4; рр. 8, 143).

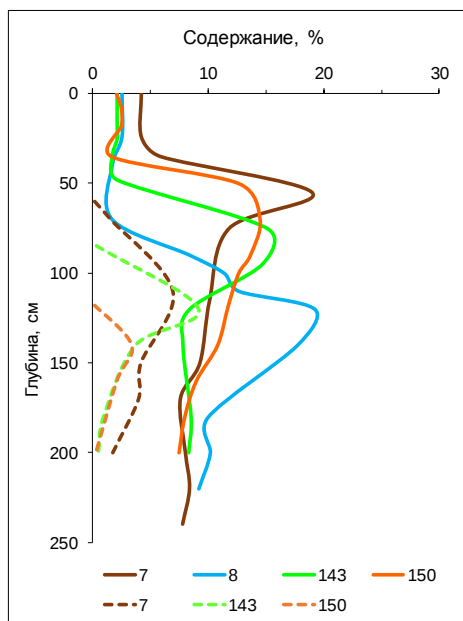


Рис. 4. Профильное распределение карбонатов (сплошная линия) и гипса (пунктирная линия) в почвах Ишимской степи.

Fig. 4. Profile distribution of carbonates (solid line) and gypsum (dotted line) in soils of the Ishim steppe.

Содержание карбонатов здесь варьируется от 12 до 19%. За-
лежная почва (р. 150) несколько отличается по характеру ИАЗ:
несмотря на нормальное увлажнение, она растянута (до 1 м) и со-
держание карбонатов в ней ниже (11–14%). По нашему мнению,
это обусловлено более легким гранулометрическим составом
(меньшее содержание ФГ) и пространственной неоднородностью
условий выщелачивания карбонатов на территории Ишимской
степи. В то же время для всех изученных почв характерна резко
выраженная верхняя граница этой зоны. В зоне литогенных кар-
бонатов содержание их постоянно и составляет 8–10% (рис. 4).
Глубина верхней границы этой зоны зависит от характера увлаж-
нения: в почве микрозападины (р. 8) при дополнительном поверх-

ностном увлажнении она составляет 220 см, при нормальном увлажнении – 150–180 см.

Гипсовый профиль

Характерной особенностью черноземов Ишимской степи и их агрогенных аналогов является наличие в профиле хорошо выраженного морфологически гипсового горизонта, в то время как почвообразующая порода гипса не содержит ([Черноземы, 1988](#); [Сеньков, 2004](#)). В изученных нами почвах он также был обнаружен (табл. 2), а аналитические данные показали некоторые особенности их гипсового профиля. Ближе всего к поверхности расположен гипсовый горизонт в агроземе дисперсно-карбонатном (р. 7). Аналитически гипс обнаруживается уже в слое 50–80 см при его содержании здесь 1.6–1.8%, в то время как морфологически новообразования гипса в этом слое не выражены. В горизонте, где зафиксированы морфологически оформленные стяжения мелкокристаллического гипса, содержание его максимально, достигает 7.0% и постепенно уменьшается с глубиной (рис. 4). Мощность слоя, где аналитически обнаруживается гипс в этой почве, составляет 150 см, а мощность горизонта с морфологически выраженными новообразованиями гипса – 40 см (от 90 до 130 см) (табл. 2). Так как ранее в этой почве фиксировались хорошо выраженные морфологически новообразования кристаллического гипса ([Черноземы..., 1988](#)), которые в 2019 г. мы не обнаружили, можно предположить, что произошла трансформация гипсовых новообразований и гипсового профиля в целом. Это обусловлено перераспределением гипса в результате изменения типа использования (превращение целины в пашню) и, как следствие, усиления промачивания профиля. В связи с большей растворимостью гипса по сравнению с карбонатами, возможна относительно быстрая (десятки лет) трансформация его мелкокристаллических новообразований в мучнистые, а также перераспределение по профилю в связи с изменением характера атмосферного увлажнения, что отмечалось, например, в солонцах ([Любимова, 2018](#)).

Резко выраженная верхняя граница гипсового горизонта и максимальное содержание в нем гипса характерны для почвы лесополосы (р. 143): в слое 80–100 см оно составляет 0.3%, в слое

100–130 см – 9.2%, и уменьшается вниз по профилю (рис. 4). Границы слоя, где гипс фиксируется аналитически (100–140 см), совпадают с границами, выделенными морфологически по его новообразованиям. Слабее всего аккумуляция гипса выражена в залежной почве (р. 150): новообразования обнаружены на глубине 120–160 см, содержание его здесь составляет 2.1–3.4%. В почве микрозападины (р. 8) гипсовый горизонт не обнаружен во всей зоне аэрации до грунтовых вод из-за влияния дополнительного поверхностного увлажнения, которое препятствует аккумуляции гипса.

Мы разделяем точку зрения ([Сеньков, 2004](#)), что гипс в почвах Ишимской степи является педогенным новообразованием, результатом галогенеза степных почв, который включает аэральное поступление солей, их миграцию по профилю, метаморфизацию почвенных растворов, образование и осаждение гипса. Возможность гипсообразования в результате обменных реакций кальция почвенного поглощающего комплекса с сульфатно-натриевыми растворами обоснована и другими авторами ([Ямнова, Панкова, 2013](#); [Yamnova, 2016](#)). В настоящее время гипотеза атмогенно-педогенного происхождения гипса в почвах аридных регионов не получила широкого признания, и зачастую происхождение гипса в степных черноземах трактуется как реликтовое гидрогенное ([Безуглова и др., 2019](#)), что возможно с учетом локальных условий. Однако в черноземах Ишимской степи и их агрогенных аналогах гипс является педогенным, хотя на современном этапе, возможно, происходит процесс его перераспределения в связи со сменой типа использования и превращения целины в пашню, что ранее фиксировалось для других почв ([Любимова, 2018](#)).

Физико-химические свойства

Агрозем темный дисперсно-карбонатный характеризуется слабощелочной и щелочной реакцией среды по всему профилю в связи карбонатностью горизонтов (табл. 4). Остальные почвы имеют в верхней части профиля бескарбонатную зону со слабокислой и нейтральной реакцией среды (табл. 4).

В зоне выщелачивания почвы имеют типичный для черноземов состав обменных оснований со значительным преобладани-

ем кальция (табл. 4), на долю которого приходится 70–80% от суммы обменных катионов. Доля обменного магния составляет 15–20%, доля обменного натрия – 1–2%. Максимальное содержание обменного калия приурочено к гумусовым горизонтам и составляет 5–8% от суммы катионов. Ниже гумусового горизонта доля калия уменьшается до 1–2%. Такое профильное распределение обменного калия в изученных почвах свидетельствует о его биогенной аккумуляции. Вниз по профилю, в зоне скопления карбонатов происходит увеличение содержания обменных магния и натрия в ППК (табл. 4). При этом возрастание количества магния начинается выше карбонатного максимума, натрия – несколько ниже. Одновременно с глубиной уменьшается содержание обменного кальция и его доля от суммы обменных оснований. В гумусовом горизонте почвы под лесополосой (р. 143) доля обменного кальция ниже, чем в остальных почвах, что, возможно, связано с влиянием древесной растительности ([Беляев, 2007](#); [Смирнова и др., 2020](#)).

Солевой профиль

Одной из характерных черт плакорных почв Ишимской степи является их засоленность в глубоких горизонтах профиля ([Сеньков, 2004](#)). Эта особенность подтверждена результатами наших исследований. Засоленность почв характеризуются определенным разнообразием распределения водорастворимых солей по профилю.

Верхняя часть профиля (темногумусовый и агротемногумусовый горизонты) всех изученных почв не засолена (рис. 5). Три из четырех изученных почв свободны от водорастворимых солей в слое 0–100 см. Слабое засоление начинается глубже 100 см, оно хорошо фиксируется аналитически, но не выражено морфологически. В агроземе на микроповышении (рис. 5, р. 7) засоление средней степени начинается с глубины 50 см и постепенно увеличивается до максимума в слое 110–120 см.

Таблица 4. Химические и физико-химические свойства почв Ишимской степи

Table 4. Chemical and physico-chemical properties of the soils of the Ishim steppe

Горизонт	Глуби-на, см	pH _{H2O}	УЭП, дСм/ м	Обменные основания					C _{орг} , %	N _{общ} %	C/N
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма, ммоль(+)/ 100 г почвы			
				% от суммы							
Разрез 7. Агрозем темный дисперсно-карбонатный гипссодержащий засоленный											
PU'	0-12	8.02	0.28	73	20	3	4	30.6	2.22	0.23	9.7
PU''	12-24	7.83	0.19	80	14	1	6	30.2	2.15	0.24	8.9
ABlc,s,yu	30-40	8.08	1.22	49	42	5	5	28.4	1.42	0.19	7.4
BCAdc,s,yu	50-60	8.07	2.65	42	47	5	5	24.7	0.99	0.13	7.9
	70-80	8.22	2.37	33	53	6	7	21.1	0.68	0.09	7.6
Bcs,s	110-120	8.06	3.42	36	50	7	8	21.4	0.52	0.07	15.8
BCca,s	140-150	8.00	3.09	37	48	7	8	20.7	0.41	Н.о.	-
Cca,s	160-170	7.87	3.12	36	49	7	8	21.9	0.48	Н.о.	-
	190-200	7.88	2.15	37	49	7	8	21.9	0.35	Н.о.	-
Разрез 8. Агрозем темный глинисто-иллювиальный											
PU'	0-14	6.47	0.11	76	18	1	6	30.4	3.85	0.35	11.0
PU''	14-24	6.51	0.10	78	18	1	4	31.9	3.41	0.32	10.7
BIyu	30-40	6.47	0.07	67	26	3	4	23.4	1.70	0.16	10.4
	60-70	7.22	0.11	57	34	6	3	23.3	0.64	0.10	6.6
BCAdc	80-90	8.36	0.33	52	38	7	3	22.7	0.31	Н.о.	-
	100-110	8.39	0.51	47	41	10	2	21.1	0.32	Н.о.	-
BCca	130-140	8.43	0.65	41	47	10	3	17.5	0.15	Н.о.	-

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Горизонт	Глуби- на, см	pH _{H2O}	УЭП, дСм/ м	Обменные основания					C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ммоль(+)/ 100 г почвы			
				% от суммы							
BCca,q	170-180	8.37	0.73	36	51	11	2	19.5	0.13	Н.о.	-
Cca,q	190-200	8.32	0.12	37	51	10	2	20.2	0.12	Н.о.	-
Разрез 143. Чернозем дисперсно-карбонатный гипссодержащий засоленный темнаязыковатый постагрогенный											
AUao	0-5	7,02	0.24	65	28	6	2	31.9	13.45	0.31	11.0
AUpa	5-15	6.56	0.10	66	26	6	2	27.4	2.73	0.28	9.9
	15-25	6.32	0.65	70	21	8	2	28.8	2.33	0.23	10.3
AU	25-35	6.52	0.70	68	22	7	2	30.9	2.27	0.22	10.2
AByu	38-48	7.11	0.12	65	25	0	10	33.7	1.26	0.17	7.3
BCAdc,yu	65-75	7.92	0.18	57	36	0	7	29.6	1.00	0.11	9.4
	85-95	8.15	0.20	49	44	1	6	25.9	0.29	Н.о.	-
Bcs,s	110-120	7.65	1.72	70	24	1	5	25.0	0.12	Н.о.	-
BCca,s	130-140	7.68	1.48	67	28	1	4	19.6	0.25	Н.о.	-

Продолжение таблицы 4

Table 4 continued

Горизонт	Глубина, см	pH _{H2O}	УЭП, дСм/м	Обменные основания					C _{орг} , %	N _{общ} , %	C/N
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ммоль(+)/100 г почвы			
				% от суммы							
Разрез 150. Чернозем дисперсно-карбонатный засоленный гипсодержащий темнаязыковатый постагроденный											
AUrz	0-3	6.61	0.10	74	21	0	5	26.2	4.00	0.46	8.7
AUpa	3-8	6.48	0.13	78	18	1	4	28.3	3.56	0.30	11.9
	8-18	6.80	0.12	79	16	1	3	29.8	3.50	0.30	11.7
AByu	22-32	7.94	0.10	78	18	1	3	28.1	1.53	0.20	7.6
BCAdc,yu	40-50	8.27	0.14	75	22	1	2	23.5	0.72	0.11	6.6
	60-70	8.38	0.13	68	28	2	2	27.2	0.40	H.o.	-
	80-90	8.39	0.18	63	31	4	1	30.0	0.24	H.o.	-
BCAdc,yu,s	108-118	8.22	0.25	36	46	16	2	26.6	0.22	H.o.	-
Bcs,s	130-140	8.15	0.48	34	46	18	2	22.1	0.17	H.o.	-
Cca,s	170-180	8.20	0.50	35	45	18	2	23.0	0.15	H.o.	-

Примечание. H.o. – не определяли. **Note.** H.o. – a parameter was not investigated.

Почвы нормального увлажнения (чернозем под залежью и агрозем темный дисперсно-карбонатный на микроповышении) сходны по составу аккумулирующихся ионов: это катионы натрия и сульфат- и хлорид-анионы (рис. 5, р. 7 и р. 150). При этом в агроземе (р. 7) в зоне аккумуляции солей на глубине 60–90 см преобладает хлорид-анион, в слое 100–200 см – сульфат-анион. В черноземе (р. 150) зона солевой аккумуляции расположена значительно глубже, в слое 130–180 см, а преобладающими являются хлорид-анионы. Надо отметить, что чернозем под залежью имеет более легкий гранулометрический состав, чем агрозем на микроповышении (рис. 3). Учитывая ранее установленное влияние гранулометрического состава на солевой профиль ишимских почв ([Сеньков, 2004](#)), выявленные различия между почвами по глубине залегания солевых аккумуляций и профильному их распределению обусловлены этим фактором.

Таким образом, плакорные почвы Ишимской степи имеют солевые аккумуляции на различной глубине, в зависимости от характера увлажнения и гранулометрического состава. Установлены также различия типа и степени засоления почв, обусловленные теми же факторами. Влияние типа использования почв на их солевой профиль требует дальнейших специальных исследований.

Особенности классификационного статуса плакорных почв Ишимской степи в системе WRB (2015)

Региональные особенности педогенеза плакорных почв Ишимской степи хорошо отражаются при классификации по WRB ([IUSS..., 2015](#)). Темногумусовый и агротемногумусовый горизонты почти по всем параметрам (окраска, содержание $C_{орг}$, насыщенность основаниями, оструктуренность) соответствуют критериям горизонта Chernic ([IUSS..., 2015](#)), являющегося диагностическим для Chernozems. Однако ограничение его мощности (≥ 25 см) показывает, что изученные почвы Ишимской степи соответствуют лишь минимальному значению этого критерия, а старозалежная почва (р. 150) не соответствует даже горизонту Mollic (≥ 20 см). В результате она была отнесена нами к группе Calcisol.

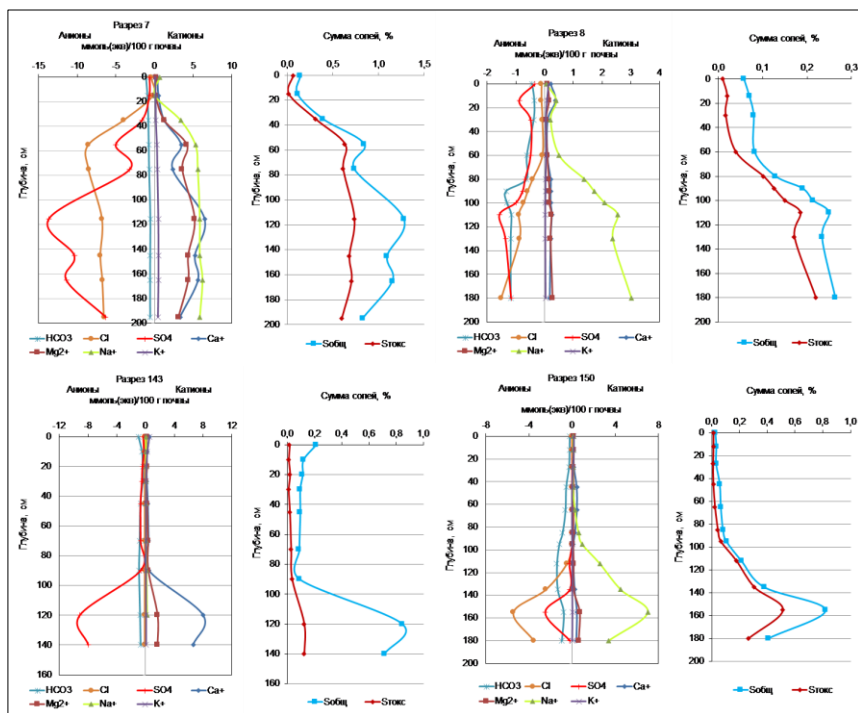


Рис. 5. Солевые профили почв Ишимской степи (по результатам анализа водной вытяжки из почв). Условные обозначения: Собщ – общая сумма солей, Стокс – сумма токсичных солей.

Fig. 5. Distribution of water-soluble salts (cations and anions) in the soils of the Ishim steppe (according to the results of the analysis of water extract from soils). Legend: Собщ – total sum of salts; Стокс – sum toxic salts.

Классификация WRB также хорошо отображает такие региональные особенности почв Ишимской степи как: невысокое содержание карбонатов (Hypocalcic), гипсосодержание (Gypsic), образование глубоких языков-трещин (Tonguichernic, Tonguimollic). Однако глубинная засоленность слабой и средней степени по оценке КИР не соответствует критериям Salic по WRB ([IUSS..., 2015](#)), что отмечалось и ранее ([Smolentseva, 2011](#)). Также глубинный гидроморфизм, диагностированный в трех почвах (табл. 2) в виде пятен оржавления и оглеения, проявляется недостаточно ин-

тенсивно для использования квалификатора Gleyic ([IUSS..., 2015](#)). Таким образом, диагностические критерии КПП ([Классификация и диагностика..., 2004](#); [Полевой определитель..., 2008](#)) позволяют более адекватно отразить особенности педогенеза плакорных почв Ишимской степи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что плакорные почвы Ишимской степи имеют ряд морфологических и химических особенностей, являющихся отражением специфики их педогенеза под влиянием современной динамики среды, в том числе антропогенного фактора.

Массовая распашка привела к качественным субстантивным изменениям в плакорных почвах и замене черноземов на агроземы, которые в настоящее время преобладают на территории Ишимской степи. В агроземах особенности технологической обработки – поверхностной плоскорезной вспашки – на современном этапе привели к разделению типодиагностического агротемногумусового горизонта на два подгоризонта и его вертикальной дифференциации по плотности, структуре и содержанию $C_{орг}$. Региональной морфогенетической особенностью всех плакорных почв Ишимской степи является темная языковатость (yu) и соответствующие модификации карбонатно-аккумулятивного $BCAdc, yu$ и глинисто-иллювиального BUu горизонтов, что отражается на классификационном статусе почв выделением темноязыковатого подтипа.

Организация полезащитных лесонасаждений в Ишимской степи привела к выводу из пашни части агрогенных почв и к их постагрогенной трансформации в течение 45–50 лет. За этот период произошло превращение агротемногумусового горизонта в темногумусовый с постагрогенными признаками и формирование в верхней его части подгоризонта $AUao$ с признаками грубогумусированности, что не свойственно степным почвам. Накопление снега в лесополосах и появление дополнительного поверхностного увлажнения за счет снеготалых вод способствовали углублению верхней границы карбонатного и гипсового горизонтов в профиле почв лесополос. Встречаются также залежные участки, выведен-

ные ранее из пашни, на которых произошло восстановление зональной степной растительности, формирование дернового горизонта, изменение структуры горизонта РU и превращение его в горизонт АU, что свидетельствует о восстановлении почвы до состояния, близкого к целинному.

Дополнительное поверхностное увлажнение в почвах микропонижений вызывает глубокое, по сравнению с почвами нормального увлажнения, выщелачивание карбонатов, формирование глинисто-иллювиального горизонта в бескарбонатной зоне и препятствует образованию гипсового горизонта. Повышение уровня грунтовых вод на современном этапе, которое проявляется особенно заметно в микропонижениях и под полезащитными лесонасаждениями, обуславливает неогидромофизм плакорных почв и формирование квазиглееватых подтипов почв.

Изучение гумусного состояния почв Ишимской степи при различном типе использования показало, что как пахотные, так и постагрогенные почвы характеризуются резко убывающим распределением гумуса по профилю. Это является региональной спецификой степных черноземов Западной Сибири и их агрогенных аналогов и обусловлено особенностями гидротермического режима почв черноземной области Западной Сибири. Он отражается, прежде всего, на количественных параметрах гумусонакопления, определяет специфику профильного распределения гумуса и его запасов. Запас гумуса в слое 0–100 см зависит от дополнительного увлажнения: чем оно больше, тем он выше. Прекращение пахотного режима и постагрогенная трансформация плакорных почв также меняют их гумусное состояние: увеличиваются запасы гумуса и общего азота, особенно в слое 0–20 см, и обогащенность гумуса азотом.

Установлено отсутствие стадии агропочв при агрогенной трансформации целинных черноземов Ишимской степи. Причиной данного факта является малая мощность (25–30 см) их темногумусового горизонта. Поэтому при распашке черноземы дисперсно-карбонатные и черноземы глинисто-иллювиальные, минуя стадию агропочв, сразу превращаются в агроземы темные, в отличие от степных черноземов в европейской части России. Таким образом, отсутствие стадии агропочв (агрочерноземов) является

региональной спецификой агрогенной трансформации черноземов Ишимской степи.

Глубина верхней границы гипсового горизонта в изученных почвах зависит от характера увлажнения и от гранулометрического состава. Зафиксировано также изменение гипсового профиля в почве нормального увлажнения в связи с изменением типа использования. Таким образом, голоценовый процесс гипсонакопления в плакорных почвах Ишимской степи в настоящее время изменяется под влиянием агрогенной трансформации.

Для агроземов выражены потери ила и физической глины в верхней части профиля (агрогенный и постагрогенный горизонты), вероятно, вследствие дефляции. В почве лесополосы отмечается процесс вторичной аккумуляции этих фракций за счет ветрового привноса, а также увеличение их содержания в средней части профиля, что, возможно, обусловлено тенденцией развития глинисто-иллювиального процесса.

Для всех изученных плакорных почв Ишимской степи характерны солевые аккумуляции различной степени, а солевые горизонты локализуются преимущественно в нижней части профиля. Дополнительное поверхностное увлажнение в почвах микроповышений и лесополос и варьирование гранулометрического состава обуславливает диверсификацию солевых профилей как по расположению зоны аккумуляции водорастворимых солей, так и по их составу.

Полученные результаты свидетельствуют о региональной специфике генетических свойств плакорных почв Ишимской степи, отличающих их от европейских аналогов, а также о влиянии на них агрогенной трансформации, что отражается на морфологии почв, их гумусном состоянии, характере карбонатного и гипсового профиля, процессах галогенеза и разнообразии солевых профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаренко М.А., Казеев К.Ш., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1412–1422, DOI: [10.31857/S0032180X20110039](https://doi.org/10.31857/S0032180X20110039).
2. Башкатова Л.Н., Шмидт А.Г. Динамика фосфора и калия в почвах

- степи Омской области // Современное состояние и проблемы рационального использования почв Сибири: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2020. С. 70–75.
3. Безуглова О.С., Минаева Е.Н., Морозов И.В. Генезис карбонатного и гипсоносного горизонтов в черноземах обыкновенных карбонатных // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 4. С. 55–62. DOI: [10.7868/S25001640190407](https://doi.org/10.7868/S25001640190407).
4. Беляев А.Б. Многолетняя динамика свойств черноземов выщелоченных под разными лесонасаждениями // Почвоведение. 2007. № 8. С. 917–926.
5. Беховых Ю.В. Изменение морфологических признаков и некоторых физических свойств черноземов южного и выщелоченного Приобского плато под древесной породой *Betula pendula* // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (161). С. 32–37.
6. Волков И.А. Ишимская степь (рельеф и покровные лессовидные отложения). Новосибирск: Наука, 1965. 75 с.
7. Градобоев Н.Д., Прудникова В.М., Сметанин И.С. Почвы Омской области. Омск: Омское кн. изд., 1960. 374 с.
8. Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н. Современный тренд эрозии пахотных черноземов обыкновенных Приволжской возвышенности (Саратовская область) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1517–1538. DOI: [10.1134/S0032180X18120043](https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043).
9. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2015 году. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2017. 196 с. URL: <http://mcxasc.ru/upload/iblock/74f/74f92a4f3d0c54b09abd64f3054e526b.pdf>.
10. Иванов А.Л., Лебедева И.И., Гребенников А.М. Факторы и условия антропогенной трансформации черноземов, методология изучения эволюции почвообразования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 72. С. 26–46. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-26-46](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46).
11. Ильин В.Б. Агрохимические свойства каштановых почв Кулундинской степи // Почвы Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1967. С. 175–224.
12. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
14. Кленов Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2000. 176 с.
15. Кравцов Ю.В. Подъем грунтовых вод в Ишимской степи // Сибирский экологический журнал. 2009а. № 2. С. 217–222.
16. Кравцов Ю.В. Изменения в режиме влажности плакорных почв

Ишимской степи при подъеме грунтовых вод // Вестник Томского государственного университета. 2009б. № 325. С. 176–181.

17. *Кравцов Ю.В.* Водный режим почв Ишимской степи. Новосибирск: изд-во НГПУ, 2014. 252 с.

18. *Кравцов Ю.В., Жигарев В.О., Перебейнос Г.В.* Гидрологическое состояние почв Ишимской степи в различные по снежности промежутки лет за 1986–2017 гг. // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития. Мат-лы VI Всеросс. науч.-практ. конференции. Новосибирск: изд-во НГПУ, 2017. С. 10–14.

19. *Лебедева И.И.* Гидрологические профили южных черноземов и агрочерноземов // Почвоведение. 2004. № 7. С. 837–846.

20. *Лебедева И.И.* Гумусовые и карбонатные аккумуляции как диагностические критерии в черноземах Восточной Европы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 3–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2011-68-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-3-18).

21. *Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 16–26. DOI: [10.19047/0136-1694-2013-71-16-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-16-26).

22. *Лебедева И.И., Овечкин С.В.* Карбонатный профиль восточно-европейских черноземов // Почвоведение: аспекты, проблемы, решения. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. С. 34–54.

23. *Лисецкий Ф.Н., Родионова М.Е.* Изменение почв сухой степи в результате многовековых агрогенных воздействий (в окрестностях античной Ольвии) // Почвоведение. 2015. № 4. С. 397–409. DOI: [10.7868/S0032180X1504005X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1504005X).

24. *Любимова И.Н.* Постмелиоративная трансформация карбонатного и гипсового профилей солонцовых почв сухостепной зоны // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1299–1308. DOI: [10.1134/S0032180X18110060](https://doi.org/10.1134/S0032180X18110060).

25. *Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахметзянова Р.Р.* Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-182-201](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201).

26. *Морозов И.В., Минаева Е.Н., Безуглова О.С.* О формировании гипсоносного горизонта в черноземах обыкновенных карбонатных // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 3(31). С. 121–131. DOI: [10.31774/2222-1816-2018-3-121-13](https://doi.org/10.31774/2222-1816-2018-3-121-13).

27. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.

28. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
29. Почвообразование и антропогенез: структурно-функциональные аспекты: монография / *Фаткулин Ф.А., Чичулин А.В., Сеньков А.А.* и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 188 с.
30. *Рейнгард Я.Р.* Деградация почв экосистем юга Западной Сибири: монография. Лодзь, 2009. 636 с.
31. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1990. 235 с.
32. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: Изд-во ГЕОС. 2015. 233 с.
33. *Сеньков А.А.* Галогенез степных почв (на примере Ишимской равнины). Новосибирск: изд-во СО РАН, 2004. 152 с.
34. *Слесарев И.В., Кудряшова С.Я.* Гранулометрический состав и водно-физические свойства почв и подстилающих пород // Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, 1988. С. 39–47.
35. *Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Влияние полезащитных лесонасаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область) // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1041–1052. DOI: [10.31857/S0032180X20090166](https://doi.org/10.31857/S0032180X20090166).
36. *Смоленцева Е.Н.* Региональные и зонально-провинциальные особенности черноземов Западной Сибири // Почвы в биосфере, Часть 1. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. С. 105–110.
37. *Смоленцева Е.Н.* Особенности агрогенной трансформации чернозёмов Западной Сибири // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2021. С. 180–184.
38. Теории и методы физики почв / *Шеин Е.В., Карпачевский Л.О.* (ред.). М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
39. Теория и практика химического анализа почв / *Воробьева Л.А.* (ред.). М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
40. *Урусевская И.С., Алябина И.О., Винюкова В.П., Востокова Л.Б., Дорофеева Е.И., Шоба С.А., Щипихина Л.С.* Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. / Добровольский Г.В., И.С. Урусевская И.С. (ред.). Масштаб 1 : 2 500 000. М., 2013. 16 с.
41. *Хитров Н.Б., Герасимова М.И.* Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–14. DOI: [10.31857/S0032180X22010087](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087).

42. Хмелёв В.А. Лёссовые черноземы Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 201 с.
43. Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, 1988. 254 с.
44. Чупрова В.В. Запасы, состав и трансформация органического вещества в пахотных почвах Средней Сибири // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 96–115. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-96-115](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-96-115).
45. Щеглов Д.И. Черноземы центральных областей России: современное состояние и направление эволюции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2003. № 2. С. 187–195.
46. Ямнова И.А., Панкова Е.И. Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение, 2013, № 12. С. 1423–1436. DOI: [10.7868/S0032180X13120125](https://doi.org/10.7868/S0032180X13120125).
47. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. FAO. Rome, 2015. 192 p.
48. Smolentseva E.N. Assessment of soil diversity in Western Siberia using WRB // Advances in Soil Classification, Land use Planning and Policy Implications / S.A. Shahid et al. (Eds). Dubai: International Center for Biosaline Agriculture, 2011. P. 123–132.
49. Yamnova I.A. Salt and gypsum pedofeatures as indicators of soil processes // Dokuchaev Soil Bulletin. 2016. Vol. 86. pp. 96–102. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-96-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-96-102).

REFERENCES

1. Azarenko M.A., Kazeev K.Sh., Ermolaeva O.Yu., Kolesnikov S.I., *Izmenenie rastitel'nogo pokrova i biologicheskikh svoystv chernozemov v postagrogennyi period* (Changes in vegetation cover and biological properties of chernozems in the post-agrogenic period), *Pochvovedenie*, 2020, No. 11, pp. 1412–1422, DOI: [10.31857/S0032180X20110039](https://doi.org/10.31857/S0032180X20110039).
2. Bashkatova L.N., Shmidt A.G., *Dinamika fosfora i kaliya v pochvakh stepi Omskoy oblasti* (Dynamics of phosphorus and potassium in the soils of the steppe of the Omsk region), In: *Sovremennoe sostojanie i problemy racional'nogo ispol'zovaniya pochv Sibiri: mat-ly Mezhdunar nauch-prakt. konf* (Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. “The current state and problems of rational use of soils in Siberia”), Omsk, 2020, pp. 70–75.

3. Bezuglova O.S., Minaeva E.N., Morozov I.V., Genezis karbonatnogo i gipsonosnogo gorizontov v chernozemakh obyknovennykh karbonatnykh (Genesis of carbonate and gypsum-bearing horizons in chernozems ordinary carbonate), *Nauka Yuga Rossii*, 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 55–62, DOI: [10.7868/S25001640190407](https://doi.org/10.7868/S25001640190407).
4. Belyaev A.B., Mnogoletnyaya dinamika svoystv chernozemov vyshchelochennykh pod raznymi lesonasazhdeniyami (Long-term dynamics of properties of chernozems leached under different forest plantations), *Pochvovedenie*, 2007, No. 8, pp. 917–926.
5. Bekhovyykh Yu.V., Izmenenie morfologicheskikh priznakov i nekotorykh fizicheskikh svoystv chernozemov yuzhnogo i vyshchelochennogo Priobskogo plato pod drevesnoy porodoi Betulla pendula (Changes in morphological features and some physical properties of the chernozems southern and leached Priobsky plateau under the Betulla pendula tree species), *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, No. 3 (161), 2018, pp. 32–37.
6. Volkov I.A., *Ishimskaya step' (rel'ef i pokrovnye lessovidnye otlozheniya)* (Ishim steppe (relief and cover loess-like deposits)), Novosibirsk: Nauka, 1965, 75 p.
7. Gradoboev N.D., Prudnikova V.M., Smetanin I.S., *Pochvy Omskoj oblasti* (Soils of the Omsk region), Omsk: Omsk kn. izd-vo, 1960, 374 p.
8. Gusarov A.V., Sharifullin A.G., Golosov V.N., Sovremennyy trend erozii pakhotnykh chernozemov obyknovennykh Privolzhskoy vozvysheynosti (Saratovskaya oblast') (The current trend of erosion of arable chernozems of ordinary Volga upland (Saratov region)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 12, pp. 1517–1538, DOI: [10.1134/S0032180X18120043](https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043).
9. *Doklad o sostojanii i ispol'zovanii zemel' sel'skhozjajstvennogo naznacheniya Rossijskoj Federacii v 2015 godu* (Report on the state and use of agricultural lands of the Russian Federation in 2015), Moscow: FGBNU “Rosinformagrotech”, 2017, 196 p., URL: <http://mcxac.ru/upload/iblock/74f/74f92a4f3d0c54b09abd64f3054e526b.pdf>.
10. Ivanov A.L., Lebedeva I.I., Grebennikov A.M., Factors for anthropogenic transformation of chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 26–46, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-72-26-46](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-26-46).
11. Il'in V.B., Agrokhimicheskie svoystva kashtanovykh pochv Kulundinskoy stepi (Agrochemical properties of chestnut soils of the Kulunda steppe), In: *Pochvy Kulundinskoy stepi* (Soils of the Kulunda steppe), Novosibirsk: Nauka, Sib. od-nie, 1967, pp. 175–224.
12. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils in the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
13. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Ojkumena, 2004, 342 p.

14. Klenov B.M., *Ustojchivost' gumusa avtomorfnykh pochv Zapadnoj Sibiri (Stability of humus of automorphic soils of Western Siberia)*, Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial "GEO", 2000, 176 p.
15. Kravtsov Yu.V. Pod'em gruntovykh vod v Ishimskoy stepi (The rise of groundwater in the Ishim steppe), *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*, 2009a, No. 2, pp. 217–222.
16. Kravtsov Yu.V. Izmeneniya v rezhime vlazhnosti plakornykh pochv Ishimskoy stepi pri pod'eme gruntovykh vod (Changes in the moisture regime of the upland soils of the Ishim Steppe during the rise of groundwater), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009b, No. 325, pp. 176–181.
17. Kravtsov Yu.V., Vodnyy rezhim pochv Ishimskoy stepi (*The water regime of the soils of the Ishim steppe*), Novosibirsk: izd-vo NGPU, 2014, 252 p.
18. Kravtsov Yu.V., Zhigarev V.O., Perebeynos G.V., Gidrologicheskoe sostoyanie pochv Ishimskoy stepi v razlichnye po snezhnosti promezhutki let za 1986–2017 gg. (The hydrological state of the soils of the Ishim steppe in different snow intervals of years for 1986–2017), *Geograficheskaya nauka, turizm i obrazovanie: sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya. Mat-ly VI Vseross. nauch.-prakt. Konferencii* (Proc. VI All-Russian Sci. and Prac. Conf. Geographical science, tourism and education: current problems and development prospects), Novosibirsk: Izd-vo NGPU, 2017, pp. 10–14.
19. Lebedeva I.I., Gidrologicheskie profili yuzhnykh chernozemov i agrochernozemov (Hydrological profiles of southern chernozems and agrochernozems), *Pochvovedenie*, 2004, No. 7, pp. 837–846.
20. Lebedeva I., Humus and carbonate accumulations as diagnostic criteria in the chernozems of Eastern Europe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2011, Vol. 68, pp. 3–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2011-68-3-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-3-18).
21. Lebedeva I.I., Koroleva I.E., Grebennikov A.M., The concept of the evolution of chernozems in agroecosystems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 71, pp. 16–26, DOI: [10.19047/0136-1694-2013-71-16-26](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-71-16-26).
22. Lebedeva I.I., Ovechkin S.V., Karbonatnyy profil' vostochno-evropeyskikh chernozemov (Carbonate profile of Eastern European chernozems), In: *Pochvovedenie: aspekty, problemy, resheniya* (Soil science: aspects, problems, solutions), Moscow: Pochv. Institute im. V.V. Dokuchaeva, 2003, pp. 34–54.
23. Lisetskiy F.N., Rodionova M.E., Izmenenie pochv sukhoy stepi v rezul'tate mnogovekovykh agrogennykh vozdeystviy (v okrestnostyakh antichnoy Ol'vii) (Changes in the soils of the dry steppe as a result of centuries-old agrogenic influences (in the vicinity of ancient Olbia)), *Pochvovedenie*, 2015, No. 4, pp. 397–409, DOI: [10.7868/S0032180X1504005X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1504005X).
24. Lyubimova I.N., Postmeliorativnaya transformatsiya karbonatnogo i gipsovogo profiley solontsovykh pochv sukhostepnoy zony (Post-meliorative transformation of carbonate and gypsum profiles of solonchaks soils of the dry

steppe zone), *Pochvovedenie*, 2018, No. 11, pp. 1299–1308, DOI: [10.1134/S0032180X18110060](https://doi.org/10.1134/S0032180X18110060).

25. Mamontov V.G., Artem'eva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzjanova R.R., Sravnitel'naja harakteristika svojstv celinnogo, pahotnogo i zalezhnogo chernozema tipichnogo Kurskoj oblasti (Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020; No. 101, pp. 182–201, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-182-201](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201).

26. Morozov I.V., Minaeva E.N., Bezuglova O.S., O formirovanii gipsonosnogo gorizonta v chernozemakh obyknovennykh karbonatnykh (On formation of gypsiferous horizon in ordinary carbonated chernozems), *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, 2018, No. 3(31), pp. 121–131, DOI: [10.31774/2222-1816-2018-3-121-13](https://doi.org/10.31774/2222-1816-2018-3-121-13).

27. Orlov D.S., Birjukova O.N., Rozanova M.S., Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostojaniya pochv (Additional indicators of humus state of soils), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.

28. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* (Field guide to soils of Russia), Moscow: Pochv. in-t im V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

29. Fatkulin F.A., Chichulin A.V., Senkov A.A. (Eds), *Pochvoobrazovanie i antropogenez: strukturno-funkcional'nye aspekty: monografija* (Soil formation and anthropogenesis: structural and functional aspect), Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1991, 188 p.

30. Reyngard Ya.R., *Degradatsiya pochv ekosistem yuga Zapadnoy Sibiri* (Soil degradation of ecosystems in the South of Western Siberia), Lodz, 2009, 636 p.

31. *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neytral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv* (Guide to Laboratory Methods for Studying the Ion-Salt Composition of Neutral and Alkaline Mineral Soils), Moscow, VASKHNIL, 1990, 235 p.

32. Semenov V.M., Kogut B.M., *Pochvennoe organicheskoe veshhestvo* (Soil organic matter), Moscow: GEOS, 2015, 233 p.

33. Sen'kov A.A., *Galogenez stepnykh pochv (na primere Ishimskoj ravniny)* (The halogenesis of steppe soils (on the example of the Ishim plain)), Novosibirsk: izd. dom SO RAN, 2004, 152 p.

34. Slesarev I.V., Kudryashova S.Ya., Granulometricheskij sostav i vodno-fizicheskie svoystva pochv i podstilayushchikh porod (Granulometric composition and water-physical properties of soils and underlying rocks), In: *Chernozemy: svoystva i osobennosti orosheniya* (Chernozems: properties and features of irrigation), Novosibirsk: Nauka, 1988, pp. 39–47.

35. Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Chendev Yu.G., Kovach R.G., Vliyanie polezashchitnykh lesonasazhdeniy na lokal'noe raznoobrazie pochv (Belgorodskaya oblast') (Influence of Forest Shelter Belts on Local

Pedodiversity (Belgorod Oblast)), *Pochvovedenie*, 2020, No. 9, pp. 1041–1052, DOI: [10.31857/S0032180X20090166](https://doi.org/10.31857/S0032180X20090166).

36. Smolentseva E.N., Regional'nye i zonal'no-provintsial'nye osobennosti chernozemov Zapadnoy Sibiri (Regional and zonal-provincial features of the chernozems of Western Siberia), In: *Pochvy v biosphere* (Soils in the biosphere), Vol. 1, Tomsk, Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018, pp. 105–110.

37. Smolentseva E.N., Osobennosti agrogennoy transformatsi chernozemov Zapadnoy Sibiri (Features of agrogenic transformation of chernozems in Western Siberia), In: *Pochva kak svyazujushhee zveno funkcionirovaniya prirodnyh i antropogenno-preobrazovannyh jekosistem* (Soil as a Link between the Functioning of Natural and Anthropogenic Systems), Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy universitet, 2021, pp. 180–184.

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

39. Vorob'eva L.A., *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 400 p.

40. Urusevskaja I.S., Aljabina I.O., Vinjukova V.P., Vostokova L.B., Dorofeeva E.I., Shoba S.A., Shhipihina L.S., *Karta pochvenno-jekologicheskogo rajonirovaniya Rossijskoj Federacii* (Map of Soil and Ecological Zoning of the Russian Federation), 1 : 2 500 000, Moscow, 2013, 16 p.

41. Khitrov N.B., Gerasimova M.I., *Predlagaemye izmeneniya v klassifikacii pochv Rossii: diagnosticheskie priznaki i pochvoobrazujushchie porody* (Proposed changes in the classification of soils in Russia: diagnostic signs and soil-forming rocks), *Pochvovedenie*, 2022, No. 1, pp. 3–14, DOI: [10.31857/S0032180X22010087](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087).

42. Khmelev V.A., *Lessovye chernozemy Zapadnoy Sibiri* (Loess chernozems of Western Siberia), Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1989, 201 p.

43. *Chernozemy: svoystva i osobennosti orosheniya* (Chernozems: properties and features of irrigation), Novosibirsk: Nauka, 1988, 254 p.

44. Chuprova V.V., The Organic Matter Pool, Composition and Transformation in Soils of Middle Siberia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 90, pp. 96–115, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-96-115](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-96-115).

45. Shheglov D.I., Chernozemy central'nyh oblastej Rossii: sovremennoe sostojanie i napravlenie jevoljucii (Chernozems of the central regions of Russia: modern state and direction of evolution), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2003, No. 2, pp. 187–195.

46. Jamnova I.A., Pankova E.I., Gypsic pedofeatures and the elementary pedogenetic processes of their formation, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 43,

No. 12, pp. 1117–1129, DOI: [10.1134/S1064229313120089](https://doi.org/10.1134/S1064229313120089).

47. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, No.106, FAO, Rome, 2015, 192 p.

48. Smolentseva E.N., Assessment of soil diversity in Western Siberia using WRB, In: *Advances in Soil Classification, Land use Planning and Policy Implications*, Dubai: International Center for Biosaline Agriculture, 2011, pp. 123–132.

49. Yamnova I.A., Salt and gypsum pedofeatures as indicators of soil processes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 96–102, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-96-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-96-102).

УДК 504.054 : 631.412

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-157-184



Ссылки для цитирования:

Новиков С.Г. Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почв г. Кондопога и г. Костомукша (Республика Карелия) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 157-184. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-157-184

Cite this article as:

Novikov S.G., Assessment of the heavy metal contamination of soils in Kondopoga and Kostomuksha (Republic of Karelia), Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 157-184, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-157-184

Благодарность:

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

Acknowledgments:

The research was financed from the Federal budget to fulfil the State assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute).

Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почв г. Кондопога и г. Костомукша (Республика Карелия)

© 2022 г. С. Г. Новиков

*Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”,
Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,
<https://orcid.org/0000-0003-2387-2656>,
e-mail: novikovsergey.nsg@gmail.com.*

*Поступила в редакцию 24.05.2022, после доработки 04.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022*

Резюме: Исследования проводились на территории г. Кондопоги и г. Костомукши, основная промышленность которых представлена целлюлозно-бумажным производством и добычей железной руды соответственно. На землях различного пользования были отобраны почвенные образцы из верхнего слоя 0–10 см, в которых определяли содержание тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn) методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (вытяжка “царская водка”).

А также были заложены почвенные прикопки, в данном случае отбор проб проводили по слоям – 0–5, 5–10, 10–20 см, в отобранных образцах определяли их физико-химические свойства и содержание тяжелых металлов. Показано, что почвы обследованных городов имеют низкий уровень загрязнения тяжелыми металлами. На территории г. Кондопога выявлены локальные участки на землях общего пользования, где содержание отдельных элементов превышает установленные в Российской Федерации нормативы (Pb – 6 ПДК, Cu – 9 ОДК, Zn – 16 ОДК), концентрации подвижных форм меди и цинка достигают 2–3 ПДК. Почвы г. Костомукши отличаются невысокими уровнями накопления исследуемых тяжелых металлов, в целом их концентрации не превышают уровень регионального фона на всех выделенных категориях землепользования. И лишь в отдельных случаях концентрация поллютантов (Pb, Ni, Cu, Zn) достигает 1–2 ПДК/ОДК. Полученные данные могут быть использованы при проведении мониторинга состояния городских почв, а также для разработки рекомендаций, направленных на сохранение окружающей среды.

Ключевые слова: городские почвы, почвенный мониторинг, уровень загрязнения.

Assesment of the heavy metal contamination of soils in Kondopoga and Kostomuksha (Republic of Karelia)

© 2022 S. G. Novikov

*Forest Research Institute of the Karelian Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
11 Pushkinskaya Str., 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia,
<https://orcid.org/0000-0003-2387-2656>,
e-mail: novikovsergey.nsq@gmail.com.*

Received 24.05.2022, Revised 04.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: Surveys were carried out in Kondopoga and Kostomuksha, where the main industries are pulp-and-paper making and iron ore mining and concentration, respectively. Samples were taken from the top 0–10 cm soil layer in sites belonging to different land use categories and the content of heavy metals (Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn) in the samples was determined by atomic absorption spectrophotometry (Aqua Regia extract). In addition, subsidiary soil pits were made for sampling at 0–5, 5–10, and 10–20 cm depths. These samples were analyzed for physico-chemical properties and

heavy metal content. The results showed a relatively low level of heavy metal pollution of soil in the mentioned towns. Surveys in Kondopoga revealed limited general-use areas containing some elements in concentrations exceeding Russian national maximum allowable (MAC) and tentative allowable (TAC) levels (Pb – 6x MAC, Cu – 9x TAC, Zn – 16x TAC), and with labile copper and zinc concentrations up to 2x–3x MAC. Soils of Kostomuksha exhibited relatively low levels of the analyzed heavy metals with concentrations generally not exceeding the regional background in all land use categories. It was only occasionally that pollutant concentrations (Pb, Ni, Cu, Zn) reached 1–2x MAC/TAC. The resultant data can be used in the monitoring of urban soils and for working out recommendations for environmental protection.

Keywords: urban soils, soil monitoring, pollution level.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высокие темпы урбанизации оказывают мощное негативное воздействие на окружающую среду. Хозяйственная деятельность человека способствует загрязнению различных компонентов естественных экосистем. Значительная техногенная нагрузка падает на почвы, которые являются одним из основных аккумуляторов поллютантов. Ведущими и наиболее опасными химическими загрязнителями на городской территории по токсикологическим оценкам и воздействию на здоровье населения становятся тяжелые металлы ([Bruemmer, 1986](#); [Bidwell, Dowdy, 1987](#); [Сает и др., 1990](#); [Щербо, Киселев, 2004](#); [Калашникова, 2003](#); [Пляскина, Ладонин, 2009](#)). Они связываются с минеральными и органическими соединениями ([Ramakrishnaiah, Somashekar, 2002](#); [Джувеликян, 2005](#)), что повышает общий уровень токсичности почвы. Главную роль в связывании катионов металлов играют гуминовые вещества ([Демин, 1994](#)), которые взаимодействуют друг с другом на основе явлений ионного обмена, сорбции, хелатообразования, коагуляции и пептизации ([Байдина, 1994](#)). Большое влияние на поведение тяжелых металлов оказывает кислотность почвы ([Зырин, 1968](#); [Беус, 1976](#)).

Как правило, при экологическом мониторинге техногенно загрязненных почв, принято определять валовое содержание тяжелых металлов, а также извлекаемых смесью крепких растворов кислот (условно валовое содержание) ([Методические указания...](#)

[1992](#)). По нормативным документам инженерно-экологических изысканий ([Свод правил..., 1998](#)) предусмотрено обязательное определение показателей загрязнения почв тяжелыми металлами ввиду их индикационного значения. Если их концентрации не превышают фоновые, то исследования на предмет других видов загрязнения не проводят ([Стурман, 2003](#)). Исследование содержания тяжелых металлов в почвах, находящихся в условиях урбанизации, должно проводиться с учетом функций и типа землепользования на обследуемой территории, так как данный фактор является формирующим в развитии городских почв ([Почва, город, экология, 1997](#)).

Данная статья посвящена оценке уровня загрязнения тяжелыми металлами почв различных категорий землепользования на территории монопрофильных городов Республики Карелии – г. Кондопога, г. Костомукша. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) Выделить основные категории землепользования на территории исследуемых городов; 2) Определить содержание тяжелых металлов в поверхностном слое почв (0–10 см) обследуемых городов; 3) Определить физико-химические свойства и содержание различных форм тяжелых металлов (вытяжка “царская водка”, вытяжка $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) на разных глубинах поверхностного слоя почв (0–5, 5–10, 10–20 см); 4) Оценить уровень загрязнения городских почв тяжелыми металлами.

Предприятия Карелии ежегодно выбрасывают в окружающую среду более 130 тыс. т различных загрязнителей ([Государственный доклад..., 2010; 2015](#)). Значительный вклад в загрязнение воздуха вносят передвижные источники загрязнения – железнодорожный и автомобильный транспорт. Усугубляют экологическую обстановку в городах выбросы печного отопления домов частного сектора, занимающих значительную часть селитебных территорий кварталов усадебной застройки ([Почва, город, экология, 1997](#)). Ранее поверхностный слой почв г. Кондопоги и г. Костомукши исследовался на наличие загрязнения тяжелыми металлами (Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn) по суммарному показателю Zc ([Новиков, 2015; 2016; 2017](#)). Полученные результаты показали, что на всей обследуемой территории городов показатель Zc < 16,

что соответствует допустимой категории загрязнения, лишь на одной пробной площадке в г. Кондопога и одной в г. Костомукша Z_c превышал значение 16, данные участки расположены на территории автогаражей, где почвы подвержены интенсивному техногенному воздействию, а также захламлены техническим мусором.

Данное исследование позволит получить сведения о состоянии почв обследуемых городов в зависимости от категории землепользования, установить зоны наиболее уязвимые к антропогенному воздействию, а также более подробно проанализировать содержание различных форм тяжелых металлов (вытяжка “царская водка”, вытяжка $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) в поверхностном слое почв на разных глубинах (0–5, 5–10, 10–20 см).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории двух городов Республики Карелии – Кондопога и Костомукша (рисунок).

Город Кондопога расположен в среднетаежной подзоне Карелии. Он находится между двух озер: на юге граничит с Онежским озером, на севере – с озером Нигозеро. Несмотря на то, что Кондопожское поселение имеет более чем вековую историю, статус города оно получило лишь в 1938 году. На территории Кондопоги в 1929 году впервые был запущен Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат (АО “Кондопожский ЦБК”), который в настоящее время является основным промышленным предприятием города. По оценке РОССТАТ численность постоянного населения Кондопоги на 1 января 2022 г. составляет 28 150 человек.

Город Костомукша расположен в северотаежной подзоне Карелии на восточном берегу озера Контолки вблизи границы России и Финляндии. Он основан в 1977 г. в связи с разработкой железорудного месторождения. Население города по оценке РОССТАТ на 1 января 2022 г. составляет 29 739 человек. Комбинат по добыче и переработке железной руды АО “Карельский окатыш” на территории Костомукши является градообразующим предприятием и функционирует с 1974 г. Промышленная площадка комбината находится на расстоянии 13 км от города.

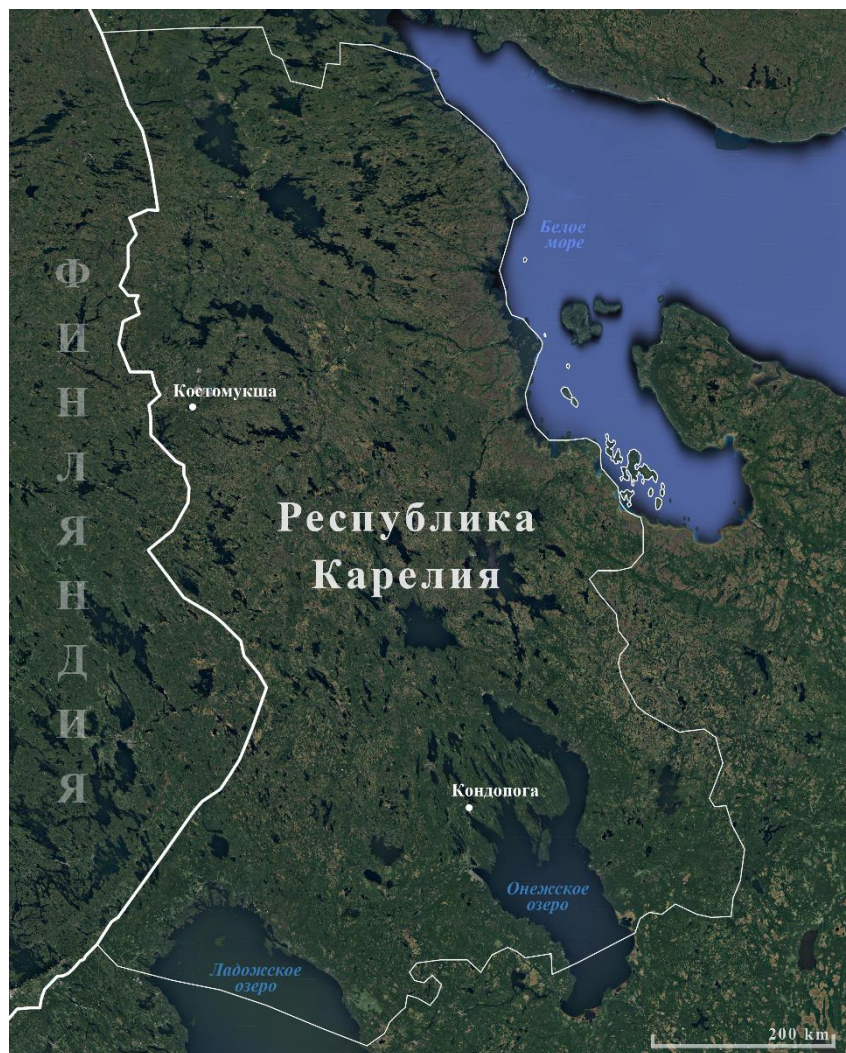


Рис. Расположение обследуемых городов на территории Республики Карелии (картографические данные © Google, 2022).

Fig. Location of surveyed towns on the territory of the Republic of Karelia (© Google, 2022).

Отбор почвенных образцов на обследуемых городских территориях проводили методом “конверта” из верхнего 10-сантиметрового слоя почв ([Почва, город экология, 1997](#); [Стурман, 2003](#)). Категория землепользования в местах отбора проб определялась в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе ([Почва, город экология, 1997](#)). Всего на территории г. Кондопоги было отобрано 37 смешанных почвенных проб, г. Костомукши – 44. В них определяли условно валовое содержание следующих тяжелых металлов: Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn (вытяжка “царская водка”) методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (спектрофотометр AA-7000, Shimadzu, Япония). После получения результатов на участках с наибольшим количеством тяжелых металлов в почве были заложены прикопки – по 3 на каждой выделенной категории землепользования. В данном случае почвенные образцы отбирали по слоям 0–5, 5–10, 10–20 см. В отобранных пробах определяли следующие агрохимические показатели: pH солевой вытяжки, степень насыщенности основаниями, валовое содержание углерода и азота ([Агрохимические методы..., 1975](#)), подвижные соединения фосфора и калия определяли в одной вытяжке по методу Кирсанова: окончание анализа (K_2O) – на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония), (P_2O_5) – на фотоэлектроколориметре. Также в почвенных образцах, отобранных из прикопок, проводили определение содержания тяжелых металлов в вытяжке “царская водка” и их подвижных форм (Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn – вытяжка CH_3COONH_4 , Pb – вытяжка NH_4Cl) методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (спектрофотометр AA-7000, Shimadzu, Япония). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук” (Аналитическая лаборатория ИЛ КарНЦ РАН).

Оценку уровня загрязнения городских почв тяжелыми металлами проводили при помощи эмпирического показателя PLI (Pollution load index), который учитывает фактическое содержание загрязнителей в почве на исследуемой территории, а также региональный фон ([Tomlinson et al., 1980](#); [Peng et al., 2016](#); [Rashed, 2010](#); [Islam et al., 2015](#)). PLI рассчитывался следующим образом:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \dots \times CF_n},$$

где CF (Concentration factor) – коэффициент концентрации химического вещества, рассчитанный для каждого отдельного элемента, n – число исследуемых элементов. CF рассчитывался по формуле:

$$CF = \frac{c_i}{cb_i},$$

где C_i – фактическое содержание металла в почве, Cb_i – региональный фон.

Если $PLI > 1$ – почва характеризуется как химически загрязненная, а при $PLI < 1$ загрязнение отсутствует ([Tomlinson et al., 1980](#)). Для показателя CF использовали следующую градацию ([Hakanson, 1980](#)): $CF < 1$ – низкий уровень загрязнения; $1 < CF < 3$ – умеренный уровень загрязнения; $3 < CF < 6$ – значительный уровень загрязнения; $CF > 6$ – высокий уровень загрязнения.

В работе также рассчитывали показатель CD (Contamination degree), по формуле:

$$CD = CF_1 + CF_2 \dots + CF_n,$$

который показывает степень общего загрязнения исследуемых почв. В соответствии с [Hakanson \(1980\)](#) степень загрязнения (CD) классифицируется следующим образом: $CD < 6$ – низкая; $6 \leq CD < 12$ – умеренная; $12 \leq CD < 24$ – значительная; $CD \geq 24$ – очень высокая.

В качестве регионального фонового показателя использовали среднее содержание тяжелых металлов в минеральных подстиловых горизонтах почв Карелии ([Федорец и др., 2008](#)).

Полученные данные сравнивали с действующими в России в настоящее время гигиеническими нормативами, представленными в СанПиН 1.2.3685-21 (табл. 1).

Табл. 1. Гигиенические нормативы содержания тяжелых металлов в почве

Table. 1. Hygienic standards for the content of heavy metals in the soil

Показатель	Pb, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Ni, мг/кг	Co, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг
ПДК	$\frac{32}{6}$	$\frac{-}{3}$	$\frac{-}{23}$	$\frac{-}{4}$	$\frac{-}{5}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{1500}{80}$
ОДК	32	33	55	20	—	—	—

Примечание. ПДК (Предельно допустимая концентрация), в числителе по валовому содержанию, в знаменателе по подвижным формам, ОДК (Ориентировочная допустимая концентрация) по валовому содержанию.

Note. MAC (maximum allowable concentration), numerator – total content, denominator – labile forms, TAC (tentative allowable concentration) of the total content of heavy metals.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований на территории г. Кондопоги и г. Костомукши выделены земли трех основных категорий:

- земли городской застройки – жилая часть (внутридворовые пространства, скверы, детские сады, школы и т. д.);
- земли общего пользования – промышленная зона (заводы, автохозяйства, склады, АЗС, крупные автодороги, железные дороги и т. д.);
- земли природно-рекреационной зоны (городские леса, лесопарки, парки, бульвары, скверы и т. д.);

Установлено, что данные по условно валовому содержанию большинства тяжелых металлов в поверхностном слое почв обследуемых городов сильно рассеяны от среднего значения независимо от категории землепользования. В данном случае для характеристики среднего содержания элементов в почве целесообразно использовать значение медианы или любые другие методы усреднения, так как среднее арифметическое сильно зависит от небольшого числа образцов с максимально высокими значениями ([Shacklette, Boerngen, 1984](#); [Kabala et al., 2009](#)). В таблице 2 пред-

ставлены значения медиан, а также максимальные и минимальные значения условно валового содержания тяжелых металлов в почвах обследуемых городов. На территории г. Кондопоги средняя концентрация поллютантов первого класса опасности незначительно превышает уровень регионального фона: свинца – на землях общего пользования и природно-рекреационной зоны, цинка – на землях общего пользования и городской застройки. Также выявлено превышение фона по содержанию меди – металла второго класса опасности – на каждой из выделенных категорий землепользования. Территория г. Костомукши характеризуется низкими концентрациями поллютантов, их среднее содержание находится в пределах регионального фонового значения. Это объясняется тем, что город расположен на удаленном расстоянии от промышленной площадки горно-обогатительного комбината (13 км), а также его молодым возрастом (45 лет).

На территории Кондопожского района самым крупным промышленным предприятием является АО “Кондопожский ЦБК”. Известно, что целлюлозно-бумажная промышленность оказывает негативное воздействие на все компоненты окружающей среды ([Литучина и др., 2011](#); [Gavrilescu et al., 2012](#)). При производстве целлюлозы образуются газопылевые выбросы, загрязняющие атмосферный воздух и, при оседании, – почвы ([Лаптева и др., 2021](#)). Однако основной удар приходится на водные объекты из-за большого количества сбросов ([Балакшин, 2004](#)).

Почвы г. Кондопоги на землях всех выделенных категорий не загрязнены никелем, кобальтом, хромом и марганцем, это подтверждается рассчитанными средними коэффициентами их концентрации – $CF < 1$ (табл. 3). На землях городской застройки этот показатель для свинца также < 1 . Для других поллютантов значение CF находится в диапазоне $1 < CF < 3$, что соответствует умеренному типу загрязнения. Однако значения превышают единицу несущественно, то есть концентрация тяжелых металлов находится фактически на уровне регионального фона.

Независимо от категории землепользования степень загрязнения тяжелыми металлами исследованных почв (CD) характеризуется как низкая – $CD < 6$.

Табл. 2. Содержание тяжелых металлов в поверхностном слое почв (10 см) различного землепользования на территории обследуемых городов, мг/кг (вытяжка “царская водка”)

Table 2. The content of heavy metals in the surface layer of soils (10 cm) of different land uses on the territory of the surveyed cities, mg/kg (extract “Aqua regia”)

	г. Кондопога							г. Костомукша						
	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
	Земли общего пользования (n = 13)							Земли общего пользования (n = 5)						
Мин. знач.	3.8	12.0	15.8	5.9	1.7	4.8	89.6	1.5	6.9	14.4	6.0	1.0	14.7	69.8
Макс. знач.	237.2	225.0	276.5	25.0	5.2	17.6	309.2	183.8	353.9	189.5	17.2	6.9	31.3	265.6
Медиана	17.3	29.9	41.8	14.7	3.5	10.9	251.2	8.7	10.2	23.3	14.0	3.9	24.6	158.3
	Земли городской застройки (n = 19)							Земли городской застройки (n = 18)						
Мин. знач.	4.1	7.8	20.2	5.1	1.6	5.3	95.7	1.9	2.9	4.9	3.3	1.3	9.2	25.0
Макс. знач.	43.5	57.3	155.9	22.2	5.5	17.1	376.7	22.5	384.0	129.2	13.7	6.0	26.4	467.3
Медиана	11.4	23.4	43.4	11.6	2.8	10.2	184.7	5.2	11.3	21.2	10.1	4.0	22.0	116.3
	Земли природно-рекреационной зоны (n = 5)							Земли природно-рекреационной зоны (n = 21)						
Мин. знач.	5.6	6.2	12.1	6.8	1.4	6.7	59.5	2.6	2.0	5.4	2.5	1.1	5.8	18.2
Макс. знач.	77.0	54.2	116.7	23.7	5.8	15.9	352.3	35.1	13.9	29.6	15.6	5.9	20.9	144.0
Медиана	17.7	19.6	37.1	12.2	2.8	8.8	279.9	6.2	4.3	11.4	5.4	1.7	12.3	57.5
Рег. фон	15.5	18.5	37.2	27.5	11.6	47.3	282	15.5	18.5	37.2	27.5	11.6	47.3	282

Табл. 3. Показатели загрязнения верхнего слоя почв (0–10 см) на территории г. Кондопоги

Table 3. Indexes of contamination of the upper soil layer (0–10 cm) in Kondopoga

Категория земле- пользования	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	CD	PLI
	CF								
Земли общего пользования	1.11	1.62	1.12	0.53	0.30	0.23	0.89	5.82	0.68
Земли городской застройки	0.73	1.26	1.17	0.42	0.24	0.91	0.65	5.39	0.68
Земли природно- рекреационной зоны	1.14	1.06	1.00	0.44	0.24	0.19	0.99	5.06	0.59

Рассчитанный показатель максимален для земель общего пользования, где почвы испытывают наиболее высокие техногенные нагрузки.

Показатель уровня загрязнения PLI для почв города Кондопоги не достигает значения 1. Это говорит о том, что в целом загрязнение почв тяжелыми металлами отсутствует.

Почвы на землях городской застройки г. Кондопоги характеризуются кислой, слабокислой реакцией среды – pH 4.2–5.6. Земли общего пользования заметно подщелочены, показатель pH находится на уровне 7.0–7.8. Для почв природно-рекреационной зоны характерна кислая реакция – pH 3.8–5.3. В отдельном случае в лесном массиве вдоль крупной автодороги реакция pH слабощелочная – 7.3–7.8. Наиболее насыщены основаниями почвы на землях общего пользования (83.8–99.6%) и природно-рекреационной зоны (71.5–99.7%) по всей глубине прикопок. На землях городской застройки степень насыщенности основаниями изменяется в пределах от 46.8 до 84.4%. Максимальная концентрация подвижных форм калия (до 3 704 мг/кг) выявлена в почвенных образцах, отобранных на открытом наветренном склоне от городских улиц к Онежскому озеру. На расстоянии 600 м вдоль береговой линии от данного участка расположена промышленная площадка Кондопожского ЦБК. Причиной высоких концентраций элемента могут являться техногенные выбросы, а также использование антигололедных реагентов, содержащих калий, которые с талой водой по склону попадают в почву. Высокие концентрации подвижного фосфора (до 968 мг/кг) выявлены на пробной площадке, расположенной вблизи железнодорожных путей. В целом среднее содержание подвижных форм фосфора и калия в почвах г. Кондопоги без учета экстремально высоких значений составляет 46 и 251 мг/кг соответственно. Повышенные концентрации данных элементов приурочены к землям общего пользования и городской застройки. Количество углерода и азота равномерно снижается по глубине и максимально в почвах земель городской застройки (13.8 и 0.98% соответственно).

Содержание тяжелых металлов на различных глубинах поверхностного слоя почв (0–20 см) г. Кондопоги представлено в таблице 4. Повышенные концентрации свинца, меди, никеля и

цинка относительно ПДК/ОДК, извлекаемые вытяжкой “царская водка”, определены на всех представленных категориях землепользования.

Максимальное содержание тяжелых металлов выявлено в почвенных образцах, отобранных вблизи железной дороги, где значение ПДК/ОДК по валовому содержанию цинка превышено в 16, меди – в 9 и свинца – в 6 раз, концентрации подвижных форм меди и цинка достигают 2–3 ПДК. Почвы на землях городской застройки характеризуются неравномерным распределением тяжелых металлов по глубине. Концентрации никеля и меди в данном случае находятся на уровне 1–2 ОДК, цинка – до 6 ОДК, свинца – до 3 ПДК (вытяжка “царская водка”). Выявлено превышение норматива по содержанию подвижных форм цинка в поверхностном слое почв (0–5 см) в 3 раза. На землях природно-рекреационной зоны отмечены повышенные относительно нормативов концентрации марганца. Это связано с тем, что марганец, являясь биофильным элементом, принимает участие в окислительно-восстановительных процессах, фотосинтезе, дыхании, углеводном и белковом обмене ([Mukhopadhyay, Sharma, 1991](#)). В связи с вышесказанным происходит его биогенное накопление в поверхностных горизонтах почвы, в частности, в лесной подстилке, формирующейся из растительного опада. Образцы, отобранные на территории небольших скверов в черте города, отличаются высоким условно валовым содержанием свинца (4 ПДК), цинка (8 ОДК) и меди (4 ОДК). Содержание кобальта по профилю остается примерно на одном уровне независимо от категории землепользования.

На территории Костомукшского городского округа основной промышленности является добыча железной руды, что, как известно, приводит к повышенной техногенной нагрузке на окружающую среду и является источником ее загрязнения промышленными отходами, такими как вскрышные породы, не утилизируемые отходы и шламы обогащения, которые в основном не утилизируются и, как следствие, загрязняют тяжелыми металлами атмосферный воздух, почву и водные объекты вокруг отвалов ([Пантелеева, 2009](#); [Брондер и др., 2014](#)).

Табл. 4. Содержание тяжелых металлов на различных глубинах поверхностного слоя почв (0–20 см) г. Кондопоги ($M \pm m$, где M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего, $n = 3$)

Table 4. The content of heavy metals at different depths of the surface layer of soils (0–20 cm) in Kondopoga ($M \pm m$, M – arithmetic mean, m – standard error of mean, $n = 3$)

Глубина, см	Pb, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг
земли городской застройки							
0–5	$\frac{37 \pm 23.3}{2.77 \pm 1.01}$	$\frac{7 \pm 0.6}{2.55 \pm 1.14}$	$\frac{20 \pm 3.7}{1.68 \pm 0.93}$	$\frac{42 \pm 11.9}{0.90 \pm 0.52}$	$\frac{180 \pm 75.2}{37.9 \pm 20.5}$	$\frac{47 \pm 5.5}{1.77 \pm 0.33}$	$\frac{329 \pm 108.2}{17.7 \pm 2.37}$
5–10	$\frac{25 \pm 15.4}{3.32 \pm 1.15}$	$\frac{8 \pm 1.7}{1.56 \pm 0.78}$	$\frac{22 \pm 4.0}{2.52 \pm 1.12}$	$\frac{39 \pm 7.5}{1.05 \pm 0.59}$	$\frac{121 \pm 45.5}{13.4 \pm 7.8}$	$\frac{47 \pm 5.5}{3.22 \pm 1.23}$	$\frac{348 \pm 121.1}{12.0 \pm 1.02}$
10–20	$\frac{24 \pm 15.3}{2.90 \pm 2.34}$	$\frac{8 \pm 3.1}{1.15 \pm 0.78}$	$\frac{17 \pm 6.2}{0.91 \pm 0.64}$	$\frac{51 \pm 21.6}{0.52 \pm 0.19}$	$\frac{121 \pm 61.8}{11.7 \pm 9.6}$	$\frac{40 \pm 8.3}{3.03 \pm 1.71}$	$\frac{356 \pm 178.5}{7.17 \pm 3.86}$
земли общего пользования							
0–5	$\frac{86 \pm 41.8}{0.67 \pm 0.21}$	$\frac{15 \pm 1.0}{0.32 \pm 0.04}$	$\frac{38 \pm 2.7}{0.45 \pm 0.02}$	$\frac{109 \pm 25.3}{1.62 \pm 1.08}$	$\frac{282 \pm 152.2}{28.2 \pm 21.7}$	$\frac{75 \pm 9.3}{0.78 \pm 0.23}$	$\frac{485 \pm 21.9}{13.4 \pm 2.92}$
5–10	$\frac{75 \pm 52.7}{0.97 \pm 0.11}$	$\frac{13 \pm 1.3}{0.43 \pm 0.08}$	$\frac{41 \pm 2.1}{0.40 \pm 0.10}$	$\frac{164 \pm 61.5}{2.62 \pm 1.59}$	$\frac{375 \pm 247.6}{29.7 \pm 23.2}$	$\frac{94 \pm 17.6}{1.02 \pm 0.47}$	$\frac{1121 \pm 583.8}{26.5 \pm 17.8}$
10–20	$\frac{51 \pm 15.1}{0.76 \pm 0.07}$	$\frac{12 \pm 2.6}{0.37 \pm 0.04}$	$\frac{29 \pm 6.4}{0.36 \pm 0.11}$	$\frac{114 \pm 20.2}{2.46 \pm 1.63}$	$\frac{151 \pm 21.6}{25.8 \pm 18.0}$	$\frac{59 \pm 16.9}{0.56 \pm 0.20}$	$\frac{386 \pm 94.1}{11.8 \pm 4.35}$

Продолжение таблицы 4

Table 4 continued

Глубина, см	Pb, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг
земли природно-рекреационной зоны							
0–5	$\frac{59 \pm 43.7}{3.25 \pm 2.38}$	$\frac{13 \pm 3.7}{0.33 \pm 0.03}$	$\frac{36 \pm 12.4}{0.24 \pm 0.09}$	$\frac{53 \pm 28.8}{0.38 \pm 0.06}$	$\frac{198 \pm 131.6}{24.8 \pm 23.4}$	$\frac{80 \pm 20.0}{1.05 \pm 0.46}$	$\frac{814 \pm 414.3}{58.2 \pm 29.7}$
5–10	$\frac{67 \pm 37.6}{3.06 \pm 1.99}$	$\frac{17 \pm 6.6}{0.26 \pm 0.07}$	$\frac{42 \pm 16.6}{0.23 \pm 0.07}$	$\frac{58 \pm 38.7}{0.79 \pm 0.51}$	$\frac{84 \pm 31.7}{0.78 \pm 0.37}$	$\frac{81 \pm 21.8}{0.97 \pm 0.33}$	$\frac{731 \pm 293.6}{99.4 \pm 86.3}$
10–20	$\frac{42 \pm 36.6}{1.05 \pm 0.15}$	$\frac{15 \pm 6.4}{0.31 \pm 0.06}$	$\frac{37 \pm 15.9}{0.28 \pm 0.06}$	$\frac{56 \pm 39.8}{0.93 \pm 0.58}$	$\frac{81 \pm 27.0}{0.85 \pm 0.15}$	$\frac{74 \pm 23.1}{0.83 \pm 0.28}$	$\frac{583 \pm 286.4}{110.8 \pm 98.1}$

Примечание. В числителе вытяжка “царская водка”, в знаменателе подвижные формы.

Note. The numerator – “Aqua Regia” extract, the denominator – labile forms of heavy metals.

Однако, по полученным результатам, поверхностный слой почв на территории г. Костомукши не загрязнен тяжелыми металлами. Рассчитанные коэффициенты их концентраций (CF) меньше единицы, судя по показателю PLI, загрязнение почв отсутствует (табл. 5).

Табл. 5. Показатели загрязнения верхнего слоя почв (0–10 см) на территории г. Костомукши

Table 5. Indexes of contamination of the upper soil layer (0–10 cm) in Kostomuksha

Категория земле-пользования	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	CD	PLI
	CF								
Земли общего пользования	0.56	0.55	0.63	0.51	0.34	0.52	0.56	3.67	0.52
Земли городской застройки	0.33	0.61	0.57	0.37	0.34	0.46	0.41	3.10	0.43
Земли природно-рекреационной зоны	0.40	0.23	0.31	0.20	0.15	0.26	0.20	1.75	0.24

Кислотность почв городской застройки г. Костомукши находится на уровне pH 4–5 – кислая реакция. На землях природно-рекреационной зоны показатель pH близок к естественным почвам и варьирует в пределах от 2.7 до 4. На землях общего пользования выявлено подщелачивание почв – реакция близкая к нейтральной (pH 5.5–6.9). Наиболее высокая степень насыщенности основаниями определена в почвах на землях общего пользования (80–90%). В целом городские почвы обогащены подвижными формами фосфора и калия, их среднее содержание без учета экстремально высоких значений составляет 49 мг/кг и 230 мг/кг. Максимальные концентрации P_2O_5 (95 мг/кг) и K_2O (845 мг/кг) определены в почвенных образцах, отобранных на землях природно-рекреационной зоны в северной части города, на участке

отмечены фрагменты строительного и бытового мусора. Содержание общего азота и углерода максимально в верхних слоях почв 0–5 см, и находится на уровне 0.1–0.3 и 1.5–5% соответственно. Лишь в одном случае на землях природно-рекреационной зоны на территории заболоченного участка, где верхние слои почв представлены оторфованными горизонтами, содержание общего азота достигает 1.7%, углерода – 54%.

Распределение тяжелых металлов в почвах города Костомукши представлено в таблице 6. В целом концентрации подвижных форм элементов и извлекаемые вытяжкой “царская водка” снижаются по глубине. На землях общего пользования вблизи автостоянки и комплекса автогаражей выявлено превышение в 2 раза ПДК по валовому содержанию свинца в верхних слоях почв (0–10 см), однако концентрация подвижных форм находится в пределах нормы. На территории поселка Контолки (земли городской застройки), который входит в состав города, значение ПДК подвижных форм свинца превышено на глубине 5–10 см. В почвенных образцах, отобранных в пригородном лесу восточной части города, в вытяжке “царская водка” определено повышенное содержание свинца, никеля, меди и цинка (1.5–2 ОДК/ПДК) на глубине 0–5 см, концентрация подвижных форм цинка в данном случае достигает 1 ПДК. Данный слой представлен задернованной лесной подстилкой, в нижележащих минеральных горизонтах концентрация элементов значительно ниже, это свидетельствует об аэротехногенном поступлении поллютантов.

Таким образом, проведены исследования содержания тяжелых металлов и некоторых физико-химических свойств поверхностного слоя почв на территории двух монопрофильных городов Карелии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды Республики Карелия, АО “Кондопожский ЦБК” и АО “Карельский окатыш” являются одними из основных загрязнителей окружающей среды ([Государственный доклад..., 2021](#)).

Табл. 6. Содержание тяжелых металлов на различных глубинах поверхностного слоя почв (0–20 см) г. Костомукши ($M \pm m$, где M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего, $n = 3$)

Table 6. The content of heavy metals at different depths of the surface layer of soils (0–20 cm) in Kostomuksha ($M \pm m$, M – arithmetic mean, m – standard error of mean, $n = 3$)

Глубина, см	Pb, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг
земли общего пользования							
0–5	$\frac{40 \pm 11.0}{0.82 \pm 0.31}$	$\frac{6 \pm 1.0}{0.51 \pm 0.17}$	$\frac{16 \pm 2.2}{0.34 \pm 0.03}$	$\frac{18 \pm 5.6}{0.36 \pm 0.11}$	$\frac{49 \pm 19.4}{3.22 \pm 2.04}$	$\frac{37 \pm 4.7}{0.95 \pm 0.39}$	$\frac{113 \pm 39.9}{3.65 \pm 2.00}$
5–10	$\frac{16 \pm 9.4}{0.95 \pm 0.25}$	$\frac{6 \pm 1.4}{0.58 \pm 0.17}$	$\frac{15 \pm 3.1}{0.35 \pm 0.15}$	$\frac{17 \pm 2.8}{0.26 \pm 0.14}$	$\frac{44 \pm 17.2}{1.01 \pm 0.48}$	$\frac{35 \pm 5.4}{1.77 \pm 0.43}$	$\frac{117 \pm 39.1}{2.16 \pm 0.58}$
10–20	$\frac{14 \pm 5.1}{0.61 \pm 0.12}$	$\frac{8 \pm 1.4}{0.36 \pm 0.03}$	$\frac{18 \pm 4.7}{0.26 \pm 0.09}$	$\frac{18 \pm 2.8}{0.35 \pm 0.15}$	$\frac{38 \pm 10.4}{0.59 \pm 0.28}$	$\frac{36 \pm 5.5}{1.63 \pm 0.43}$	$\frac{136 \pm 37.2}{1.82 \pm 0.34}$
земли городской застройки							
0–5	$\frac{24 \pm 12.8}{2.52 \pm 0.84}$	$\frac{9 \pm 1.8}{2.89 \pm 2.05}$	$\frac{14 \pm 2.4}{0.53 \pm 0.21}$	$\frac{11 \pm 1.3}{0.65 \pm 0.54}$	$\frac{19 \pm 7.2}{0.82 \pm 0.36}$	$\frac{29 \pm 4.6}{3.37 \pm 2.41}$	$\frac{103 \pm 20.8}{7.0 \pm 5.45}$
5–10	$\frac{21 \pm 8.9}{1.64 \pm 0.62}$	$\frac{6 \pm 1.4}{0.78 \pm 0.18}$	$\frac{17 \pm 0.9}{0.18 \pm 0.05}$	$\frac{12 \pm 4.0}{0.38 \pm 0.17}$	$\frac{21 \pm 3.4}{0.62 \pm 0.45}$	$\frac{26 \pm 1.6}{1.46 \pm 0.65}$	$\frac{104 \pm 11.8}{3.8 \pm 0.59}$
10–20	$\frac{7 \pm 2.7}{0.89 \pm 0.14}$	$\frac{7 \pm 1.3}{0.54 \pm 0.31}$	$\frac{16 \pm 1.3}{0.18 \pm 0.08}$	$\frac{10 \pm 0.8}{0.17 \pm 0.04}$	$\frac{19 \pm 2.2}{0.32 \pm 0.17}$	$\frac{29 \pm 2.3}{2.14 \pm 0.51}$	$\frac{118 \pm 5.9}{4.2 \pm 1.18}$

Продолжение таблицы 6

Table 6 continued

Глубина, см	Pb, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг
земли природно-рекреационной зоны							
0–5	$\frac{25 \pm 16.6}{3.13 \pm 2.52}$	$\frac{5 \pm 0.8}{1.22 \pm 0.68}$	$\frac{15 \pm 5.2}{0.84 \pm 0.36}$	$\frac{19 \pm 8.4}{1.62 \pm 1.18}$	$\frac{60 \pm 37.8}{13.50 \pm 9.50}$	$\frac{72 \pm 56.4}{5.07 \pm 1.77}$	$\frac{106 \pm 36.7}{25.5 \pm 7.9}$
5–10	$\frac{6 \pm 2.7}{1.09 \pm 0.48}$	$\frac{6 \pm 1.2}{1.33 \pm 0.99}$	$\frac{14 \pm 4.0}{0.73 \pm 0.43}$	$\frac{10 \pm 3.2}{0.38 \pm 0.07}$	$\frac{43 \pm 31.6}{5.75 \pm 4.50}$	$\frac{18 \pm 7.7}{1.12 \pm 0.53}$	$\frac{78 \pm 32.9}{4.1 \pm 2.4}$
10–20	$\frac{8 \pm 3.3}{2.66 \pm 1.76}$	$\frac{6 \pm 0.2}{1.79 \pm 1.13}$	$\frac{11 \pm 2.0}{0.76 \pm 0.41}$	$\frac{11 \pm 3.7}{0.85 \pm 0.32}$	$\frac{18 \pm 7.7}{0.67 \pm 0.33}$	$\frac{23 \pm 8.8}{1.06 \pm 0.21}$	$\frac{87 \pm 32.1}{3.0 \pm 1.1}$

Примечание. В числителе вытяжка “царская водка”, в знаменателе подвижные формы.

Note. The numerator – Aqua Regia extract, the denominator – labile forms of heavy metals.

Однако полученные результаты показали, что почвы обследованных городов (Кондопога, Костомукша) имеют низкий уровень загрязнения тяжелыми металлами.

По результатам исследования содержания поллютантов на различных глубинах поверхностного слоя почв (0–20 см) г. Кондопоги выявлены локальные участки, на которых концентрация свинца, меди и цинка (вытяжка “царская водка”) значительно превышает установленные нормативы (6 ПДК, 9 ОДК и 16 ОДК соответственно), содержание подвижных форм меди и цинка достигает 2–3 ПДК. Данные участки относятся к категории общего пользования и расположены вблизи крупных автодорог и железнодорожных путей. Почвы имеют кислую и слабокислую реакцию, в отдельных случаях слабощелочную. Наиболее насыщены основаниями почвы на землях общего пользования и природно-рекреационной зоны.

Территория г. Костомукши отличается более низкими уровнями накопления тяжелых металлов, их концентрации в целом находятся на уровне регионального фона на всех выделенных категориях землепользования. Кислотность почв близка к естественным региональным почвам – кислая реакция. Максимальная степень насыщенности основаниями определена в почвах на землях общего пользования.

Почвы обследуемых городов характеризуются высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия, количество углерода и азота равномерно снижается по глубине и максимально в почвах земель городской застройки.

Таким образом на территории г. Костомукша негативное влияние техногенного пресса на почвы менее выражено. Это связано с тем, что город находится на достаточно большом расстоянии (13 км) от промышленной площадки горно-обогачительного комбината АО “Карельский окатыш”.

В целом невысокие уровни накопления тяжелых металлов в почвах обследуемых городов связаны со снижением количества аэротехногенных выбросов промышленного производства в последние годы ([Государственный доклад..., 2016; 2018; 2021](#)). Тем не менее, доля выбросов автомобильного транспорта возрастает,

что в дальнейшем может стать причиной увеличения степени химического загрязнения городских почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов А.В.* Агрохимические методы исследования почв: руководство. М.: Изд-во Наука, 1975. 656 с.
2. *Байдина Н.Л.* Инактивация тяжелых металлов гумусом и цеолитами в техногеннозагрязненной почве // Почвоведение. 1994. № 9. С. 121–125.
3. *Балакиш П.Н.* Экологические проблемы в целлюлозно-бумажной промышленности РФ // Лесной журнал. 2004. № 1. С. 100–102.
4. *Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В.* Геохимия окружающей среды. М., 1976. 248 с.
5. *Брондер Л., Солохина А., Вережкина Е., Никифоров В.* Доклад объединения Bellona “Промышленное загрязнение территорий российской части Баренцева региона”. Санкт-Петербург: ЭПЦ “Беллона”, 2014. 149 с.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 г. / *А. Н. Громцев* (гл. ред.) и др. Петрозаводск: Мин-во сельского, рыбного хоз-ва и экологии РК, 2010. 296 с.
7. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2014 г. / *А. Н. Громцев* (гл. ред.) и др. Петрозаводск: Мин-во по природопользованию и экологии Республики Карелия, 2015. 272 с.
8. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2015 г. / *А. Н. Громцев* (гл. ред.) и др. Петрозаводск: Мин-во по природопользованию и экологии Республики Карелия, 2016. 300 с.
9. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2017 г. / *А. Н. Громцев* (гл. ред.) и др. Петрозаводск: Мин-во природных ресурсов и экологии Республики Карелия, 2018. 292 с.
10. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. / *А. Н. Громцев* (гл. ред.) и др. Петрозаводск: Мин-во природных ресурсов и экологии Республики Карелия, 2021. 277 с.
11. *Демин В.В.* Роль гуминовых кислот в необратимой сорбции и биогеохимии тяжелых металлов в почве // Известия ТСХА. 1994. Вып. 2. С. 79–86.
12. *Джувеликян Х.А.* Подвижные формы тяжелых металлов в черноземах незагрязненных ландшафтов // Вестник Самарского Государственного Университета, Серия: Химия, Биология, Фармация. 2005. № 1. С. 107–112.
13. *Зырин Н.Г.* Узловые вопросы учения о микроэлементах: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: Изд. МГУ, 1968. 37 с.

14. *Калашикова О.В.* Техногенное загрязнение почв и состояние древесных насаждений в г. Москве: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2003. 141 с.
15. *Лаптева Е.М., Холопов Ю.В., Шахтарова О.В., Бондаренко Н.Н., Кострова С.Н.* Почвы и почвенный покров в зоне влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2021. №5 (51). С. 46–60. DOI: [10.19110/1994-5655-2021-5-46-60](https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-46-60).
16. *Личутина Т.Ф., Боголицын К.Г., Гумакова М.А.* Экологическая оценка деятельности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Перспективные направления утилизации отходов // Российский химический журнал. 2011. Т. LV. № 1. С. 101–107.
17. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
18. *Новиков С.Г.* Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Кондопога // Труды четвертой международной научно-практической конференции молодых ученых “Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование”. М.: Буки-Веди, 2015. С. 117–120.
19. *Новиков С.Г.* Содержание тяжелых металлов в почвах города Костомукши // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 5; URL: <http://www.science-education.ru/article/view?id=25327>.
20. *Пантелеева Я.Г.* Геохимические изменения окружающей среды в зоне влияния горнопромышленного комплекса ОАО “Карельский окатыш” (г. Костомукша, республика Карелия): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2009. 20 с.
21. *Пляскина О.В., Ладонин Д.В.* Загрязнение городских почв тяжелыми металлами // Почвоведение. 2009. № 7. С.877–885.
22. Почва, город, экология / *Г.В. Добровольский* (ред.). М.: Фонд “За экономическую грамотность”, 1997. 320 с.
23. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасова А.И., Саркисян С.Ш.* Геохимия окружающей среды. М.: Мир, 1990. 319 с.
24. Свод правил “Инженерно-экологические изыскания для строительства” (СП 11-102-97). М., 1998.
25. *Стурман В.И.* Экологическое картографирование. М.: Аспект Пресс, 2003. 251 с.
26. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К.* Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
27. *Щербо А.П., Киселев А.В.* О проблеме эколого-гигиенических маркеров в аспекте доказательной медицины // Гигиена и санитария. 2004. № 6. С. 5–8.

28. *Bidwell A.M., Dowdy R.H.* Cadmium and zinc availability to com following termination of sewage sludge applications // *J. Environm. Qual.* 1987. No. 164. P. 438–442.
29. *Bruemmer G.W., Gerth J., Herms U.* Heavy metal species, mobility and availability in soils // *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde.* 1986. Bd 149. No. 4. P. 382–398.
30. *Gavrilescu D., Puitel A.C., Dutuc Gh., Craciun G.* Environmental impact of pulp and paper mills // *Environmental Engineering and Management Journal.* 2012. Vol. 11. Iss. 1. P. 81–85. DOI: [10.30638/eemj.2012.012](https://doi.org/10.30638/eemj.2012.012).
31. *Hakanson L.* An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach // *Water Research.* 1980. Vol. 14. Iss. 8. P. 975–1001.
32. *Islam S., Ahmed K., Habibullah-Al-Mamun, Masunaga S.* Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh // *Science of The Total Environment.* 2015. Vol. 512–513. P. 94–102
33. *Kabala C., Chodak T., Szerszen L., Karczewska A., Szopka K., Fratzczak U.* Factors influencing the concentration of heavy metals in soils of allotment gardens in the city of wroclaw, Poland // *Fresenius Environmental Bulletin.* 2009. Vol. 18. Iss. 7. P. 1118–1124.
34. *Mukhopadhyay M.J., Sharma A.* Manganese in cell metabolism of higher plants // *The Botanical Review.* 1991. Vol. 57. No. 2. P. 117–149.
35. *Novikov S.* Ecological condition of soils in small towns of the Republic of Karelia // *Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services 9th international congress. Proc. Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas (SUITMA 9).* Moscow, 2017. P. 392–394.
36. *Peng C., Cai Y., Wang T., Xiao R., Chen W.* Regional probabilistic risk assessment of heavy metals in different environmental media and land uses: An urbanization-affected drinking water supply area // *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6. 37084.
37. *Ramakrishnaiah H., Somashekar R.K.* Heavy metal contamination in roadside soil and their mobility in relations to pH and organic carbon // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal.* 2002. Vol. 5. Iss. 1. P. 643–654.
38. *Rashed M.N.* Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt // *Journal of hazardous materials.* 2010. Vol. 178. Iss. 1–3. P. 739–746.
39. *Shacklette H.T., Boerngen J.G.* Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States. U.S. Geological Paper 1270, 1984. 105 p.

40. Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffery D.W. Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of a pollution index // *Helgoland Marine Research*. 1980. Vol. 33. Iss. 1. P 566–575.

REFERENCES

1. Sokolov A.V. (Ed.), *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv: rukovodstvo* (Agrochemical methods of soil research: a guide), Moscow: Izd-vo Nauka, 1975, 656 p.
2. Baidina N.L., Inaktivatsiya tyazhelykh metallov gumusom i tseolitami v tekhnogennozagryaznennoy pochve (Inactivation of heavy metals by humus and zeolites in a technogenically polluted soil), *Pochvovedenie*, 1994, No. 9, pp. 121–125.
3. Balakshin P.N., *Ekologicheskie problemy v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti RF* (Environmental problems in pulp-and-paper industry of RF), *Lesnoy zhurnal*, 2004, No. 1, pp. 100–102.
4. Beus A.A., Grabovskaya L.I., Tikhonova N.V., *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* (Geochemistry of the environment), Moscow, 1976, 248 p.
5. Bronder L., Solohina A., Verevkin E., Nikiforov V., *Doklad ob'edineniya Bellona "Promyshlennoe zagryaznenie territoriy rossiyskoy chasti Barentseva regiona"* (Report of the Bellona association "Industrial pollution of the territories of the Russian part of the Barents region"), St. Petersburg: ERC "Bellona", 2014, 149 p.
6. Gromtsev A.N. (Ed.), State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2014, Petrozavodsk: Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Karelia, 2015, 272 p.
7. Gromtsev A.N. (Ed.), State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2015, Petrozavodsk: Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Karelia, 2016, 300 p.
8. Gromtsev A.N. (Ed.), State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2017, Petrozavodsk: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia, 2018, 292 p.
9. Gromtsev A.N. (Ed.), State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020, Petrozavodsk: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia, 2021, 277 p.
10. Gromtsev A.N. (Ed.), State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2009, Petrozavodsk: Ministry of Agriculture, Fisheries and Ecology of the Republic of Kazakhstan, 2010, 296 p.
11. Demin V.V., Rol' guminovykh kislot v neobratimoy sorbtzii i biogeokhimiitiazhelykh metallov v pochve (The role of humic acids in the irreversible

sorption and biogeochemistry of heavy metals in soil, *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 1994, No. 2, pp. 79–86.

12. Dzhavelikyan H.A., *Podvizhnye formy tyazhelykh metallov v chernozemakh nezagryaznennykh landshtaftov (Mobile forms of heavy metals in chernozems of uncontaminated landscapes)*, *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Seriya: Himiya, Biologiya, Farmatsiya*, 2005, No. 1, pp. 107–112.

13. Zyrin N.G., *Uzlovye voprosy ucheniya o mikroelementakh: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk (Key issues of the doctrine of microelements, Extended abstract of Dr. biol. sci. thesis)*, Moscow State University, 1968, 37 p.

14. Kalashnikova O.V., *Tekhnogennoe zagryaznenie pochv i sostoyanie drevesnykh nasazhdeniy v g. Moskve: Dis. ... kand. biol. nauk (Technogenic pollution of soils and the state of tree plantations in Moscow: Cand. biol. sci. thesis)*, Moscow, 2003, 141 p.

15. Lapteva E.M., Holopov Yu.V., Shahtarova O.V., Bondarenko N.N., Kostrova S.N., *Pochvy i pochvennyy pokrov v zone vliyaniya aerotekhnogennykh vybrosov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva (Soils and soil cover in the zone of influence of airborne industrial emissions from pulp and paper production)*, *Izvestiya Komi NTs UrO RAN*, 2021, No. 5 (51), pp. 46–60, DOI: [10.19110/1994-5655-2021-5-46-60](https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-46-60).

16. Lichutina T.F., Bogolicyn K.G., Gumakova M.A., *Ekologicheskaya otsenka deyatelnosti predpriyatiy tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti. Perspektivnye napravleniya utilizatsii otkhodov (Environmental assessment of the activities of pulp and paper industry enterprises. Promising areas of waste disposal)*, *Rossiyskiy himicheskii zhurnal*, 2011, Vol. LV, No. 1, pp. 101–107.

17. Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop production, Moscow: TsINAO, 1992, 61 p.

18. Novikov S.G., *Otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv goroda Kondopoga (Assessment of heavy metal contamination of urban soils in Kondopoga)*, *Trudy chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh "Indikatsiya sostoyaniya okruzhayushchey sredy: teoriya, praktika, obrazovanie"* (Proc. 4th Intern. scientific and practical conference of young scientists "Indication of the state of the environment: theory, practice, education"), Moscow: Buki-Vedi, 2015, pp. 117–120.

19. Novikov S.G., *Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvakh goroda Kostomukshi (Heavy metals in soils of the town of Kostomuksha)*, *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2016, No. 5, URL: <http://www.science-education.ru/article/view?id=25327>.

20. Panteleeva Ya.G., *Geokhimicheskie izmeneniya okruzhayushchey sredy v zone vliyaniya gornopromyshlennogo kompleksa OAO "Karel'skiy okatysh" (g. Kostomuksha, respublika Kareliya): Avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral.*

Nauk (Geochemical changes in the environment in the zone of influence of the mining complex OJSC “Karelsky Okatysh” (Kostomuksha, Republic of Karelia), Extended abstract of Cand. geol.-mineral. sci. thesis), St. Petersburg, 2009, 20 p.

21. Plyaskina O.V., Ladonin D.V., Zagryaznenie gorodskikh pochv tyazhelymi metallami (Heavy metal pollution of urban soils), *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 7, pp. 816–823.

22. Dobrovolsky G.V. (Ed.), *Pochva, gorod, ekologiya* (Soil, City, Ecology), Moscow: Fond “Za ekonomicheskuyu gramotnost’”, 1997, 320 p.

23. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasova A.I., Sarkisyan S.Sh., *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* (Environmental geochemistry), Moscow: Mir, 1990, 319 p.

24. Code of rules “Engineering and environmental surveys for construction” (11-102-97), Moscow, 1998.

25. Sturman V.I., *Ekologicheskoe kartografirovanie* (Ecological mapping, Moscow): Aspekt Press, 2003, 251 p.

26. Fedorec N.G., Bahmet O.N., Solodovnikov A.N., Morozov A.K., *Pochvy Karelii: geokhimicheskiy atlas* (Soils of Karelia: geochemical atlas), Moscow: Nauka, 2008, 47 p.

27. Shcherbo A.P., Kiselev A.V., O probleme ekologo-gigienicheskikh markerov v aspekte dokazatel'noy meditsiny (Ecological and hygienic markers in evidence-based medicine), *Gigiena i sanitariya*, 2004, No. 6, pp. 5–8.

28. Bidwell A.M., Dowdy R.H., Cadmium and zinc availability to com following termination of sewage sludge applications, *J. Environm. Qual.*, 1987, No. 164, pp. 438–442.

29. Bruemmer G.W., Gerth J., Herms U., Heavy metal species, mobility and availability in soils, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1986. Bd 149, No. 4, pp. 382–398.

30. Gavrilescu D., Puitel A.C., Dutuc Gh., Craciun G., Environmental impact of pulp and paper mills, *Environmental Engineering and Management Journal*, 2012, Vol. 11, Iss. 1, pp. 81–85, DOI: [10.30638/eemj.2012.012](https://doi.org/10.30638/eemj.2012.012).

31. Hakanson L., An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach, *Water Research*, 1980, Vol. 14, Iss. 8, pp. 975–1001.

32. Islam S., Ahmed K., Habibullah-Al-Mamun, Masunaga S., Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh, *Science of The Total Environment*, 2015, Vol. 512–513, pp. 94–102.

33. Kabala C., Chodak T., Szerszen L., Karczewska A., Szopka K., Fraczak U., Factors influencing the concentration of heavy metals in soils of

allotment gardens in the city of wroclaw, Poland, *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, Vol. 18, Iss. 7, pp. 1118–1124.

34. Mukhopadhyay M.J., Sharma A., Manganese in cell metabolism of higher plants, *The Botanical Review*, 1991, Vol. 57, No. 2, pp. 117–149.

35. Novikov S., Ecological condition of soils in small towns of the Republic of Karelia, *Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services 9th international congress. Proc. Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas (SUITMA 9)*, Moscow, 2017, pp. 392–394.

36. Peng C., Cai Y., Wang T., Xiao R., Chen W., Regional probabilistic risk assessment of heavy metals in different environmental media and land uses: An urbanization-affected drinking water supply area, *Scientific Reports*, 2016, Vol. 6, 37084.

37. Ramakrishnaiah H., Somashekar R.K., Heavy metal contamination in roadside soil and their mobility in relations to pH and organic carbon, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2002, Vol. 5, Iss. 1, pp. 643–654.

38. Rashed M.N., Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt, *Journal of hazardous materials*, 2010, Vol. 178, Iss. 1–3, pp. 739–746.

39. Shacklette H.T., Boerngen J.G., Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States, *U.S. Geological Paper 1270*, 1984, 105 p.

40. Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffery D.W., Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of a pollution index, *Helgoland Marine Research*, 1980, Vol. 33, Iss. 1, pp. 566–575.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-185-204



Ссылки для цитирования:

Мамонтов В.Г., Савичев А.Т., Ефимов О.Е. Сравнительная характеристика лесных подстилок дерново-подзолистых почв Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 185-204. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-185-204

Cite this article as:

Mamontov V.G., Savichev A.T., Efimov O.E., Comparative characterisation of forest litter on sod-podzolic soils of Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 185-204, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-185-204

**Сравнительная характеристика лесных
подстилок дерново-подзолистых почв
Лесной опытной дачи
РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева**

© 2022 г. В. Г. Мамонтов^{1*}, А. Т. Савичев², О. Е. Ефимов¹

¹РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия,
125425, Москва, ул. Тимирязевская, 49,

*e-mail: mamontov1954@inbox.ru.

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

Поступила в редакцию 28.06.2022, после доработки 11.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: Изучались лесные подстилки под липняком и сосняком пробных площадок Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Несмотря на значительные различия физико-химических показателей между подстилками, образующимися в условиях разных лесных сообществ, свойства дерново-подзолистых почв, сформировавшихся под ними, близки. Подстилка липняка имеет более высокую зольность, она менее кислая и содержит почти в 2 раза больше обменных оснований, в ней на 0.82 мас. % и 0.66 мас. % выше содержание водорода и азота соответственно. Судя по величинам атомных отношений Н : С, С : N и степени окисленности, равным у

подстилок липняка и сосняка 1.82, 30.3, -0.92 и 1.64, 45.7, -0.71 соответственно, подстилка липняка отличается от подстилки сосняка более высоким содержанием алифатических, обогащенных азотсодержащими, восстановленными органическими соединениями. В подстилке липняка коэффициенты концентрации фосфора и магния выше в 1.2 раза, углерода, калия и алюминия – в 1.3 раза, кальция – в 1.4 раза, азота – в 1.8 раза и кремния – в 3 раза, чем в подстилке сосняка. Однако коэффициент концентрации марганца в подстилке сосняка в 1.9 раза выше по сравнению с подстилкой липняка. Согласно результатам УФ-спектроскопии, водорастворимые органические вещества подстилки сосняка в отличие от водорастворимых органических веществ подстилки липняка в большей мере обогащены компонентами ароматической природы. Об этом свидетельствуют более высокие значения показателя $SUVA_{254}$ и более низкие значения коэффициентов E_2/E_3 и E_4/E_6 .

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы, липняк, сосняк, водорастворимое органическое вещество лесных подстилок, атомные проценты, коэффициент концентрации, УФ-спектроскопия, $SUVA_{254}$, E_2/E_3 , E_4/E_6 .

Comparative characterisation of forest litter on sod-podzolic soils of Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev

© 2022 V. G. Mamontov^{1*}, A. T. Savichev², O. E. Efimov¹

¹RSAU–MTAA named after K.A. Timiryazev,
Timiryazevskaya str. 49, Moscow 125425, Russian Federation,
*e-mail: mamontov1954@inbox.ru.

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

Received 28.06.2022, Revised 11.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: Forest litter under linden and pine forests was studied at the Forest Experimental Dacha of the RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev. Despite significant differences in physical and chemical parameters between the litter formed under the conditions of different forest communities, the properties of sod-podzolic soils formed under both vegetation types are quite similar. The litter under linden forest has higher ash content, it is less acidic and contains almost 2 times more exchangeable bases, the content of hydrogen and nitrogen is higher by 0.82 wt% and 0.66 wt%, respectively. The litter of linden and pine forests, according to the atomic ratios H : C, C : N and the

degree of oxidation, are equal to 1.82, 30.3, -0.92 and 1.64, 45.7, -0.71, respectively; the litter of linden forests differs from litter of pine forests in the higher content of aliphatic, nitrogen-rich, reduced organic compounds. In the litter of linden forests concentration coefficients of phosphorus and magnesium 1.2 times higher; of carbon, potassium and aluminium – 1.3 times higher; of calcium – 1.4 times higher; of nitrogen – 1.8 times higher, and of silicon – 3 times higher, than in the litter of pine trees. However, the concentration factor of manganese in the pine forest litter is 1.9 times higher compared to the litter of linden. According to the results of UV spectroscopy, water-soluble organic matter of pine forest litter, unlike water-soluble organic matter of linden forest litter, is more enriched by components of aromatic origin. This is evidenced by higher values of $SUVA_{254}$ and lower values of coefficients E_2/E_3 and E_4/E_6 .

Keywords: sod-podzolic soils, linden forest, pine forest, water-soluble organic matter of forest litter, atomic ratio, concentration factor, UV spectroscopy, $SUVA_{254}$, E_2/E_3 , E_4/E_6 .

ВВЕДЕНИЕ

Согласно классическим представлениям о факторах почвообразования, растительность, в частности, состав ее опада, образующего слой подстилки на поверхности почвы, в значительной мере влияет на формирование почвенного покрова. При этом порой под различными лесными растительными сообществами обнаруживаются морфологически сходные почвы. Лесная подстилка относится к числу специфических природных образований. Она представляет собой органогенный слой на поверхности почвы, состоящий преимущественно из наземных частей лесной растительности. Статус лесной подстилки рассматривается исследователями неоднозначно. Наряду с отнесением ее к генетическим горизонтам почвы и включением мощности лесной подстилки в показатели гумусового состояния почв ([Классификация и диагностика ...](#), 1977; [Гришина, 1983](#); [Розанов, 2004](#)), лесную подстилку рассматривают и как самостоятельное тело природы, обладающее рядом специфических свойств и экологических функций ([Богатырев, 1996](#)). Так, по мнению Н.В. Дылиса ([1983](#)), “хотя подстилка расположена на поверхности почвы и в ходе биохимических и физических превращений постепенно переводит в нее часть своих

ресурсов и энергии, однако считать ее за часть почвы, за верхний горизонт, ввиду очевидных особенностей ее функционирования и динамизма нецелесообразно. Это особое тело ... особый компонент биогеоценоза”. Близкую точку зрения высказывал и Л.О. Карпачевский ([1983](#)).

Тем не менее исследователи единодушно отмечают, что лесная подстилка играет важную роль в нормальном функционировании лесных биогеоценозов и формировании профиля лесных почв ([Вильямс, 1946](#); [Гришина, 1983](#); [Карпачевский, 2005](#); [Семенюк и др., 2020](#); [Богатырев и др., 2013](#)).

С точки зрения почвообразования особое значение приобретает тот факт, что лесная подстилка – это источник водорастворимых органических веществ, являющихся одной из основных причин развития ряда элементарных почвенных процессов, таких как гумусообразование и гумусонакопление, оподзоливание, оглеение, элювиально-глеевый процесс ([Вильямс, 1946](#); [Гришина, 1983](#); [Сапожников, 1984](#); [Яшин, Кауричев, 1990](#); [Карпачевский, 2005](#); [Роде, 2008](#); [Зайдельман, 2016](#); [Маслов и др., 2021](#)).

Поэтому изучение органической и минеральной части лесных подстилок имеет большое теоретическое и практическое значение.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом наших исследований служили пробные площади территории Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (ЛОД). Регулярные наблюдения за состоянием лесных насаждений на территории ЛОД ведутся с 1862 г. и по настоящее время на постоянных пробных площадях, представленных датируемыми участками, занятыми различными породами древесных растений естественного и искусственного происхождения возрастом до 300 лет. В качестве объекта исследования были выбраны пробная площадка **Е** в 3-м квартале и пробная площадка **З** в 8-м квартале.

Пробная площадь **ЗЕ** с координатами N: 37.54313, E: 55.82087 заложена А.Р. Варгасом в 1862 г. в 42-летнем сосновом насаждении естественного происхождения с примесью березы

и подростом из дуба. В настоящее время пробная площадь **3Е** – старейшее на ЛОД насаждение сосны естественного происхождения, чистое, с почти одинаковым участием деревьев сосны и дуба, при значительном участии клена в составе II яруса. Подрост – клен, вяз, дуб. Подлесок – рябина, бересклет, малина, лещина. Напочвенный покров – недотрога, кислица, папоротники, копытень, волчья ягода. Тип леса – сосняк разнотравный (*Pinetum herbosum*).

Пробная площадь **83** с координатами N: 37.55583, E: 55.81914 заложена в 1897 г. А.М. Турским в 97-летнем насаждении сосны естественного происхождения с небольшой примесью березы 60–70 лет, II ярус состоял из дуба и липы. В дальнейшем липа заняла господствующее положение, как в I, так и во II ярусах. Подрост – клен, вяз. Подлесок – рябина, лещина, бересклет, малина. Напочвенный покров – недотрога, копытень, папоротники, крапива. Тип леса – липняк разнотравный (*Tilietum herbosum*). Таким образом, различия в составе растительного опада данных площадок обусловлены участием сосны в составе I яруса площадки **3Е** в отличие от площадки **83**, где сосна отсутствует. Обе площадки заложены на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве ([Наумов, Поляков, 2009](#)).

Образцы лесной подстилки отбирали на пробных площадках в 5-кратной повторности методом конверта на всю глубину подстилки. Подстилка липняка имеет мощность 0–3 см, сухая, рыхлая, слаборазложившаяся, состоит из листьев липы и дуба, мелких веточек. Мощность подстилки сосняка тоже составила 0–3 см. Она состоит из опада лиственных пород: дуб, клен, рябина, – с преобладанием в нем игл сосны, встречаются мелкие веточки и семена. Подстилка сосняка отчетливо подразделялась на два слоя: верхний – 0–1 см, сухой, рыхлый, слаборазложившийся; и нижний – 1–3 см, свежий, полуразложившийся, слабоуплотненный, плохо отделяющийся от верхней минеральной части почвы. Почвенные образцы отбирали в 5-кратной повторности методом конверта из гумусово-элювиального горизонта A_1 и подготавливали к анализу по общепринятой методике ([Аринушкина, 1970](#)). Отбор образцов подстилок и почв был проведен в апреле 2021 г.

Для характеристики общих свойств почв в индивидуальных

образцах определяли: pH_{KCl} – потенциометрическим методом, величину гидролитической кислотности (H_r) – по методу Каппена, сумму обменных оснований (S) – по методу Каппена-Гильковица, степень насыщенности основаниями (V) – находили расчетным путем, содержание общего углерода определяли по методу Тюрина, содержание общего азота – по Кьельдалю, гигроскопическую влажность и потери от прокаливания – гравиметрическим методом ([Аринушкина, 1970](#)). Элементный состав почв определяли в смешанных образцах, составленных из 5 индивидуальных образцов, рентгенофлуоресцентным методом (энергодисперсионный спектрометр РеСпект, Россия) согласно ГОСТ 33850-2016.

Водорастворимые органические вещества извлекали из смешанных образцов лесных подстилок с помощью водной вытяжки при соотношении лесная подстилка : дистиллированная вода равном 1 : 20 и суточном настаивании ([Гавриленко и др., 2006](#)). Содержание органического углерода в водных вытяжках находили по методу Тюрина ([Аринушкина, 1970](#)). Коэффициенты концентрации химических элементов в лесных подстилках находили расчетным путем ([Перельман, 1966](#)).

Спектры поглощения водорастворимых органических веществ в ультрафиолетовой области снимали на спектрофотометре УФ-2000 в интервале 200–700 нм. Показатели $SUVA_{245}$ и E_2/E_3 находили согласно рекомендациям ([Peuravuori, Pihlaja, 1997](#); [Weishaar et al., 2003](#)). Поскольку в области 400–600 нм значения оптической плотности приобретают очень низкие значения, это может вызвать большие ошибки измерения ([Орлов, Гришина, 1981](#); [Chin et al., 1994](#)). Поэтому для нахождения показателя E_4/E_6 оптическую плотность измеряли на спектрофотометре КФК-3, используя разные кюветы ([Орлов, Гришина, 1981](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные физико-химические свойства исследованных подстилок и сформированных под ними почв представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что лесные подстилки, сформированные под разным древостоем, несмотря на одинаковое содержание органического вещества (ОВ), в значительной мере различаются его вещественным составом, о чем свидетельствует

почти в 1.5 раза меньшее содержание азота в подстилке сосняка, по сравнению с подстилкой липняка.

Ранее отмечалось ([Мамонтов, Мостовая, 2021](#)), что разница отношений $C:N$ подстилки липняка (31) и сосняка (44.4) в совокупности с разницей соотношения $H:C$ (1.82 и 1.64, соответственно) при практически одинаковом соотношении $C:O$ свидетельствуют об обогащенности подстилки липняка алифатическими азотсодержащими компонентами, по сравнению с большим количеством устойчивых к минерализации ароматических структур в подстилке сосняка. Эти различия состава обуславливают различия физико-химических свойств подстилок: относительно высокую кислотность подстилки сосняка (pH почти на целую единицу ниже, чем у липняка), более высокое значение гидролитической кислотности, более низкую (в 2 раза) сумму обменных катионов и низкую степень насыщенности основаниями (на 20% ниже, по сравнению с подстилкой липняка).

При рассмотрении свойств гумусово-элювиальных горизонтов дерново-подзолистых почв, отобранных непосредственно под этими подстилками, надо отметить, что они несколько различаются содержанием углерода, под сосняком содержание C_{org} несколько выше, чем под липняком, что связано с особенностями вещественного состава ОВ подстилок.

Несмотря на то, что вещественный состав исходных подстилок различен, соотношения $C:N$ для ОВ почв как продукта минерализации подстилок практически не различаются – 17.37 и 17.97, соответственно.

Кроме того, почва под липняком имеет более высокие показатели pH (почти на единицу pH) и суммы обменных катионов (на 30%). В тоже время обе почвы характеризуются одинаковыми значениями гидролитической кислотности и степени насыщенности основаниями.

Согласно полученным ранее данным при близких значениях гигроскопической влажности, варьирующей в диапазоне 11.45–11.95%, подстилки имеют разную зольность, зольность подстилки липняка равна 11.85%, тогда как зольность подстилки сосняка составила 6.37% ([Мамонтов, Мостовая, 2021](#)).

Таблица 1. Свойства дерново-подзолистых легкосуглинистых почв и лесных подстилок Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА

Table 1. Properties of sod-podzolic sandy-loam soils and forest litter at the Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev

Вариант	C _{общ} , %	N _{общ} , %	pH _{KCl}	Нг	S	V, %
				мг-ЭКВ/100 г		
Липняк, подстилка	55.87 ± 0.39	2.13 ± 0.27	5.78 ± 0.08	2.77 ± 0.42	12.30 ± 0.72	81.5 ± 6.0
Липняк, почва	1.19 ± 0.18	0.08 ± 0.02	5.91 ± 0.57	6.36 ± 0.42	8.87 ± 0.66	58.2 ± 0.5
Сосняк, подстилка	56.00 ± 0.95	1.47 ± 0.10	4.85 ± 0.03	3.83 ± 0.13	6.54 ± 0.64	63.1 ± 3.3
Сосняк, почва	1.51 ± 0.16	0.10 ± 0.03	5.07 ± 0.25	6.38 ± 0.32	6.77 ± 0.72	51.9 ± 1.6

Таким образом, подстилки, сформировавшиеся под разным древостоем, заметно различаются своими свойствами. Подстилка липняка имеет более высокую зольность, она менее кислая и содержит почти в 2 раза больше обменных оснований. При этом основные свойства гумусово-элювиальных горизонтов почв под этими подстилками различаются не столь существенно, показатели обменной кислотности фактически наследуются.

Содержание основных макроэлементов в исследуемых подстилках и почвах представлено в таблице 2.

Очевидно (табл. 2, рис. 1), что элементный состав гумусово-элювиальных горизонтов дерново-подзолистых почв двух площадок отражает их литогенную однородность. Этот вывод можно сделать, исходя из равного для обеих почв содержания основных минералообразующих элементов кремния, алюминия, кальция, магния, натрия, калия и фосфора.

При этом содержание железа и марганца, элементов, способных мигрировать в пределах профиля в зависимости от изменения кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий, различается в 1.5–2 раза, их больше в почве под липняком, а почва под сосняком ими обеднена вследствие выноса кислотными органическими агентами.

Анализ подстилок показал, что под липняком содержится в 1.5–2 (а для натрия – в 3) раза больше всех представленных в таблице элементов, чем под сосняком (табл. 2, рис. 1). Сравнивая содержание кремния в двух подстилках, можно отметить, что высокое содержание этого элементов в подстилке липняка может быть обусловлено более высоким вкладом злаковых растений, папоротников и хвощей, содержащих 2–2.7% кремния ([Колесников, 2001](#)).

Как отмечалось, подстилки липняка и сосняка имеют близкое содержание углерода (табл. 1). Ранее определено ([Мамонтов, Мостовая, 2021](#)), что содержание кислорода в них также значимо не отличается (33.46–34.74 мас.%, соответственно), однако подстилка липняка содержит больше водорода и азота.

Таблица 2. Содержание химических элементов в подстилках* и дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА (% на воздушно-сухую массу)

Table 2. Chemical elements content in different forests litter* and sod-podzolic sandy-loam soils of the Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev (% of air-dry weight)

		Si	Al	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	P
<i>Липняк</i>	Подстилка	2.83	0.45	3.07	0.22	0.1	0.42	0.33	0.22	0.2
	Почва	38.61	5.68	0.54	0.45	0.73	1.98	3.35	0.15	0.08
<i>Сосняк</i>	Подстилка	1.32	0.28	2.36	0.17	0.03	0.31	0.25	0.25	0.14
	Почва	38.39	5.60	0.56	0.41	0.75	1.95	2.25	0.08	0.07

Примечание. * дано по Мамонтову, Мостовой ([2021](#)), все результаты пересчитаны на содержание элемента.

Note. * data given according to Mamontov, Mostovaya (2021), all results are converted to element content.

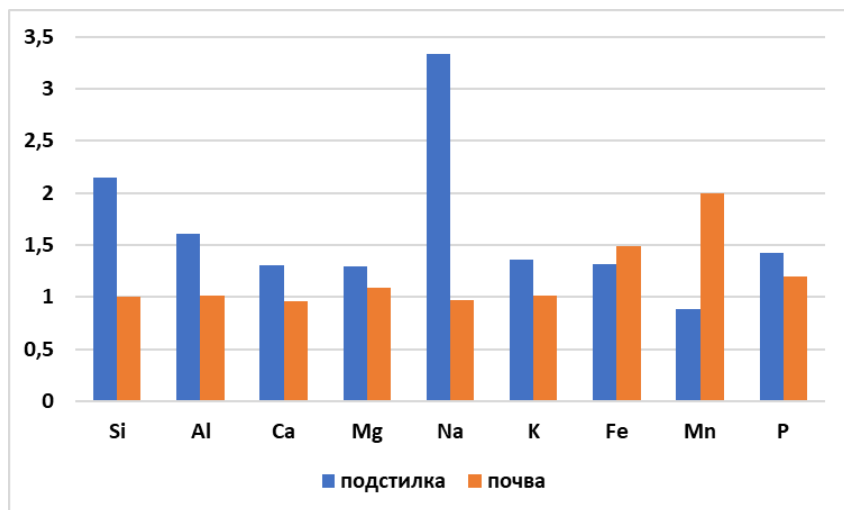


Рис. 1. Соотношения содержания основных макроэлементов в подстилках липняка и сосняка и дерново-подзолистых почвах.

Fig. 1. Ratios of major macronutrient contents in linden and pine forests litter and in underlying sod-podzolic soils.

Считается, что использование данных элементного состава органических веществ в массовых (весовых) процентах не позволяет получить правильное и полное представление о роли отдельных элементов в построении их молекул и о тех изменениях, которые происходят с ними под воздействием природных и антропогенных факторов.

Истинное представление можно получить, используя при интерпретации данных элементного анализа атомные проценты, которые показывают число атомов данного элемента в процентах к общему числу атомов в молекуле вещества ([Орлов, 1990](#)).

При выражении элементного состава в атомных процентах различия между лесными подстилками в содержании химических элементов проявляются более отчетливо (табл. 3). Подстилка липняка, по сравнению с подстилкой сосняка, содержит больше водорода и азота, но меньше – углерода и кислорода, что отражается на величинах атомных отношений.

Таблица 3. Элементный состав лесных подстилок дерново-подзолистых почв ЛОД РГАУ-МСХА, ат. %

Table 3. Elemental composition of two forest types litter on sod-podzolic soils of the Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev, at%)

Тип леса	С	Н	N	O	Н : С	O : С	С : N	ω
Липняк	30.3	55.1	1.0	13.6	1.82	0.45	30.3	-0.92
Сосняк	32.0	52.4	0.7	14.9	1.64	0.47	45.7	-0.71

Судя по величинам отношений $H : C$ и $C : N$, подстилка липняка в большей мере обогащена алифатическими азотсодержащими органическими соединениями. При этом степень окисленности органических соединений подстилки липняка на 22% ниже, чем у подстилки сосняка, что говорит, согласно Д.С. Орлову ([Орлов, 1985](#)), о более сильной степени гумификации подстилки липняка. При этом подстилка сосняка отличается от подстилки липняка более высоким содержанием циклических, обедненных азотом органических соединений. Для нормального функционирования лесных биогеоценозов важно и то, что лесная подстилка является связующим звеном между почвой и растительным покровом ([Решетникова, 2011](#); [Семенюк и др., 2020](#)), важнейшим источником водорастворимых органических веществ, в том числе и специфической природы, которые в значительной мере определяют особенности формирования профиля почв в таежно-лесной зоне.

Известно, что в хвойных лесах с опадом на поверхность почвы поступает больше лигнина, чем в широколиственных лесах ([Ковалев, 2016](#)), при этом из хвои азот выщелачивается гораздо активнее, чем из опада широколиственных и мелколиственных пород ([Богатырев, 1996](#)). Все это и обуславливает различия в химическом составе органической части подстилок сосняка и липняка и качественную характеристику образующихся из них водорастворимых органических веществ, которые отличаются своими оптическими свойствами (рис. 2).

При общей однотипности спектров поглощения, следует отметить, что спектр водорастворимых органических веществ подстилки сосняка в области 220–500 нм расположен несколько выше спектра водорастворимых органических веществ подстилки липняка. Это свидетельствует о том, что водорастворимые органические вещества подстилки сосняка характеризуются более высокими значениями оптической плотности.

Для количественной оценки спектров поглощения водорастворимых органических веществ были рассчитаны показатели $SUVA_{254}$, E_2/E_3 и E_4/E_6 , приведенные в таблице 4.

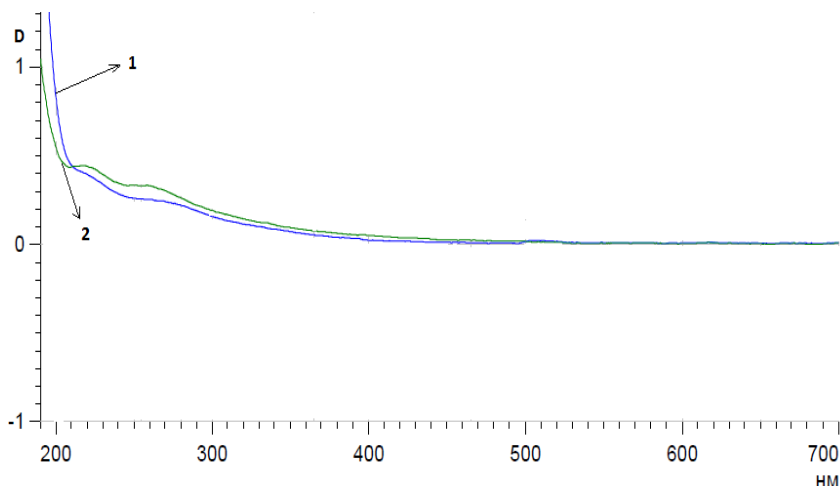


Рис. 2. УФ-видимые спектры поглощения водорастворимых органических веществ, экстрагированных из подстилок липняка (1) и сосняка (2) и выровненных по содержанию углерода.

Fig. 2. UV-visible absorption spectra of water-soluble organic matter extracted from the litter of linden (1) and pine (2) forests and aligned with the carbon content.

Согласно полученным данным, показатель $SUVA_{254}$ водорастворимых органических веществ подстилки липняка ниже, чем у подстилки сосняка. Считается, что более высокие значения показателя $SUVA_{254}$ обусловлены более высоким содержанием аро-

матического углерода ([Hansen et al., 2016](#); [Weishaar et al., 2003](#)), что подтверждает приведенные выше данные элементного состава подстилок (табл. 4).

Таблица 4. Значения $SUVA_{254}$, E_2/E_3 и E_4/E_6 водорастворимых органических веществ лесных подстилок дерново-подзолистых легкосуглинистых почв Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА

Table 4. $SUVA_{254}$, E_2/E_3 and E_4/E_6 values of water-soluble organic matter of two forest types litter on sod-podzolic sandy-loam soils of the Forest Experimental Dacha in RSAU–MAA named after K.A. Timiryazev

Вариант	$SUVA_{254}$	E_2/E_3	E_4/E_6
Липняк	0.03	4.94	6.32
Сосняк	0.04	3.86	6.25

Показатели E_2/E_3 и E_4/E_6 : для водорастворимых органических веществ подстилки липняка и сосняка различаются в 1.5 раза. По мнению некоторых исследователей, более высокие значения отношения E_2/E_3 обычно связаны с более низкой молекулярной массой и меньшей степенью ароматичности ([Peuravuori, Pihlaja, 1997](#)). При этом отмечается, что отношение E_2/E_3 в большей мере следует рассматривать как отношение неокисленных ароматических структур к окисленным ([Холодов и др., 2017](#)). Исходя из этого можно предположить, что водорастворимые органические вещества подстилки липняка, по сравнению с водорастворимыми органическими веществами подстилки сосняка, характеризуются более низкими молекулярными массами, меньшей степенью ароматичности и более высоким содержанием неокисленных ароматических компонентов.

Показатель E_4/E_6 широко применяется при анализе гумусовых кислот почвы и часто называется степенью гумификации или коэффициентом цветности ([Кононова, 1963](#); [Орлов, Гришина, 1981](#); [Peuravuori, Pihlaja, 1997](#)). Принимается, что чем меньше величина E_4/E_6 , тем больше вклад ароматических компонентов в построение молекулы.

Согласно полученным нами данным величина E_4/E_6 водорастворимых органических веществ подстилки липняка выше, чем у подстилки сосняка, что свидетельствует об относительной обогащенности ОВ подстилки сосняка ароматическими компонентами.

Таким образом, изучение оптических свойств водорастворимых органических веществ лесных подстилок показало, что водорастворимые органические вещества подстилки сосняка отличаются от водорастворимых органических веществ подстилки липняка более высоким содержанием компонентов ароматической природы. Это согласуется с данными элементного состава. Высвобождаясь из растительных остатков в результате их разложения, эти соединения поступают в водную вытяжку, что в последующем отражается на характере почвообразовательных процессов, протекающих в дерново-подзолистых почвах.

ВЫВОДЫ

1. Подстилки, сформировавшиеся под разными лесными сообществами, заметно различаются своими свойствами. Подстилка липняка имеет более высокую зольность, она менее кислая и содержит почти в 2 раза больше обменных оснований, кремния, алюминия и натрия. При этом основные свойства гумусово-элювиальных горизонтов почв под этими подстилками различаются не столь сильно, фактически наследуются показатели обменной кислотности.
2. Состав и свойства подстилок, определяющие кислотность почв, состав низкомолекулярных органических анионов, влияют на подвижность соединений железа и марганца, обуславливают более активный их вынос из гумусово-элювиального горизонта почвы сосняка.
3. Судя по величинам отношений $H : C$, $C : N$ и степени окисленности, органическое вещество подстилки сосняка в целом в большей мере, по сравнению с органическим веществом подстилки липняка, обогащено ароматическими, более окисленными и обедненными азотом органическими соединениями. Подстилка липняка содержит больше алифатических соединений.

4. УФ-спектральный анализ водорастворимых органических веществ подстилок показал относительную обогащенность подстилки сосняка соединениями ароматической природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ариунушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 489 с.
2. *Богатырев Л.Г.* Является ли подстилка самостоятельным биогеоценотическим телом природы? // Экология. 1996. № 6. С. 3–7.
3. *Богатырев Л.Г., Смагин А.В., Акишина М.М., Витязев В.Г.* Географические аспекты функционирования лесных подстилок // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 1. С. 30–36.
4. *Вильямс В.Р.* Почвоведение. М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1946. 456 с.
5. *Гавриленко И.В., Прокушкин А.С., Степень Р.А., Прокушкин С.Г.* Оценка подвижности органического вещества подстилок и почв криолитозоны Средней Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2006. Вып. 3. С. 71–77.
6. *Гришина Л.А.* Роль подстилки как генетического горизонта почв // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 48–49.
7. *Дылис Н.В.* Лесная подстилка в биогеоценотическом освещении // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 60–62.
8. *Зайдельман Ф.Р.* Глееобразование – глобальный почвообразовательный процесс. Теория процесса и практика применения. Воронеж: Кварт, 2016. 328 с.
9. *Карпачевский Л.О.* Подстилка – особый биогеоценотический горизонт лесного биогеоценоза // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 88–89.
10. *Карпачевский Л.О.* Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.
11. *Ковалев И.В.* Биохимия лигнина в почвах: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 2016. 50 с.
12. *Колесников М.П.* Формы кремния в растениях // Успехи биологической химии. 2001. Т. 41. С. 301–332.
13. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы. М.: АН СССР, 1963. 315 с.
14. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
15. *Мамонтов В.Г., Мостовая А.С.* Элементный состав лесных подстилок дерново-подзолистых почв пробных площадей Лесной опытной дачи // Агрэкоинфо. 2021. № 2 (44). DOI: [10.51419/20212225](https://doi.org/10.51419/20212225).

16. Маслов М.Н., Токарева О.А., Караванова Е.И., Маслова О.А., Копеева Е.М. Динамика биологической активности и водорастворимого органического вещества в почвах горной тундры Хибин на склонах разной экспозиции // Почвоведение. 2021. № 4. С. 436–450.
17. Наумов В.Д., Поляков А.Н. 145 лет Лесной опытной даче. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 2009. 512 с.
18. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.
19. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: МГУ, 1981. 272 с.
20. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.
21. Решетникова Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
22. Роде А.А. Избранные труды. Т. 2. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 480 с.
23. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Академический Проект, 2004. 432 с.
24. Сапожников А.П. Лесная подстилка – номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
25. Семенюк О.В., Телесина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43.
26. Холодов В.А., Иванов В.А., Фарходов Ю.Р., Артемьева З.С., Сафронова Н.А., Ярославцева Н.В. Оптические характеристики фракций органического вещества агрегатов типичных черноземов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 56–72. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-56-72](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72).
27. Яшин И.М., Кауричев И.С. Особенности процессов глее- и подзолообразования в почвах таежных экосистем // Известия ТСХА. 1990. Вып. 1. С. 79–98.
28. Chin Y.-P., Alken G., O'Loughlin E. Molecular Weight, Polydispersity, and Spectroscopic Properties of Aquatic Humic Substances // Environmental Science & Technology. 1994. Vol. 28. No. 11. P. 1853–1858.
29. Hansen A.M., Kraus T.E.C., Pellerin B.A., Flek J.A., Downing B.D., Bergamaschi B.A. Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effect of biological and photolytic degradation // Limnology and Oceanography. 2016. Vol. 61. Iss. 3. P. 1015–1032. DOI: [10.1002/lno.10270](https://doi.org/10.1002/lno.10270).
30. Peuravuori J., Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substance // Analytica Chimica Acta. 1997. Vol. 337. P. 133–149.

31. Weishaar J.L., Aiken G.R., Bergamaschi B.A., Fram M.S., Fujii R., Mopper K. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon // Environmental Science & Technology. 2003. Vol. 37. No. 20. P. 4702–4708.

REFERENCES

1. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (A manual on chemical analysis of soils), Moscow: Moscow State University, 1970, 489 p.
2. Bogatyrev L.G., Yavlyaetsya li podstilka samostoyatel'nym biogeotsenoticheskim telom prirody? (Is the litter an independent biogeocenotic body of nature?), *Ekologiya*, 1996, No. 6, pp. 3–7.
3. Bogatyrev L.G., Smagin A.V., Akishina M.M., Vityazev V.G., *Geograficheskie aspekty funktsionirovaniya lesnykh podstilok* (Geographical aspects of the functioning of forest litters), *Vestnik Moskovskogo universiteta*, Ser. 17, Soil Science, 2013, No. 1, pp. 30–36.
4. Vil'yams V.R., *Pochvovedenie* (Soil Science), Moscow: OGIZ-SEL'KhOZGIZ, 1946, 456 p.
5. Gavrilenko I.V., Prokushkin A.S., Stepen' R.A., Prokushkin S.G., Otsenka podvizhnosti organicheskogo veshchestva podstilok i pochv kriolitozony Srednei Sibiri (Evaluation of the mobility of organic matter in the litter and soils of the permafrost zone of Central Siberia), *Khvoinye boreal'noi zony*, 2006, Iss. 3, pp. 71–77.
6. Grishina L.A., Rol' podstilki kak geneticheskogo gorizonta pochv (The role of litter as a genetic soil horizon), In: *Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh* (The role of litter in forest biogeocenoses), Moscow: Nauka, 1983, pp. 48–49.
7. Dylis N.V., Lesnaya podstilka v biogeotsenoticheskom osveshchenii (Forest litter in biogeocenotic lighting), In: *Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh* (The role of litter in forest biogeocenoses), Moscow: Nauka, 1983, pp. 60–62.
8. Zaidel'man F.R., *Gleeobrazovanie – global'nyi pochvoobrazovatel'nyi protsess. Teoriya protsessa i praktika primeneniya* (Gleying is a global soil-forming process. Process theory and application practice), Voronezh: Kvarta, 2016, 328 p.
9. Karpachevskii L.O., Podstilka – osobyi biogeotsenoticheskii gorizont lesnogo biogeotsenoza (Litter is a special biogeocenotic horizon of forest biogeocenosis), In: *Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh* (The role of litter in forest biogeocenoses), Moscow: Nauka, 1983, pp. 88–89.

10. Karpachevskii L.O., *Ekologicheskoe pochvovedenie* (Ecological soil science), Moscow: GEOS, 2005, 336 p.
11. Kovalev I.V., *Biokhimiya lignina v pochvakh: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (Biochemistry of lignin in soils: Extended abstract of Dr. agric. sci. thesis), Moscow, 2016, 50 p.
12. Kolesnikov M.P., *Formy kremniya v rasteniyakh* (Forms of silicon in plants), *Uspekhi biologicheskoi khimii*, 2001, Vol. 41, pp. 301–332.
13. Kononova M.M., *Organicheskoe veshchestvo pochvy* (Soil organic matter), Moscow: AN SSSR, 1963, 315 p.
14. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
15. Mamontov V.G., Mostovaya A.S., *Elementnyi sostav lesnykh podstilok dernovo-podzolistykh pochv probnykh ploshchadei Lesnoi opytnoi dachi* (Elemental composition of forest litters of soddy-podzolic soils of test plots of the Forest Experimental Dach), *Agrekoinfo*, 2021, No. 2 (44), DOI: [10.51419/20212225](https://doi.org/10.51419/20212225).
16. Maslov M.N., Tokareva O.A., Karavanova E.I., Maslova O.A., Kopeina E.M., *Dinamika biologicheskoi aktivnosti i vodorastvorimogo organicheskogo veshchestva v pochvakh gornoj tundry Khibin na sklonakh raznoi ekspozitsii* (Dynamics of biological activity and water-soluble organic matter in soils of the Khibiny mountain tundra on slopes of different exposures), *Pochvovedenie*, 2021, No. 4, pp. 436–450.
17. Naumov V.D., Polyakov A.N., *145 let Lesnoi opytnoi dache* (145 years anniversary of the Experimental Forest Dach), Moscow: RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva, 2009, 512 p.
18. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Soil humic acids and the general theory of humification), Moscow: MGU, 1990, 325 p.
19. Orlov D.S., Grishina L.A., *Praktikum po khimii gumusa* (Workshop on the chemistry of humus), Moscow: MGU, 1981, 272 p.
20. Perel'man A.I., *Geokhimiya landshafta* (Geochemistry of the landscape), Moscow: Vysshaya shkola, 1966, 392 p.
21. Reshetnikova T.V., *Lesnye podstilki kak depo biogennykh elementov* (Forest litter as a depot of biogenic elements), *Vestnik KrasGAU*, 2011, No. 12, pp. 74–81.
22. Rode A.A., *Izbrannye Trudy* (Selected works), Vol. 2, Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 480 p.
23. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Akademicheskii Proekt, 2004, 432 p.

24. Sapozhnikov A.P., Lesnaya podstilka – nomenklatura, klassifikatsiya i indeksatsiya (Forest litter – nomenclature, classification and indexation), *Pochvovedenie*, 1984, No. 5, pp. 96–105.
25. Semenyuk O.V., Telesina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Ya.D., Otsenka vnutribiogeotsenoznoi izmenchivosti lesnykh podstilok i travyano-kustarnichkovoi rastitel'nosti v elovykh nasazhdeniyakh (Evaluation of intrabiogeocenotic variability of forest litter and grass-shrub vegetation in spruce plantations), *Pochvovedenie*, 2020, No. 1, pp. 31–43.
26. Kholodov V.A., Ivanov V.A., Farkhodov J.R., Safronova N.A., Artemyeva Z.S., Jaroslavceva N.V., The Optical Characteristics of Aggregates Organic Matter Fractions in Typical Chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp. 56–72, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-56-72](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72).
27. Yashin I.M., Kaurichev I.S., Osobennosti protsessov glee- i podzoloobrazovaniya v pochvakh taezhnykh ekosistem (Peculiarities of processes of gley and podzol formation in soils of taiga ecosystems), *Izvestiya TSKhA*, 1990, Iss. 1, pp. 79–98.
28. Chin Y.-P., Alken G., O'Loughlin E., Molecular Weight, Polydispersity, and Spectroscopic Properties of Aquatic HumicSubstans, *Environmental Science & Technology*, 1994, Vol. 28, No. 11, pp. 1853–1858.
29. Hansen A.M., Kraus T.E.C., Pellerin B.A., Flek J.A., Downing B.D., Bergamaschi B.A., Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effect of biological and photolytic degradation, *Limnology and Oceanography*, 2016, Vol. 61, Iss. 3, pp. 1015–1032, DOI: [10.1002/lno.10270](https://doi.org/10.1002/lno.10270).
30. Peuravuori J., Pihlaja K., Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substance, *Analytica Chimica Acta*, 1997, Vol. 337, pp. 133–149.
31. Weishaar J.L., Aiken G.R., Bergamaschi B.A., Fram M.S., Fujii R., Mopper K., Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon, *Environmental Science & Technology*, 2003, Vol. 37, No. 20, pp. 4702–4708.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 111

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Почвенный институт имени В.В. Докучаева
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
<https://bulletin.esoil.ru>
e-mail: bulletin@esoil.ru

Сдано в набор 25.09.2022 г.
Подписано в печать 25.09.2022 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 11,8 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