

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 120

Москва
2024

<https://bulletin.esoil.ru>

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

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

Dokuchaev Soil Bulletin

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

Volume 120

**Moscow
2024**

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Editorial board:

A-Xing Zhu (University of Wisconsin-Madison, USA)
B. M. Kogut (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia)
L. Montanarella (Institute for Environment and Sustainability – European Commission’s Joint Research Centre (IES JRC), Italy)
A. B. Rozanov (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”, 2024 г.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации России <i>Столбовой В.С., Гребенников А.М., Шилов П.М., Духанин Ю.А.</i>	6
Анализ динамики запасов органического вещества в пахотных почвах Ямала: вычислительные эксперименты с моделью ROMUL <i>Надпорожская М.А., Быховец С.С., Низамутдинов Т.И., Моргун Е.Н., Абакумов Е.В.</i>	48
Микробиологические индикаторы раннеголоценовой притеррасной почвы долины реки Мзымта Черноморского побережья Кавказа <i>Рогожина Е.В., Моисеева Е.В., Худокормов А.А., Захарихина Л.В.</i>	84
Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность <i>Хирк А.В., Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В., Петросян Р.Д.</i>	107
Определение давления тракторов на почву и картографирование ее уплотнения <i>Адылин И.П., Comparetti A., Greco C., Ланик В.П., Ланик П.В., Orlando S.</i>	136
Закономерности распределения цинка, меди и свинца в различных размерных фракциях агрегатов городских почв Ростова-на-Дону <i>Тагивердиев С.С., Плахов Г.А., Сальник Н.В., Безуглова О.С., Горбов С.Н.</i>	164
Оценка загрязнения почв г. Улан-Удэ полициклическими ароматическими углеводородами <i>Жаксылыков Н.Б., Кошелева Н.Е., Завгородняя Ю.А.</i>	185
Влияние минерального удобрения пролонгированного действия на интенсивность мобилизации почвенного фосфора и калия <i>Васильева Н.А., Абасов Ш.М., Владимиров А.А., Духанин Ю.А., Перевертин К.А., Гаплаев М.Ш., Баматов И.М.</i>	231

Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений
элементов в почве

Пономарев К.О., Дрягина А.А.,

Филимоненко Е.А., Димитрюк И.Д. 265

Способ получения и возможности применения новых
комплексных удобрений из флотационных шламов – отходов
переработки калийно-магниевых руд

Сметанников Ан.Ф., Корляков К.Н., Оносов Д.В.,

Цема Л.Г., Оносова Е.Ф., Шишков Д.Г.,

Васбиева М.Т., Сметанников Ал.Ф. 295

CONTENTS

Towards a national model of humus (carbon) budget management in
soils of agroecosystems in the Russian Federation

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M.,

Shilov P.M., Dukhanin Yu. A. 6

Analysis of organic matter stock dynamics in arable soils of Yamal:
simulation experiments with the ROMUL model

Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S.,

Nizamutdinov T.I., Morgun E.N., Abakumov E.V. 48

Microbiological indicators of early Holocene near-terrace soil in the
valley of the Mzymta River on the Black Sea coast of the Caucasus

Rogozhina E.V., Moiseeva E.V.,

Khudokormov A.A., Zakharikhina L.V. 84

Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye:
composition and strength of aggregates

Khirk A.V., Khaidapova D.D.,

Karpova D.V., Petrosyan R.D. 107

Computing the pressure of agricultural tractors on soil and mapping its compaction

*Adylin I.P., Comparetti A., Greco C.,
 Lapik V.P., Lapik P.V., Orlando S., 136*

Regularity of zinc, copper, and lead distribution in different size fractions of Rostov-on-Don urban soil aggregates

*Tagiverdiev S.S., Plakhov G.A., Salnik N.V.,
 Bezuglova O.S., Gorbov S.N. 164*

Assessment of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulan-Ude

Zhaxylykov N.B., Kosheleva N.E., Zavgorodnyaya Yu.A. 185

Effect of slow-release mineral fertilizer on the intensity of phosphorus and potassium mobilization in soil

*Vasilyeva N.A., Abasov Sh.M., Vladimirov A.A., Dukhanin Yu.A.,
 Perevertin K.A., Gaplaev M.Sh., Bamatov I.M. 231*

Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in the soil

*Ponomarev K.O., Dryagina A.A.,
 Filimonenko E.A., Dimitryuk I.D. 265*

Method of obtaining and possibility of using of new complex fertilizers from flotation sludge – potassium-magnesium ore processing wastes

*Smetannikov A.F., Korlyakov K.N., Onosov D.V.,
 Tsema L.G., Onosova E.F., Shishkov D.G.,
 Vashbieva M.T., Smetannikov A.I.F. 295*

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-6-47



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Шилов П.М., Духанин Ю.А. Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 6-47. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-6-47

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Shilov P.M., Dukhanin Yu. A., Towards a national model of humus (carbon) budget management in soils of agroecosystems in the Russian Federation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 6-47, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-6-47

Благодарность:

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

Acknowledgments:

The study was carried out as part of the implementation of the most important innovative project of national significance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation. Ensuring the creation of a system for recording data on flows of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6).

Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации

© 2024 г. В. С. Столбовой*, А. М. Гребенников,
П. М. Шилов, Ю. А. Духанин

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

Поступила в редакцию 26.06.2024, после доработки 06.07.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Изучена перспектива адаптации разработанных в Российской Федерации (РФ) двух методов мониторинга плодородия сельскохозяйственных почв (баланса гумуса, БГ) под посевами яровой и озимой пшеницы (далее зерновые культуры) для целей климатических проектов. Выявлено, что метод РосНИИземпроекта (1998) занижает среднюю величину БГ до -7.7 ц/га по РФ в целом. Показано, что метод РосНИИземпроекта (1998) имеет логические ошибки в модели расчета. В результате метод не рекомендуется к использованию. Метод ЦИНАО (2000) имеет более логичную модель расчета. Согласно этому методу, средняя величина БГ в почвах под зерновыми культурами для РФ в целом положительна и составляет 3.3 ц/га (0.71 тCO₂-экв/га углеродных единиц). Эта величина составляет ≈0.3% от средних запасов гумуса в пахотных почвах РФ (108 тC/га). Годовая величина изменения запасов гумуса при возделывании яровой и озимой пшеницы несоизмеримо меньше общих запасов гумуса в почве. Статистически достоверная оценка изменений содержания гумуса требует огромного количества почвенных проб. Это делает процедуру верификации экономически нецелесообразной. Другой вариант – увеличение времени накопления гумуса в почвах. Считается (IPCC, 2003), что достаточным является 20-летний период накопления, что соответствует продолжительности почвенных климатических проектов. Предложен коэффициент (0.216) пересчета средних запасов гумуса (ц/га) на величину углеродной единицы (тCO₂-экв/га). Суммарная секвестрация углерода почвами под зерновыми культурами составила около 11 млн 914 тыс. тCO₂-экв. Учет БГ существенно корректирует рассчитанные значения выбросов сельскохозяйственного производства и снижает последние практически на 10% (со 116 до 105 млн тCO₂-экв в 2022 г.). Для обеих моделей мониторинга плодородия почв рассчитана оценка качества регрессионной зависимости БГ от общей биомассы фотосинтеза (ОБФ). Показано, что согласно t-критерию Фишера на 5%-ном уровне значимости исследованная связь является достоверной и характеризуется квадратами коэффициента корреляции (R^2), равными 0.554 и 0.998. В соответствии со шкалой Чеддока, теснота коррелятивной связи БГ с ОБФ для озимой пшеницы оценивается как высокая, для яровой – как очень высокая.

Ключевые слова: климатический проект; запасы органического вещества в почвах; моделирование содержания углерода; углеродные единицы.

Towards a national model of humus (carbon) budget management in soils of agroecosystems in the Russian Federation

© 2024 V. S. Stolbovoy*, A. M. Grebennikov,
P. M. Shilov, Yu. A. Dukhanin

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

Received 26.06.2024, Revised 06.07.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: The prospect of adapting two methods for monitoring the fertility of agricultural soils (humus balance, HB) under spring and winter wheat crops (hereinafter referred to as grain crops) developed in the Russian Federation (RF) for the purposes of climate projects has been studied. It was revealed that the RosNIIZemproekt method (1998) underestimates the HB average value to -7.7 c/ha for RF. The RosNIIZemproekt method (1998) has logical errors in the calculation model and is not recommended for use. The TsINAO method (2000) has a more logical calculation model. According to this method, the average value of HB in soils for RF is generally positive and amounts to 3.3 c/ha (0.71 tCO₂-eq/ha carbon units). This value constitutes ≈0.3% of average humus reserves in arable soils of the RF (108 tC/ha). The annual value of change in humus content under spring and winter wheat is incommensurably less than the total humus reserves in the soil. Statistically reliable assessment of changes in humus content requires a huge number of soil samples. This makes the verification procedure economically inexpedient. Another option is proposed to increase the time of humus accumulation. It is considered (IPCC, 2003) that a 20-year accumulation period is sufficient, which corresponds to the duration of soil climate projects. A coefficient (0.216) has been proposed for converting humus reserves (c/ha) to the value of a carbon unit (tCO₂-eq/ha). The total sequestration of carbon by soils under grain crops in 2022 was about 11 million 914 thousand tCO₂-eq. HB accounting significantly compensates for calculated emissions from agricultural production and reduces them by almost 10% (from 116 to 105 million tons CO₂-eq in 2022). For both models of fertility monitoring, an assessment was made of the quality of the regression dependence of HB on the total biomass of photosynthesis (TBP) in soils under grain crops. It is shown

that according to Fisher's t-test at a 5% significance level, the studied relationship is significant and characterized by the squares of the correlation coefficient (R^2) equal to 0.554 and 0.998. In accordance with the Chaddock scale, the closeness of the correlative relationship between HB and TPB for winter wheat is assessed as high, and for spring wheat as very high.

Keywords: climate project; stock of organic carbon in soils; carbon content modeling; carbon unit.

ВВЕДЕНИЕ

Использование сельскохозяйственных почв является одним из легитимных инструментов климатических проектов в целях поглощения парниковых газов. В разделе “Землепользование, Изменение землепользования и Лесного хозяйства” (ЗИЗЛХ) Киотского протокола (Watson et al., 2000, Статьи 3.3 и 3.4) предусмотрены варианты модификации производства в направлении внедрения углерод-, гумуснакопительных технологий природоохранного, органического и восстановительного сельского хозяйства. Очевидно, что переход на углероднакопительные технологии требует привлечения дополнительных ресурсов. При этом экономическая эффективность от вложений носит риски того, что планируемая величина секвестрации углерода в почвах в каких-то ситуациях не будет достигнута в связи с разнообразием почвенных условий, множеством возможных технологий и др. Использование расчетных моделей позволяет подобрать вариант наиболее результативного проекта, тем самым снизить отмеченные риски и повысить экономическую эффективность перехода на углероднакопительные технологии в целях климатических проектов. Приведенный аргумент в поддержку развития национальной модели управления углеродным циклом в почвах является обязательным для стран 3-го уровня инвентаризации парниковых газов (IPCC, 2003, 2006), к которым, согласно Киотскому протоколу, относится РФ (Столбовой и др., 2023).

РФ имеет огромный опыт фундаментальных исследований почвенного органического вещества (ПОВ) (Тюрин, 1937; Кононова, 1984; Орлов, 1992). Управление содержанием гумуса в почвах сельскохозяйственного назначения было и остается одной из главных прикладных задач мониторинга плодородия почв (Мине-

ев, 1990; Крылатов, 1996). Для повышения эффективности регулирования содержания гумуса в сельскохозяйственных почвах РФ разработаны несколько эмпирических моделей БГ. Последние решают задачу контроля содержания основных питательных элементов в севооборотах при различных уровнях интенсификации производства. Кроме традиционных вопросов, модели также востребованы в решении современных задач углеродного баланса почв, обозначенных климатическими проектами (Федеральный закон, 2021).

Гумус является частью ПОВ, представленной совокупностью специфических и неспецифических органических веществ, за исключением соединений, входящих в состав живых организмов и их остатков (ГОСТ 20432–83). Образование гумуса является биотическим процессом связывания углекислого газа (CO_2) атмосферы в процессе фотосинтетической деятельности растений и его накопления в почве в виде органических растительных остатков. В процессе разложения и микробной трансформации последних выделяется газообразная фаза CO_2 , которая возвращается в атмосферу (гетеротрофная респирация), а оставшаяся твердая масса формирует ПОВ. Содержание ПОВ отражает долгосрочный баланс между высвобождением/эмиссией и поглощением/накоплением CO_2 . Этот баланс выступает объектом моделирования в целях управления углеродным циклом в рамках мероприятий ЗИЗЛХ. При этом баланс *эмиссия* $\leftrightarrow$ *поглощение* определяется как среднее изменение содержания ПОВ за 20-летний период в верхнем 30-сантиметровом слое почв (IPCC, 2000, 2003).

Содержание гумуса неодинаково для различных почв и во многом определяет разницу в их плодородии, т. е. способности удовлетворять потребность растений в элементах питания, влаге и воздухе, а также обеспечении условий для их нормальной жизнедеятельности (ГОСТ 20432–83). В сельскохозяйственном землепользовании нативная экосистема трансформируется в агроэкосистему – природно-техногенный комплекс для производства сельскохозяйственной продукции. Отметим, что важную роль в углеродном цикле агроэкосистемы играют агротехнологии, которые тесно связывают задачу регулирования углеродного цикла для устойчивого получения/увеличения продукции сельскохозяй-

ственного производства и снижения концентрации парниковых газов в атмосфере.

Разносторонняя агрономическая и экологическая роль гумуса в функционировании агроэкосистем определяет необходимость в постоянном регулировании его содержания и воспроизводства (Семенов, Когут, 2015). К основным приемам регулирования и воспроизводства гумуса при земледельческом использовании почв относятся: структура севооборотов, обеспечивающая определенный режим расхода гумуса и поступления его в почву; осуществление приемов, способствующих получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур и, как следствие, поступлению в почву повышенного количества органических остатков после уборки культуры; травосеяние; внесение органических удобрений; сидерация; приемы химической мелиорации, создающие благоприятные условия для гумификации и закрепления в почве вновь образованных гумусовых веществ (Орлов, 1992). Перечисленные приемы регулирования содержания ПОВ выступают также и методами поглощения углерода сельскохозяйственными почвами в климатических проектах.

Целью исследований является анализ возможного применения методов расчета БГ в почвах агроэкосистем РФ, разработанных для мониторинга плодородия сельскохозяйственных культур, в рамках климатических проектов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В расчетах использовались данные о размерах посевных площадей и урожайности зерновых культур по состоянию на 2022 г. (рис. 1). Величина урожая пересчитана на фракции биомассы, включая солому, пожнивные остатки и корни (Крылатов, 1996). Сумма всех фракций биомассы ежегодной продукции составляет величину ОБФ зерновых культур на 2022 г. (рис. 2). Представленные карты (рис. 1, 2) демонстрируют фрагментированную картину распределения посевов и, соответственно, урожая и ОБФ зерновых культур, что связано с приуроченностью показателей к отдельным производственным участкам. Тем самым из анализа исключаются почвы, не использованные в 2022 г. под посевы зерновых культур, а также почвы несельскохозяйственного

назначения.

Важно отметить, что в исследовании используются данные урожая зерновых, содержащиеся в государственной сельскохозяйственной статистике (Сельское хозяйство..., 2023). Такой подход соответствует рекомендации Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2003, 2006) для стран третьего уровня подсчетов эмиссии парниковых газов.

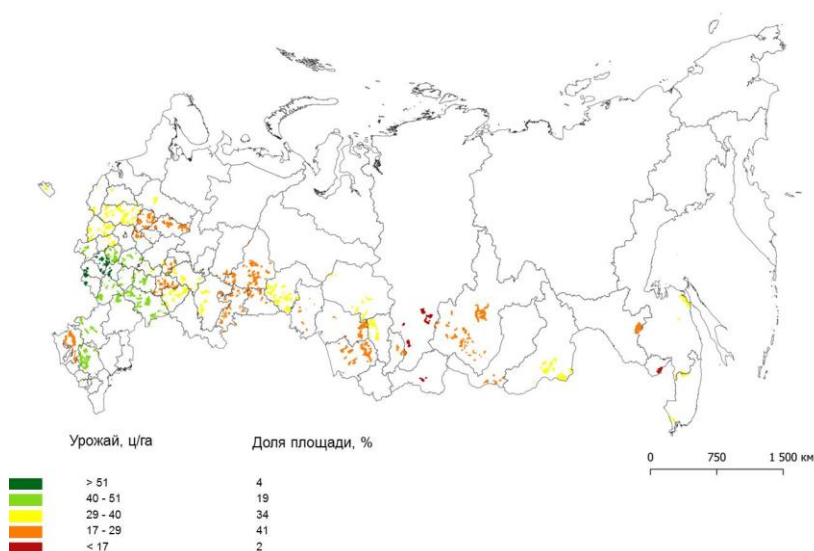


Рис. 1. Урожай зерновых культур в субъектах РФ в 2022 г.

Fig. 1. Grain harvest in the regions of the Russian Federation in 2022.

Расчет БГ проводился по двум, принятым в РФ, методам: 1) РосНИИземпроекта (1998) и 2) ЦИНАО (2000). Основное различие между этими методами состоит в подходах расчета минерализации гумуса. Согласно первому методу, минерализация гумуса определяется опосредованно – через потребность культур в азоте. Во втором методе этот показатель устанавливается непосредственно через значение почвенно-климатических условий, влияющих на минерализацию почвенного органического вещества.

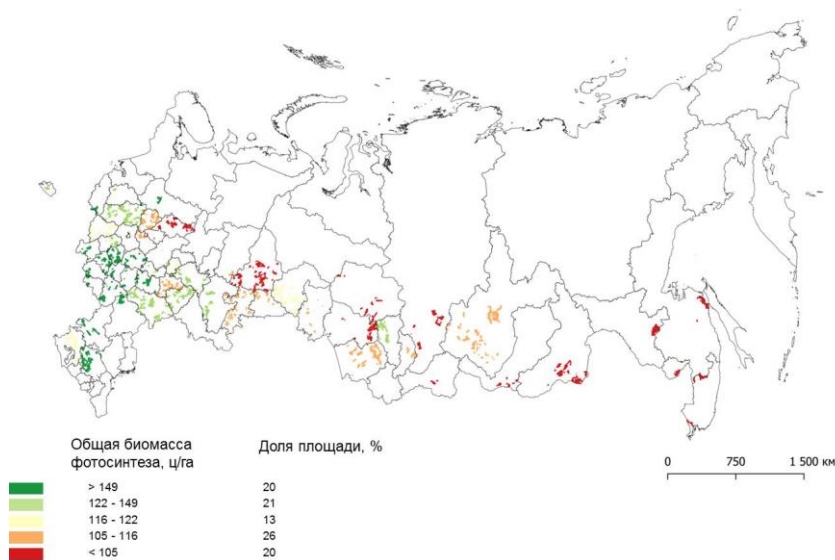


Рис. 2. Общая биомасса фотосинтеза (ОБФ) зерновых культур в субъектах РФ в 2022 году.

Fig. 2. Total biomass of photosynthesis (TBP) of grain crops in the regions of the Russian Federation in 2022.

Метод РосНИИземпроекта (1998) определяет БГ по формуле:

$$\text{БГ} = K_{\text{гум}} * (\text{По} + \text{К}) - 20 * 0.5 * K_{\text{п}} * K_{\text{т}} * [(\text{CNY} * \text{У} + \text{CNПп} * \text{Пп}) - \text{АФ}] / 100,$$

где $K_{\text{гум}}$ – коэффициент гумификации; По – количество пожнивных остатков, ц/га; К – количество корневых остатков, ц/га; У – урожай основной продукции, ц/га; Пп – урожай побочной продукции, ц/га; АФ – поступление азота за счет азотфиксации, кг/га (табл. 1); CNY – содержание азота в основной продукции, %; CNПп – содержание азота в побочной продукции, %; $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент на вынос азота в зависимости от гранулометрического состава почв (табл. 2); $K_{\text{т}}$ – поправочный коэффициент на вынос азота, связанный с технологией возделывания сель-

скохозяйственных культур (табл. 3); 20 – коэффициент пересчета содержание азота в количество гумуса; 0.5 – доля от потребности культуры в азоте, восполняемая за счет минерализации гумуса; 100 – коэффициент пересчета кг/га в ц/га.

Таблица 1. Потребление атмосферного азота бобовыми культурами (% от общего содержания в фитомассе растений)

Table 1. Consumption of atmospheric nitrogen by leguminous crops (% of total content in plant biomass)

Культура	Потребление азота из воздуха
Клевер, люцерна	70
Смесь бобовых и злаков	50
Однолетние бобовые	40
Однолетние травы (смесь злаковых и бобовых)	25

Таблица 2. Поправочные коэффициенты на вынос азота в зависимости от гранулометрического состава почв (Кп)

Table 2. Correction factors for nitrogen removal depending on the soil particle size distribution (Kp)

Гранулометрический состав почв	Поправочные коэффициенты
Тяжелый суглинок	0.8
Средний суглинок	1.0
Легкий суглинок	1.2
Супесь	1.4
Песок	1.8

Количество пожнивных и корневых растительных остатков определяется из уравнения регрессии по величине урожайности культуры.

Метод ЦИНАО (2000) определяет БГ по формуле:

$$\text{БГ} = \text{Кгум} * \text{Квро} * \text{У} - 10 * \text{G} * \text{Н} * \text{D} * \text{Кмин} * \text{Кбо},$$

где Кгум – коэффициент гумификации; Квро – коэффициент выхода растительных остатков; У – урожай основной продукции, ц/га; G – содержание гумуса в почве, %; Н – мощность пахотного слоя, см; D – объемная масса почвы, г/см³; Кмин – коэффициент минерализации гумуса (табл. 4); Кбо – относительный индекс биологической продуктивности (табл. 5); 10 – коэффициент пересчета тонн в центнеры.

Таблица 3. Поправочные коэффициенты на вынос азота, связанные с технологией возделывания сельскохозяйственных культур (Кт)

Table 3. Correction factors for nitrogen removal related to agricultural crop cultivation technology (Kt)

Гранулометрический состав почв	Поправочные коэффициенты
Многолетние травы	1.0
Зерновые и другие однолетние культуры	1.2
Пропашные культуры	1.6

Поскольку БГ, рассчитанный по обоим методам, зависит от величины урожая культуры, то была сделана попытка установления различий между результатами, полученными разными методами, путем определения вида зависимости БГ от ОБФ. С этой целью использовался регрессионный и корреляционный анализы.

Оценка значимости уравнения регрессии выполнена на основе t-критерия Стьюдента, фактическое значение которого t_b вычислялось как отношение абсолютной величины коэффициента b к его стандартной ошибке (SE):

$$t_b = |b|/SE,$$

где:

$$SE = \text{SQRT}(\text{SUM}(\text{БГ}_{\text{зп1фI}} - \text{БГ}_{\text{зп1вI}})^2 / (N - 1) * (N - 2) * \sigma_{\text{ОФ1}}),$$

где I = 1...N; $\text{БГ}_{\text{зп1фI}}$ – фактическое значение баланса гумуса для I-го региона; $\text{БГ}_{\text{зп1вI}}$ – значение баланса гумуса для I-го региона, вычисляемое по уравнению регрессии; N – число субъектов; $\sigma_{\text{ОФ1}}$ – среднее квадратичное отклонение величин общей фито-

массы; SQRT – квадратный корень; SUM – знак суммы.

Качество уравнения регрессии устанавливалось по F-критерию Фишера, который позволяет оценить точность прогноза по уравнению регрессии в сравнении с прогнозом по среднему. Фактическое значение критерия Фишера в данном случае вычислялось по формуле:

$$F_{\text{факт}} = (R^2 / (1 - R^2)) * (N - 2).$$

Сравнивая фактическое значение $F_{\text{факт}}$ и табличное $F_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и числе степеней свободы 1 и $N - 2$ (N – число сравниваемых пар чисел) принимается решение:

- если $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, то построенная модель “лучше” прогноза по среднему;

- если $F_{\text{факт}} < F_{\text{табл}}$, то качество построенной модели сравнимо с точностью прогноза по среднему.

Величина среднего содержания гумуса для почв отдельного субъекта РФ взята из информационно-справочной базы данных индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ (Столбовой и др., 2020; Свидетельство..., 2021). В каждом из субъектов была установлена погрешность определения количества гумуса в почвах. Для этого погрешность определения содержания гумуса в почве согласно ГОСТ 26213–2021, выраженную в процентах, переводили в единицы измерения БГ в ц/га в пахотном горизонте, по формуле:

$$PG = 10 * dG * H * D,$$

где PG – погрешность определения гумуса, ц/га; dG – погрешность определения содержания гумуса в почве согласно ГОСТ 26213–2021, %; H – мощность пахотного слоя, см.; D – объемная масса почвы, г/см³; 10 – коэффициент пересчета тонн в центнеры.

Для перевода среднего значения величины БГ (ц/га) в углеродные единицы, измеряемые в тоннах углерод эквивалентов углекислого газа (тCO₂-экв/га), необходимо выполнить пересчет:

$$K_{\text{CO}_2\text{-экв}} = [1 / (10 * 1.724)] * 3.67 = 0.216,$$

Таблица 4. Коэффициенты минерализации гумуса в почвах сельскохозяйственных зон, $K_{\min}$
Table 4. Humus mineralization coefficients in soils of agricultural zones ($K_{\min}$)

Зоны, наименование почв Культуры, технологии	Нечерноземная	Лесостепная		Степная
	Дерново- подзолистые, светло-серые лесные	Темно-серые лесные, черноземы оподзоленные и сильно выщелоченные	Черноземы выщелоченные и типичные	Черноземы обыкновенные и южные
Многолетние травы	0.0067	0.0037	0.0032	0.0027
Зерновые	0.0110	0.0060	0.0052	0.0045
Пропашные	0.0260	0.0125	0.0108	0.0095
Чистые пары	0.0310	0.0162	0.0140	0.0120

где 10 – коэффициент пересчета центнеров в тонны; 1.724 – коэффициент пересчета гумуса в углерод; 3.67 – коэффициент пересчета углерода в CO₂-экв. (углеродные единицы).

Суммарный БГ для субъекта РФ и страны в целом определяется умножением средней величины БГ на площадь возделывания зерновых в регионе.

Расчеты выполнялись в программной среде MATLAB 7.

Таблица 5. Относительный индекс биологической продуктивности, $K_{бр}$
Table 5. Relative index of biological productivity ($K_{бр}$)

Федеральные округа	$K_{бр}$
Северо-Западный	0.84
Центральный	1.11
Приволжский	0.93
Северо-Кавказский	1.30
Южный	1.30
Уральский	0.93
Сибирский	0.81
Дальневосточный	0.93

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Метод РосНИИземпроекта (1998)

Как следует из таблиц 6 и 7, БГ в почвах под зерновыми культурами в субъектах РФ отрицательный. Исключение составляет БГ в почвах Еврейской автономной области (0.8 ц/га). Небольшие величины накопления гумуса определяются урожаем зерновых в этом субъекте, равным 1.7 ц/га. Для создания этого урожая зерновых потребовалось 9.1 кг/га азота, в том числе за счет минерализации гумуса 4.6 кг/га. Это количество, согласно логике модели подсчета, соответствовало минерализации 0.9 ц/га гумуса, что было меньше его поступления с растительными остатками. БГ в почвах под зерновыми в остальных субъектах страны был отрицательным.

Таблица 6. Средняя величина БГ в почвах под посевами озимой пшеницы в регионах РФ (метод РосНИИземпроект, 1998)

Table 6. Average value of HB in soils under winter wheat in the regions of the Russian Federation (RosNIIZemProekt method, 1998)

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Поживные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Российская Федерация	16.723	165.3	44.5	62.9	13.5	42.6	1.579	1	1.2	1.895	0.947	11.2	18.9	-7.7
Центральный федеральный округ	3911.8	178.3	49.9	66.9	14.0	46.1	1.737	1	1.2	2.084	1.042	12.0	20.8	-8.8
Белгородская область	437.5	196.1	56.2	72.4	14.7	50.9	1.952	0.8	1.2	1.874	0.937	13.1	18.7	-5.6
Брянская область	124.9	165.1	44.4	62.9	13.5	42.5	1.576	1.0	1.2	1.891	0.946	11.2	18.9	-7.7
Владимирская область	26.4	113.9	26.2	47.1	11.6	28.7	0.953	1.2	1.2	1.373	0.687	8.1	13.7	-5.6
Воронежская область	836.2	173.3	47.6	65.4	13.8	44.7	1.677	0.8	1.2	1.610	0.805	11.7	16.1	-4.4
Ивановская область	21.1	105.4	23.5	44.2	10.2	27.0	0.870	1.0	1.2	1.045	0.523	7.4	10.4	-3.0
Калужская область	39.5	127.2	30.3	51.2	12.1	32.3	1.115	1.0	1.2	1.338	0.669	8.8	13.3	-4.5
Костромская область	26.9	84.1	17.9	34.7	8.0	23.0	0.671	1.2	1.2	0.966	0.486	6.2	9.7	-3.5
Курская область	421.2	206.9	60.6	75.7	15.1	53.8	2.085	0.8	1.2	2.001	1.001	13.8	20.0	-6.2

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гтум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Липецкая область	370.4	190	54.6	70.5	14.5	49.2	1.879	0.8	1.2	1.804	0.902	12.7	18.0	-5.3
Московская область	85.0	151.6	41.0	58.7	13.0	38.9	1.412	1.0	1.2	1.694	0.847	10.4	16.9	-6.5
Орловская область	404.6	187	51.7	69.6	14.4	48.4	1.842	0.8	1.2	1.768	0.884	12.5	17.6	-5.1
Рязанская область	339.2	168.8	47.3	64.0	13.7	43.5	1.620	1.0	1.2	1.944	0.972	11.4	19.4	-8.0
Смоленская область	43.4	120.6	28.5	49.2	11.8	30.5	1.036	1.2	1.2	1.492	0.746	8.5	14.9	-6.4
Тамбовская область	438.6	166.4	45.9	63.3	13.6	42.8	1.592	0.8	1.2	1.528	0.764	11.2	15.2	-4.0
Тверская область	11.9	142.5	36.9	55.9	12.7	36.4	1.301	1.0	1.2	1.561	0.781	9.8	15.6	-5.8
Тульская область	304.5	176.3	48.4	66.3	14.0	45.5	1.712	0.8	1.2	1.643	0.822	11.9	16.4	-4.5
Ярославская область	6.3	105.7	23.7	44.4	10.2	27.0	0.874	1.0	1.2	1.049	0.525	7.4	10.4	-3.0
Северо-Западный федеральный округ	128.4	173.7	49.2	65.5	13.9	44.8	1.680	1.0	1.2	2.016	1.008	11.7	20.2	-8.5
Вологодская область	1.5	102.2	22.0	40.8	9.4	25.6	0.81	1.0	1.2	0.974	0.487	7.3	9.7	-2.4

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Козфф., в завис. от гран. состава, Кп	Козфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гтум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Калининградская область	84.9	187.2	54.7	69.7	14.4	46.3	1.85	1.0	1.2	2.214	1.107	12.6	22.1	-9.5
Ленинградская область	8.7	147.7	39.5	57.5	12.9	35.7	1.36	1.0	1.2	1.638	0.819	10.1	16.4	-6.3
Новгородская область	1.6	119.1	28.5	48.7	11.8	28.0	1.02	1.0	1.2	1.221	0.611	8.4	12.2	-3.8
Псковская область	31.7	162.4	39.5	65.1	13.8	44.5	1.385	1.0	1.2	1.662	0.831	11.6	16.6	-5.0
Южный федеральный округ	6895.3	174	46.8	65.6	13.9	44.9	1.684	1.0	1.2	2.021	1.011	11.7	20.2	-8.5
Республика Адыгея (Адыгея)	82.3	175.8	50.3	66.1	13.9	43.2	1.71	1.0	1.2	2.047	1.024	11.9	20.5	-8.6
Республика Калмыкия	244.8	114.7	26.8	47.3	11.6	26.8	1.02	1.0	1.2	1.156	0.578	8.1	11.6	-3.5
Краснодарский край	1591.4	217.6	66.4	79.0	15.5	54.5	1.71	1.0	1.2	2.658	1.329	14.4	26.6	-12.2
Республика Крым	533.9	219.6	67.2	79.6	15.6	57.2	2,239	1,0	1,2	2,687	0,027	14,6	26,9	-12,3
Астраханская область	1657.2	137.0	35.4	54.2	12.4	32.8	1.71	1.0	1.2	1.482	0.741	9.5	14.8	-5.3

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Поживные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Коэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Коэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Nпоч	Поступление, Гум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Волгоградская область	4.1	164.7	32.9	62.7	13.5	42.4	1.572	1.0	1.2	1.887	0.944	11.2	18.9	-7.7
Ростовская область	3013.4	149.7	44.9	58.1	12.9	38.4	1.389	0.8	1.2	1.334	0.667	10.3	13.3	-3.0
Северо-Кавказский федеральный округ	2078.4	144.3	38.2	56.5	12.7	34.7	1.33	1.0	1.2	1.588	0.794	9.9	15.9	-6.0
Республика Дагестан	77.6	106.4	23.6	43.5	10.0	27.0	0.86	1.0	1.2	1.035	0.518	7.6	10.4	-2.8
Республика Ингушетия	12.7	134.6	32.6	53.5	12.3	34.3	1.206	1.0	1.2	1.447	724.0	9.3	14.5	-5.2
Кабардино-Балкарская Республика	45.2	137.8	35.7	54.5	12.5	33.0	1.24	1.0	1.2	1.494	0.747	9.5	14.9	-5.4
Карачаево-Черкесская Республика	21.6	168.0	47.3	63.7	13.6	41.1	1.61	1.0	1.2	1.934	0.967	11.4	19.3	-7.9
Республика Северная Осетия-Алания	25.6	121.1	31.1	49.3	11.8	30.7	1.042	1.0	1.2	1.250	0.625	8.5	12.5	-4.5
Чеченская Республика	98.4	116.2	27.4	47.8	11.6	27.2	0.98	1.0	1.2	1.179	0.590	8.2	11.8	-3.6
Ставропольский край	1797.2	149.9	39.5	58.2	12.9	38.4	1.393	0.8	1.2	1.671	0.836	10.3	16.7	-6.4

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Поживные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Коэфф. в завис. от гран. состава, Кп	Коэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Nпоч	Поступление, Гум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Приволжский федеральный округ	3463.9	151.6	38.5	58.7	13.0	38.9	1.412	1.0	1.2	1.694	0.847	10.4	16.9	-6.5
Республика Башкортостан	132.0	129.8	39.4	52.0	12.1	33.0	1.149	1.0	1.2	1.379	0.690	9.0	13.8	-4.8
Республика Марий Эл	21.3	149.7	32.0	58.1	12.9	38.4	1.389	1.0	1.2	1.667	0.834	10.3	16.7	-6.4
Республика Мордовия	166.1	147.1	39.5	57.3	12.8	37.7	1.358	1.0	1.2	1.303	0.602	10.1	13.0	-2.9
Республика Татарстан (Татарстан)	343.1	135	39.0	53.6	12.3	34.4	1.212	0.8	1.2	1.455	0.728	9.3	14.5	-5.2
Удмуртская Республика	14.9	134.3	33.9	53.4	12.3	34.2	1.203	1.0	1.2	1.444	0.722	9.3	14.4	-5.1
Чувашская Республика	70.6	119	34.4	48.7	11.7	30.1	1.017	1.0	1.2	1.342	0.671	8.4	13.4	-5.0
Пермский край	4.0	115.6	30.2	47.6	11.6	29.2	0.975	1.2	1.2	1.170	0.585	8.2	11.7	-3.5
Кировская область	9.4	123.9	26.6	50.2	11.9	31.4	1.077	1.0	1.2	1.292	0.646	8.7	12.9	-4.2
Нижегородская область	195.8	129.1	30.0	51.8	12.1	32.8	1.140	1.0	1.2	1.094	0.547	9.0	10.9	-1.9
Оренбургская область	302.2	169.9	29.8	64.3	13.7	43.8	1.636	0.8	1.2	1.570	0.785	11.5	15.7	-4.2

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Поживные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гтум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Пензенская область	372.2	166.8	45.8	63.4	13.5	43.0	1.598	0.8	1.2	1.534	0.767	11.3	15.3	-4.0
Самарская область	413.3	147.3	45.2	57.4	12.8	37.7	1.361	0.8	1.2	1.307	0.653	10.1	13.1	-3.0
Саратовская область	1168.1	149.1	37.7	57.9	12.9	38.2	1.383	0.8	1.2	1.660	0.830	10.2	16.6	-6.4
Ульяновская область	251.0	115.3	38.1	47.5	11.6	29.1	0.972	1.0	1.2	1.167	0.584	8.1	11.6	-3.5
Уральский федеральный округ	16.5	111.6	25.2	46.4	11.4	28.1	0.928	1.0	1.2	0.891	0.446	7.9	8.9	-1.0
Курганская область	6.0	115.3	24.4	47.5	11.6	29.1	0.972	0.8	1.2	1.167	0.584	8.1	11.6	-3.5
Свердловская область	0.8	105.4	28.3	44.2	10.2	27.0	0.870	1.0	1.2	1.045	0.523	7.4	10.4	-3.0
Тюменская область	2.4	122	23.4	49.6	11.8	30.9	1.054	1.0	1.2	1.265	0.633	8.5	12.6	-4.1
Челябинская область	7.3	116.1	26.0	47.8	11.6	29.3	0.982	1.0	1.2	1.178	0.589	8.1	11.7	-3.6
Сибирский федеральный округ	228.4	94	25.9	39.1	9.0	24.9	0.763	1.0	1.2	1.100	0.550	6.8	11.0	-4.2
Республика Алтай	19.3	72.5	16.4	31.3	7.2	20.6	0.591	1.0	1.2	0.709	0.355	5.1	5.5	-0.4

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гтум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Республика Тыва	19.3	76.3	16.4	31.2	7.1	21.6	0.599	1.0	1.2	0.719	0.360	5.7	7.1	-1.4
Республика Хакасия	0.3	115.9	16.4	47.7	11.6	29.3	0.979	1.0	1.2	0.939	0.470	8.2	9.4	-1.2
Алтайский край	159.7	114	25.3	47.1	11.5	28.8	0.957	0.8	1.2	1.148	0.574	8.0	11.4	-3.4
Красноярский край	5.8	68	26.2	27.5	6.2	20.1	0.521	1.0	1.2	0.625	0.313	5.3	6.2	-0.9
Иркутская область	405.9	116.1	14.2	47.8	11.6	29.3	0.982	1.0	1.2	1.178	0.589	8.1	11.7	-3.6
Кемеровская область (Кузбасс)	23.7	130.8	28.2	52.3	12.2	33.3	1.159	1.0	1.2	1.391	0.696	9.1	13.9	-4.8
Новосибирская область	21.0	84.4	30.3	34.8	8.0	23.1	0.674	1.0	1.2	0.809	0.405	6.2	8.1	-1.9
Омская область	10.8	115.6	18.3	47.6	11.6	29.2	0.975	1.0	1.2	1.170	0.585	8.2	11.7	-3.5
Томская область	7.3	82.9	31.3	34.5	7.9	22.2	0.667	1.0	1.2	0.801	0.401	6.0	8.0	-2.0
Дальневосточный федеральный округ	519.2	82.4	18.2	34.3	7.8	22.1	0.663	1.0	1.2	0.796	0.398	6.0	8.0	-2.0
Республика Бурятия	10.8	55.7	15.0	22.9	5.2	16.1	0.425	1.0	1.2	0.510	0.255	4.3	5.1	-0.8

Продолжение таблицы 6
Table 6 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Козфф., в завис. от гран. состава, Кп	Козфф. на зерновые, Кз	Вынос азота урожаем, Ну	Вынос азота из почвы, Нпоч	Поступление, Гтум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Республика Саха (Якутия)	67.8	69.8	11.5	28.9	6.6	19.3	0.550	1.0	1.2	0.660	0.330	5.2	6.6	-1.4
Забайкальский край	122.8	80.4	17.7	33.4	7.6	21.7	0.645	1.0	1.2	0.775	0.388	5.9	7.7	-1.8
Приморский край	0.1	124.6	30.6	50.4	12.0	29.4	1.08	1.0	1.2	1.300	0.650	8.7	13.0	-4.3
Хабаровский край	9.1	93.3	20.9/-	38.9	8.9	24.6	0.760	1.0	1.2	0.912	0.456	6.7	9.1	-2.4
Амурская область	180.1	54.0	11.1	22.2	5.0	15.7	0.410	1.0	1.2	0.492	0.247	4.1	4.9	-0.8
Еврейская автономная область	5.7	16.4	1.7	6.2	1.2	7.3	0.075	1.0	1.2	0.090	0.045	1.7	0.9	0.8

Таблица 7. Средняя величина БГ в почвах под посевами яровой пшеницы в регионах РФ (метод РосНИИземпроекта, 1998)

Table 7. Average value of HB in soils under spring wheat in the regions of the Russian Federation (RosNIИземproekt method, 1998)

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота с У, Ну	Вынос азота из почвы, Nпоч	Поступление, Гум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Томская область	99.0	28.2	18.3	34.5	7.9	22.2	0.667	1.0	1.2	0.800	0.400	5.4	8.0	-2.6
Дальневосточный федеральный округ	519.2	18.2	18.2	34.3	7.8	22.1	0.663	1.0	1.2	0.796	0.398	5.4	8.0	-2.6
Республика Бурятия	1.8	11.5	11.5	22.9	5.2	16.1	0.425	1.0	1.2	0.510	0.255	3.8	5.1	-1.3
Республика Саха (Якутия)	37.8	18.2	15.0	28.9	6.6	19.3	0.550	1.0	1.2	0.660	0.330	4.7	6.6	-1.9
Забайкальский край	55.2	15.0	17.7	33.4	7.6	21.7	0.645	1.0	1.2	0.774	0.387	5.3	7.7	-2.4

Продолжение таблицы 7
Table 7 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов, тыс. га	Фракции биомассы, ц/га					Вынос азота, ц/га					Статьи баланса гумуса, ц/га		
		Общая биомасса фотосинтеза, ОБФ	Урожай, У	Побочная продукция (солома), Пп	Пожнивные остатки, По	Корневые остатки, К	Вынос азота с У и Пп	Кэфф., в завис. от гран. состава, Кп	Кэфф. на зерновые, Кз	Вынос азота с У, Ну	Вынос азота из почвы, Nпоч	Поступление, Ггум	Минерализация, Гмин	Баланс гумуса, БГ
Приморский край	12.4	17.8	17.9	33.8	7.7	21.9	0.653	1.0	1.2	0.784	0.392	5.3	7.8	-2.5
Хабаровский край	1.7	17.9	20.9	38.9	8.9	24.6	0.760	1.0	1.2	0.912	0.456	6.0	9.1	-3.1
Амурская область	80.2	20.9	11.1	22.2	5.0	15.7	0.321	1.0	1.2	0.385	0.193	3.7	3.9	-0.2
Еврейская автономная область	1.7	16.4	1.7	6.2	1.2	7.3	0.076	1.0	1.2	0.091	0.046	1.5	0.9	0.6

При этом, согласно модели РосНИИземпроекта, величина отрицательного БГ была больше в субъектах с повышенным урожаем, что отмечалось на почвах более легкого гранулометрического состава. Наибольший отрицательный баланс был отмечен под зерновыми в республике Крым (-12.3 ц/га) и Краснодарском крае (-12.2 ц/га). Наименьший отрицательный БГ, равный -0.8 ц/га, был в Амурской области и Республике Бурятия. В субъектах черноземной зоны влияние повышенного урожая зерновых на увеличение отрицательного БГ до определенной степени нивелировалось тяжелосуглинистым гранулометрическим составом почв, при котором вынос азота из почвы снижается.

Во всех федеральных округах БГ под зерновыми культурами был отрицательным. Наибольшая величина отрицательного БГ в почвах получена в Центральном (-8.8 ц/га), Северо-Западном (-8.5 ц/га) и Южном (-8.5 ц/га) федеральных округах. Наименьшая величина отрицательного БГ в почвах отмечена в Уральском (-1.0 ц/га) и Дальневосточном (-2.0 ц/га).

Оценка зависимости БГ от ОБФ показала, что согласно t-критерию Стьюдента, представленные регрессионные уравнения являются значимыми (табл. 8).

Основанием для заключения является то, что рассчитанное значение превышает табличное, взятое на 5%-ном уровне значимости при 69 степенях свободы для почв под озимой и при 8 степенях свободы – под яровой пшеницей. Согласно шкале Чеддока, (Закс, 1974), теснота коррелятивной связи баланса гумуса от ОБФ для озимой пшеницы оценивается как высокая, а для яровой – как очень высокая. Величина критерия Фишера, рассчитанная по зависимости БГ от ОБФ озимой пшеницы, позволила заключить, что качество прогноза по этому уравнению сравнимо с точностью прогноза по среднему. Значение критерия Фишера для яровой пшеницы значительно превышало табличную величину, что свидетельствует о более высокой точности прогноза по уравнению регрессии в сравнении с прогнозом по среднему.

Как видно из таблицы 8, БГ под зерновыми культурами, рассчитанный по методике РосНИИземпроекта, имеет отрицательную линейную корреляцию с ОБФ, т. е. большее поступление растительных остатков приводит к понижению накопления гуму-

са. Этот результат находится в противоречии с существующими данными о том, что увеличение поступления органических остатков в почву приводит к усилению процессов гумусообразования (Орлов, 1992). Полученный результат свидетельствует о том, что методика РосНИИземпроекта воспроизводит ошибку, заложенную в логическую модель подсчета БГ. Одним из наиболее значимых источников ошибки является допущение того, что, восполняемая за счет минерализации гумуса доля потребности культуры в азоте принимается одинаковой для разных уровней урожайности и составляет половину от потребности культуры. Вместе с тем математическая платформа выполнения подсчетов обеспечивает получение достоверных и статистически значимых результатов (табл. 8).

Таблица 8. Оценка качества регрессионной зависимости БГ, рассчитанного по методике РосНИИземпроекта (Бгзп), от ОБФ в почвах под зерновыми культурами

Table 8. Assessment of the quality of the regression dependence of HB, calculated by the RosNIIZemproekt method (Bgzp), on the TBP in soils under grain crops

Регрессионная зависимость Бгзп от ОБФ	t-критерий Стьюдента		Коэффициент корреляции (R)		F-критерий Фишера	
	t факт. ($t_b = b / SE$)	t табл.	R факт.	R крит.	F факт.	F табл.
Бгзп1х = 6.69 – 0.0487*ОФ1	2.74	1.995	- 0.744	0.232	84.06	254.38
Бгзп2 = 1.45 – 0.0412*ОФ2	68.67	2.26	- 0.999	0.666	49.93	58.91

Примечание. Здесь и далее индекс 1 означает, что БГ определялся на полях под озимой пшеницей, индекс 2 – под яровой пшеницей.

Note. Hereinafter index 1 means that Humus balance (HB) was determined on fields under winter wheat, index 2 – under spring wheat.

2. Метод ЦИНАО (2000)

БГ, рассчитанный по методике ЦИНАО, представлен в таблицах 9 и 10. Как следует из таблицы 9, в почвах пашни под озимой пшеницей в 49 субъектах БГ является положительным и изменяется от 0.1 до 16.8 ц/га. В 14 субъектах он отрицателен и варьирует от -0.1 до -13.0 ц/га.

В одном субъекте (Омская область) БГ нейтральный. В почвах пашни величина БГ под яровой пшеницей варьирует от -3.2 до -10.3 ц/га (табл. 10). При этом отрицательные значения БГ в почвах пашни под зерновыми культурами приурочены к субъектам ареала дерново-подзолистых почв таежно-лесной зоны. По всей видимости, это было связано с относительно низкой урожайностью зерновых и более высоким коэффициентом минерализации гумуса в этих субъектах.

БГ в пяти федеральных округах является положительным: в Южном – 9.3 ц/га, в Центральном – 5.9, в Северо-Западном – 5.6 ц/га, в Приволжском – 3.4 и в Северо-Кавказском – 0.3 ц/га. В трех федеральных округах БГ в почвах под зерновыми культурами характеризовался отрицательными значениями: в Уральском он был равен -1.4 ц/га, в Сибирском – -1.6, в Дальневосточном – -6.7 ц/га.

Оценка качества регрессионной зависимости БГ от ОБФ в почвах под зерновыми культурами является достоверной для озимой пшеницы, так как фактическое значение t-критерия превышает табличное. Для яровой пшеницы достоверность связи не подтверждается, поскольку фактическое значение t-критерия на 5%-ном уровне значимости было меньше табличного.

В соответствии со шкалой Чеддока, теснота коррелятивной связи БГ от ОБФ для озимой пшеницы оценивается как высокая, для яровой как умеренная. Величина критерия Фишера, рассчитанная по зависимости БГ от ОБФ как озимой, так и яровой пшеницы, оказалась ниже табличного значения, из чего следует, что качество прогноза по обоим уравнениям сравнимо с точностью прогноза по среднему.

Таблица 9. Средняя величина БГ в почвах под посевами озимой пшеницы в субъектах РФ (методика ЦИНАО, 2000)

Table 9. Average value of HB in soils under winter wheat in the regions of the Russian Federation (TSINAO Method, 2000)

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Ггум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, кб0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Российская Федерация	16.723	44.5	1.3	60.19	0.18	10.8	3.98	21.9	1.29	0.0060	1.11	7.5	3.3
Центральный федеральный округ	3911.8	49.9	1.3	66.69	0.18	12.0	3.14	22.0	1.31	0.0060	1.11	6.1	5.9
Белгородская область	437.5	56.2	1.3	75.53	0.25	18.9	4.78	23.0	1.26	0.0052	1.11	8.0	10.9
Брянская область	124.9	44.4	1.3	60.06	0.18	10.8	2.25	21.3	1.34	0.0110	1.11	7.8	3.0
Владимирская область	26.4	26.2	1.5	39.75	0.18	7.2	1.84	21.5	1.41	0.0110	1.11	6.8	0.4
Воронежская область	836.2	47.6	1.3	64.22	0.25	16.1	4.83	23.4	1.26	0.0052	1.11	8.0	8.1
Ивановская область	21.1	23.5	1.5	36.00	0.18	6.5	1.70	21.7	1.38	0.0110	1.11	6.2	0.3
Калужская область	39.5	30.3	1.3	41.08	0.18	7.4	1.99	21.3	1.39	0.0110	1.11	7.2	0.2
Костромская область	26.9	17.9	1.5	27.60	0.18	5.0	1.92	21.7	1.32	0.0110	1.11	6.7	-1.7
Курская область	421.2	60.6	1.3	80.99	0.25	20.2	4.60	22.6	1.27	0.0052	1.11	7.6	12.6
Липецкая область	370.4	54.6	1.3	72.54	0.25	18.1	4.62	22.5	1.27	0.0052	1.11	7.6	10.5

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Г гум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Московская область	85.0	41.0	1.3	53.30	0.18	9.6	2.00	21.3	1.36	0.0110	1.11	7.1	2.5
Орловская область	404.6	51.7	1.3	70.98	0.25	17.7	2.70	21.3	1.36	0.0052	1.11	4.5	13.2
Рязанская область	339.2	47.3	1.3	61.88	0.18	11.1	4.04	22.1	1.29	0.0060	1.11	7.7	3.4
Смоленская область	43.4	28.5	1.5	43.65	0.18	7.9	3.76	21.7	1.32	0.0110	1.11	13.2	-5.3
Тамбовская область	438.6	45.9	1.3	60.71	0.25	15.2	1.65	21.4	1.28	0.0052	1.11	5.5	9.7
Тверская область	11.9	36.9	1.3	48.75	0.18	8.8	5.03	23.0	1.27	0.0110	1.11	17.9	-9.1
Тульская область	304.5	48.4	1.3	65.65	0.18	11.8	1.80	21.3	1.25	0.0060	1.11	3.2	8.6
Ярославская область	6.3	23.7	1.5	36.15	0.18	6.5	3.94	21.9	1.30	0.0110	1.11	13.7	-7.2
Северо-Западный федеральный округ	128.4	49.2	1.3	64.35	0.18	11.9	2.43	22.9	1.23	0.0110	0.84	6.3	5.6
Вологодская область	1.5	22.0	1.5	33.0	0.18	5.9	2.25	22.3	1.29	0.0110	0.84	6.0	-0.1
Калининградская область	84.9	54.7	1.3	71.1	0.18	12.8	3.00	23.0	1.25	0.0110	0.84	8.0	4.8
Ленинградская область	8.7	39.5	1.5	59.3	0.18	10.7	2.48	23.5	1.19	0.0110	0.84	6.4	4.3
Новгородская область	1.6	28.5	1.3	37.1	0.18	6.7	2.09	22.5	1.19	0.0110	0.84	5.2	1.5
Псковская область	31.7	39.5	1.3	50.7	0.18	9.1	2.35	23.1	1.23	0.0110	0.84	6.2	2.9

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Ггум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Южный федеральный округ	6895.3	46.8	1.3	64.48	0.25	16.1	3.29	22.4	1.36	0.0052	1.30	6.8	9.3
Республика Адыгея (Адыгея)	82.3	50.3	1.5	75.5	0.25	18.9	3.74	25.2	1.39	0.0052	1.30	8.9	10.0
Республика Калмыкия	244.8	26.8	1.3	34.8	0.25	8.7	1.93	18.0	1.44	0.0052	1.30	3.4	5.3
Краснодарский край	1591.4	66.4	1.5	99.6	0.25	24.9	3.85	23.7	1.31	0.0052	1.30	8.1	16.8
Волгоградская область	1657.2	35.4	1.3	59.93	0.25	15.0	3.16	22.0	1.35	0.0052	1.30	6.2	8.8
Астраханская область	4.1	32.9	1.3	48.62	0.25	12.2	2.72	11.0	1.39	0.0052	1.30	2.8	9.4
Ростовская область	3013.4	44.9	1.3	52.39	0.25	13.1	3.78	23.1	1.31	0.0052	1.30	7.7	5.4
Северо-Кавказский федеральный округ	2078.4	38.2	1.5	31.50	0.25	7.9	3.73	23.1	1.31	0.0052	1.30	7.6	0.3
Республика Дагестан	77.6	23.6	1.3	42.12	0.25	10.5	3.48	20.4	1.27	0.0052	1.30	6.1	4.4
Республика Ингушетия	12.7	32.6	1.3	44.85	0.25	11.2	3.76	24.1	1.29	0.0052	1.30	7.9	3.3
Кабардино-Балкарская Республика	45.2	35.7	1.3	68.77	0.25	17.2	3.80	23.4	1.33	0.0052	1.30	8.0	9.2
Карачаево-Черкесская Республика	21.6	47.3	1.3	41.21	0.25	10.3	3.96	23.8	1.30	0.0052	1.30	8.3	2.0

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Г гум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Республика Северная Осетия-Алания	25.6	31.1	1.5	43.95	0.25	11.0	3.72	24.1	1.32	0.0052	1.30	8.0	3.0
Чеченская Республика	98.4	27.4	1.3	53.82	0.25	13.5	3.82	23.7	1.29	0.0052	1.30	8.0	5.5
Ставропольский край	1797.2	39.5	1.3	52.52	0.25	13.1	3.60	22.0	1.34	0.0052	1.30	7.2	5.9
Приволжский федеральный округ	3463.9	38.5	1.3	53.30	0.18	9.6	3.75	22.6	1.31	0.0060	0.93	6.2	3.4
Республика Башкортостан	132.0	39.4	1.3	42.51	0.18	7.7	5.24	23.0	1.31	0.0060	0.93	8.8	-1.1
Республика Марий Эл	21.3	32.0	1.3	52.39	0.18	9.4	1.97	21.2	1.43	0.0060	0.93	3.2	6.2
Республика Мордовия	166.1	39.5	1.3	51.09	0.18	9.2	3.60	21.6	1.33	0.0060	0.93	3.9	5.3
Республика Татарстан (Татарстан)	343.1	39.0	1.3	45.11	0.18	8.1	5.14	23.7	1.32	0.0052	0.93	7.8	0.3
Удмуртская Республика	14.9	33.9	1.3	44.72	0.18	8.0	2.56	22.1	1.28	0.0060	0.93	4.0	4.0
Чувашская Республика (Чувашия)	70.6	34.4	1.5	42.75	0.18	7.7	3.17	21.2	1.37	0.0060	0.93	5.1	2.6
Пермский край	4.0	30.2	1.5	40.80	0.18	7.3	2.23	22.0	1.27	0.0110	0.93	6.4	0.9

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У п/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р п/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Ггум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Кировская область	9.4	26.6	1.3	39.52	0.18	7.1	2.05	22.1	1.23	0.0110	0.93	5.7	1.4
Нижегородская область	195.8	30.0	1.3	42.12	0.18	7.6	2.70	21.3	1.36	0.0110	0.93	8.0	-0.4
Оренбургская область	302.2	29.8	1.3	62.53	0.25	15.6	5.08	24.2	1.28	0.0052	0.93	7.6	8.0
Пензенская область	372.2	45.8	1.3	60.97	0.25	15.2	4.24	22.3	1.29	0.0052	0.93	5.9	9.3
Самарская область	413.3	45.2	1.3	51.22	0.25	12.8	5.40	24.6	1.26	0.0060	0.93	9.3	3.5
Саратовская область	1168.1	37.7	1.3	52.13	0.25	13.0	3.68	23.0	1.33	0.0052	0.93	5.4	7.6
Ульяновская область	251.0	38.1	1.5	40.65	0.18	7.3	4.39	22.6	1.30	0.0060	0.93	7.2	0.1
Уральский федеральный округ	16.5	25.2	1.5	38.55	0.18	6.9	5.49	20.8	1.31	0.0060	0.93	8.3	-1.4
Курганская область	6.0	24.4	1.5	40.65	0.25	10.2	5.81	19.5	1.33	0.0052	0.93	8.3	1.9
Свердловская область	0.8	28.3	1.5	36.00	0.18	6.5	4.85	22.0	1.30	0.0060	0.93	7.7	-1.2
Тюменская область	2.4	23.4	1.5	44.55	0.18	8.0	6.36	21.5	1.30	0.0060	0.93	9.9	-1.9
Челябинская область	7.3	26.0	1.5	41.10	0.18	7.4	4.94	20.2	1.32	0.0060	0.93	7.3	0.1
Сибирский федеральный округ	228.4	25.9	1.5	31.50	0.18	5.7	5.49	21.0	1.30	0.0060	0.81	7.3	-1.6
Республика Алтай	19.3	16.4	1.5	24.60	0.18	4.4	3.42	5.0	1.34	0.0060	0.81	1.1	3.3

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Г гум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Республика Тыва	0.3	16.4	1.5	24.60	0.25	6.2	2.68	19.1	1.36	0.0060	0.81	3.4	2.8
Республика Хакасия	159.7	25.3	1.5	40.95	0.25	10.2	7.11	20.0	1.28	0.0060	0.81	8.8	1.4
Алтайский край	5.8	26.2	1.5	39.90	0.25	10.0	5.56	22.4	1.27	0.0052	0.81	6.7	3.3
Красноярский край	405.9	14.2	1.5	21.30	0.18	3.8	6.03	21.2	1.29	0.0110	0.81	14.7	-10.9
Иркутская область	23.7	28.2	1.5	41.10	0.18	7.4	4.59	21.7	1.30	0.0110	0.81	11.5	-4.1
Кемеровская область Кузбасс	21.0	30.3	1.3	42.90	0.18	7.7	5.63	21.8	1.28	0.0110	0.81	14.0	-6.3
Новосибирская область	10.8	18.3	1.5	27.75	0.18	5.0	6.45	21.6	1.28	0.0110	0.81	15.9	-10.9
Омская область	7.3	31.3	1.5	40.80	0.18	7.3	6.01	19.0	1.32	0.0060	0.81	7.3	0
Томская область	519.2	18.2	1.4	25.4	0.18	4.6	5.37	22.41	1.31	0.0110	0.81	14.0	-9.4
Дальневосточный федеральный округ	10.8	15.0	1.4	25.5	0.18	4.6	4.48	20.32	1.21	0.0110	0.93	11.3	-6.7
Республика Якутия (Саха)	67.8	11.5	1.4	21.0	0.18	3.8	2.56	20.15	1.19	0.0110	0.93	6.3	-2.5
Республика Бурятия	122.8	17.7	1.4	16.1	0.18	2.8	5.03	19.78	1.44	0.0110	0.93	14.7	-11.9
Забайкальский край	0.1	30.6	1.4	24.8	0.18	4.5	5.19	17.96	1.43	0.0110	0.93	13.6	-9.1
Приморский край	9.1	20.9	1.3	39.8	0.18	7.2	3.55	21.67	1.13	0.0110	0.93	8.9	-1.2

Продолжение таблицы 9
Table 9 continued

Параметры баланса Регионы	Площадь посевов тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растительных остатков, Р ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Ггум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Хабаровский край	180.1	11.1	1.4	29.3	0.18	5.4	4.07	20.76	1.08	0.0110	0.93	9.3	-3.9
Амурская область	5.7	1.7	1.4	15.5	0.18	2.8	4.24	20.24	1.15	0.0110	0.93	10.1	-7.3
Еврейская автономная область	1.5	22.0	1.4	2.4	0.18	0.4	4.81	21.56	1.26	0.0110	0.93	13.4	-13.0

Таблица 10. Средняя величина БГ в почвах под посевами яровой пшеницы в регионах РФ (ЦИНАО, 2000)
Table 10. Average value of HB in soils under spring wheat in the regions of the Russian Federation (TsINAО, 2000)

Параметры баланса Регионы	Площадь под озимой пшеницей, тыс. га	Урожай, У ц/га	Коэффициент выхода растительных остатков, Кр	Выход растит. остатков, Р, ц/га	Коэфф. гумификации, Кгум	Количество образованного гумуса, Ггум	Содержание гумуса в почве, %	Мощность пахотного слоя, см	Объемная масса пахотного слоя, г/см ³	Коэфф. минерализации гумуса, km	Относительный индекс биологической продуктивности, kb0	Минерализация гумуса, М	Баланс гумуса, БГ
Томская область	99.0	32.1	1.4	44.9	0.18	8.1	5.37	22.41	1.31	0.0110	0.81	14.0	-5.9
Дальневосточный федеральный округ	519.2	19.7	1.4	27.6	0.18	5.0	4.48	20.32	1.21	0.0110	0.93	11.3	-6.3
Республика Якутия (Саха)	1.8	12.4	1.4	17.4	0.18	3.1	2.56	20.15	1.19	0.0110	0.93	6.3	-3.2
Республика Бурятия	37.8	19.2	1.4	26.9	0.18	4.8	5.03	19.78	1.44	0.0110	0.93	14.7	-9.9
Забайкальский край	55.2	15.8	1.4	22.1	0.18	4.0	5.19	17.96	1.43	0.0110	0.93	13.6	-9.6
Приморский край	12.4	18.5	1.4	25.9	0.18	4.7	3.55	21.67	1.13	0.0110	0.93	8.9	-4.2
Хабаровский край	1.7	18.5	1.4	25.9	0.18	4.7	4.07	20.76	1.08	0.0110	0.93	9.3	-4.6
Амурская область	80.2	23.1	1.4	32.3	0.18	5.8	4.24	20.24	1.15	0.0110	0.93	10.1	-4.3
Еврейская автономная область	1.7	12.2	1.4	17.1	0.18	3.1	4.81	21.56	1.26	0.0110	0.93	13.4	-10.3

Как видно из таблицы 11, БГ под зерновыми культурами, рассчитанный по методике ЦИНАО, демонстрирует положительную линейную корреляцию с ОБФ (табл. 11). На положительную корреляцию БГ с ОБФ также указывают и положительные величины коэффициента корреляции. Таким образом, анализ показывает, что методика ЦИНАО производит результат, который не противоречит существующим представлениям об усилении процессов гумусообразования при увеличении поступления органических остатков в почву (Орлов, 1992).

Таблица 11. Оценка качества регрессионной зависимости БГ в почвах, рассчитанная по методике ЦИНАО (Бгц), от ОБФ под зерновыми культурами

Table 11. Assessment of the quality of the regression dependence of HB in soils, calculated using the TSINAO method (BGts), on the TPB under grain crops

Регрессионная зависимость	t-критерий Стьюдента		Коэффициент корреляции (R)		F-критерий Фишера	
	t факт. (tb = b / SE)	t табл.	R факт.	R крит.	F факт.	F табл.
Бгзп от ОБФ БГц1 = 14.18 + 0.124*ОБФ1	2.21	1.995	0.718	0.232	72.32	254.38
БГц2 = -2.78+ 0.0701*ОБФ2	0.66	2.26	0.454	0.666	1.94	233.90

3. Сравнение результатов, полученных методами РосНИИземпроекта (1998) и ЦИНАО (2000)

Результаты расчета БГ, полученные по методике РосНИИземпроекта (1998), значительно отличаются от таковых, полученных по методике ЦИНАО (2000). Так при расчете по методике РосНИИземпроекта, Центральный, Северо-Западный и Южный

федеральные округа имели наиболее выраженные отрицательные значения БГ (-8.8, -8.5 и -8.5 ц/га соответственно). Те же федеральные округа по методике ЦИНАО (2000) характеризовались наиболее высокими положительными величинами БГ (5.9, 5.6 и 9.3 ц/га). В Дальневосточном округе, по сравнению с другими округами, БГ, полученный по методике РосНИИземпроекта (1998), составил -2.0 ц/га, в то время как по методике ЦИНАО он был -6.7 ц/га. Как следует из сопоставления показателей таблиц 6 и 7 с соответствующими данными таблиц 8 и 9, подобные различия отмечались и по субъектам РФ. В итоге величина БГ по РФ в целом по методике РосНИИземпроекта (1998) была отрицательной и составила -7.7 ц/га. По методике ЦИНАО величина БГ в почвах РФ в целом под посевами зерновых культур положительна и равна 3.3 ц/га.

Исследование выявило относительно небольшое (в интервале от +0.3 до -0.8 т/га) годовичное изменение запасов гумуса. При среднем значении запасов гумуса в пахотных почвах РФ равном ≈ 108 т/га (Stolbovoy, 2002) средняя величина годовичного изменения составляет $\approx 0.3\%$. Очевидно, что достоверное определение изменений содержания гумуса требует более длительного периода его накопления в почвах. Считается (IPCC, 2003), что достаточным периодом для насыщения почвы углеродом является срок 20 лет. Отметим, что этот период относится к продолжительности почвенного климатического проекта, т. е. фиксирует время его начала и завершения. При этом международные рекомендации не предусматривают выполнение промежуточных наблюдений.

Изучение качества методов расчета БГ в почвах агроэкосистем выявило логическую ошибку модели расчета в методике РосНИИземпроекта, согласно которой увеличение поступления растительных остатков приводит к снижению содержания гумуса в почве. Таким образом, методика РосНИИземпроекта не рекомендуется для практического использования в климатических проектах РФ.

4. Значение подсчетов БГ в учете выбросов парниковых газов РФ

Принимая методику ЦИНАО за основу развития националь-

ной модели управления БГ в почвах агроэкосистем, можно рассчитать суммарную величину секвестрации углеродных единиц, произведенную сельскохозяйственными почвами РФ под зерновыми культурами в 2022 г. Так, средняя величина БГ составляет 3.3 ц/га. Коэффициент пересчета содержания гумуса в углеродные единицы ($\text{тСО}_2\text{-экв/га}$) равен 0.216. Таким образом, средняя величина секвестрации углеродных единиц в почвах РФ под зерновыми культурами в 2022 г. составила 0.71 $\text{тСО}_2\text{-экв/га}$ ($3.3 \text{ ц/га гумуса} \times 0.216 = 0.71 \text{ тСО}_2\text{-экв/га}$). Общая площадь посевов зерновых в 2022 г. равнялась 16 723 тыс. га (табл. 6). Следовательно, суммарная величина секвестрации углерода в 2022 г. была около 11 млн 914 тыс. $\text{тСО}_2\text{-экв}$. Эта величина составляет почти 10% выбросов парниковых газов сельским хозяйством РФ в 2022 г. – 116.6 млн $\text{тСО}_2\text{-экв}$ (Охрана..., 2022). Иными словами, согласно результатам подсчетов БГ, почвы под посевами зерновых культур компенсируют выбросы сельскохозяйственного производства и снизили последние практически до 105 млн $\text{тСО}_2\text{-экв}$ в 2022 г.

Таким образом, адаптация методики ЦИНАО к задачам климатических проектов демонстрирует, что успех продвижения сельского хозяйства РФ к целям декарбонизации определяется не только улучшением технологий производства, но также связан с совершенствованием системы подсчетов углеродного баланса отрасли. При этом важно отметить, что в исследовании рассматривается около 17 млн га или почти 21% пахотных почв РФ. Очевидно, что необходим полный учет БГ всего массива пахотных почв, который может внести существенную корректировку углеродного баланса в масштабе страны.

В дополнение необходимо отметить, что представленные расчеты проведены в соответствии с международным стандартом MRV (Столбовой и др., 2023), т. е. являясь легитимными для использования в климатических проектах РФ.

ВЫВОДЫ

Исследована возможность использования методов мониторинга плодородия почв на основе расчета баланса основных питательных элементов в севооборотах при различных уровнях интенсификации производства для климатических проектов. В числе

изученных были 2 метода, которые наиболее широко применяются для определения БГ в почвах: 1) метод РосНИИземпроекта (1998), 2) метод ЦИНАО (2000).

Показано, что метод РосНИИземпроекта (1998) содержит недостатки в части логической модели расчета средней величины БГ. В результате применения метода средняя величина БГ имеет отрицательную величину -7.7 ц/га для почв под зерновыми в агроэкосистемах РФ в целом. Метод РосНИИземпроекта (1998) не рекомендован к использования для климатических проектов в РФ.

Выявлено, что для климатических проектов более обосновано применение метода ЦИНАО (2000). Этот метод основывается на более логичной модели расчета. Согласно методу ЦИНАО, средняя величина БГ в почвах под зерновыми для России в целом в 2022 г. положительная и составляет 3.3 ц/га, что соответствует ≈ 0.71 тСО₂-экв/га углеродных единиц. Общая секвестрация углерода в почвах под зерновыми культурами в 2022 г. равнялась почти 11 млн 914 тыс. тСО₂-экв углеродных единиц. Эта величина компенсирует почти 10% выбросов парниковых газов сельским хозяйством РФ в 2022 г.

Определено относительно небольшое (в интервале от +0.3 до -0.8 т/га) годовое изменение БГ в почвах РФ под зерновыми. При средних запасах гумуса в пахотных почвах РФ равных 108 т/га абсолютная величина годового изменения составляет около 0.3%. Статистически достоверное определение изменений требует отбора большого количества почвенных проб, что делает процедуру экономически излишне затратной (Stolbovoy et al., 2007). Другой опцией достоверного определения изменений содержания гумуса можно предположить увеличение длительности периода его накопления в почвах. Считается (IPCC, 2003), что достаточным временем для насыщения почвы углеродом является срок 20 лет. Отметим, что этот период относится к продолжительности почвенного климатического проекта, т. е. фиксирует время его начала и завершения. При этом международные рекомендации не предусматривают выполнение промежуточных наблюдений.

Для обеих моделей мониторинга плодородия почв рассчитана оценка качества регрессионной зависимости БГ от общей биомассы фотосинтеза (ОБФ). Показано, что согласно t-критерию

Фишера на 5%-ном уровне значимости исследованная связь является достоверной и характеризуется квадратами коэффициента корреляции (R^2), равными 0.554 и 0.998. В соответствии со шкалой Чеддока, теснота коррелятивной связи БГ с ОБФ для озимой пшеницы оценивается как высокая, для яровой – как очень высокая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20432–83. Удобрения. Термины и определения.
2. ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества.
3. *Закс Л.* Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
4. *Кононова М.М.* Кристаллохимические исследования пироксенов Украинского щита. Киев: Ин-т геол. наук, 1984. 52 с.
5. *Крылатов А.К., Носов С.И., Юдицкий Б.А., Бондарев Б.Е., Первушина В.Н.* Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: Госкомзем России, РосНИИземпроект, 1998. 49 с.
6. Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: ЦИНАО, 2000. 39 с.
7. *Минеев В.Г.* Химизация земледелия и плодородная среда. М.: Агропромиздат, 1990. 288 с.
8. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 324 с.
9. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1992. 399 с.
10. Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб. / Росстат. М.: Росстат, 2022. 115 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621903 от 8 сентября 2021 г.
12. Сельское хозяйство в России. 2023: Стат.сб./Росстат – С 29. М., 2023. 103 с.
13. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
14. *Столбовой В.С., Гребенников А.М.* Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 31–67. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).
15. *Столбовой В.С., Филь П.П.* Оценка содержания углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России для климатических проектов // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 4. С. 1–16.

16. *Тюрин И.В.* Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Л.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.
17. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов” // Собрание законодательства Российской Федерации. 2021. № 27 (часть II). Ст. 5376.
18. IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry / *J. Penman, M. Guitarsky, T. Hiraishi* (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003. 590 p.
19. IPCC. Guidelines for National greenhouse gas inventories, prepared by the National greenhouse gas inventories programme / *H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe* (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006. 20 p.
20. *Stolbovoy V.* Carbon in agricultural soils of Russia / *C.A.S. Smith* (Ed.) // Soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses. Proceedings of an OECD expert meeting. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2002. P. 301–306.
21. *Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G.* Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. 56 p. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR21576_2.pdf (дата обращения: 26.04.2023).
22. *Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al.* Land use, land use change, and forestry. IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 375 p.

REFERENCES

1. State standard, GOST 20432–83, *Udobreniya. Terminy i opredeleniya* (Fertilizers. Terms and definitions).
2. State standard, GOST 26213–2021, *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* (Soils. Methods for the studying of organic matter).
3. *Zaks L., Statisticheskoe otsenivanie* (Statistical estimation), Moscow: Statistika, 1976, 598 p.
4. *Kononova M.M., Kristallokhimicheskie issledovaniya piroksenov Ukrainskogo shchita* (Crystal-chemical studies of pyroxenes of the Ukrainian Shield), Kiev: In-t geol. nauk, 1984, 52 p.
5. *Krylatov A.K., Nosov S.I., Yuditskii B.A., Bondarev B.E., Pervushina V.N., Dinamika balansa gumusa na pakhotnykh zemlyakh Rossiiskoi*

- Federatsii* (Dynamics of humus balance in arable lands of the Russian Federation), Moscow: Goskomzem Rossii, RosNIIzemproekt, 1998, 49 p.
6. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu balansa pitatel'nykh veshchestv azota, fosfora, kaliya, gumusa, kal'tsiya* (Methodical guidelines for determining the balance of nutrients nitrogen, phosphorus, potassium, humus, calcium), Moscow: TsINAO, 2000, 39 p.
7. Mineev V.G., *Khimizatsiya zemledeliya i plodorodnaya sreda* (Chemization of agriculture and fertile environment), Moscow: Agropromizdat, 1990, 288 p.
8. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Humic acids of soils and the general theory of humification), Moscow: Izd-vo MGU, 1990, 324 p.
9. Orlov D.S., *Khimiya pochv* (Soil chemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 1992, 399 p.
10. *Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii* (Environmental Protection in Russia), Moscow: Rosstat, 2022, 115 p.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh No. 2021621903 ot 8 sentyabrya 2021 g. (Certificate of State Database Registration No. 2021621903 dated September 8, 2021).
12. *Agriculture in Russia*. 2023: Stat. sat. / Rosstat – C 29, Moscow, 2023, 103 p.
13. Semenov V.M., Kogut B.M., *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* (Soil Organic Matter), Moscow: GEOS, 2015, 233 p.
14. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 31–67, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-31-67](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-31-67).
15. Stolbovoy V.S., P.P. Fil', *Otsenka soderzhaniya ugleroda v sel'skokhozyaistvennykh pochvakh Evropeiskoi territorii Rossii dlya klimaticheskikh projektov* (Assessment of Carbon Content in Agricultural Soils of the European Part of Russia for Climate Projects), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2023, Vol. 87, No. 4, pp. 1–16.
16. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii* (Soil Organic Matter and Its Role in Soil Formation and Fertility), Leningrad: Sel'khozgiz, 1937, 287 p.
17. Federal Law dated 07.02.2021 No. 296-FZ (On the Limitation of greenhouse gas emissions), 2021, No. 27 (chast' II), art. 5376.
18. Penman J., Guitarsky M., Hiraishi T. (Eds.), *IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*, Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003, 590 p.
19. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds.), *IPCC. Guidelines for National greenhouse gas inventories, prepared by the National*

greenhouse gas inventories programme, Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006, 20 p.

20. Stolbovoy V., Carbon in agricultural soils of Russia, In: *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada*, Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2002, pp. 301–306.

21. Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G., Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007, 56 p., URL:

https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR21576_2.pdf.

22. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al., *Land use, land use change, and forestry. IPCC Special Report*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000, 375 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-48-83



Ссылки для цитирования:

Надпорожская М.А., Быховец С.С., Низамутдинов Т.И., Моргун Е.Н., Абакумов Е.В. Анализ динамики запасов органического вещества в пахотных почвах Ямала: вычислительные эксперименты с моделью ROMUL // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 48-83. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-48-83

Cite this article as:

Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Nizamutdinov T.I., Morgun E.N., Abakumov E.V. Analysis of organic matter stock dynamics in arable soils of Yamal: simulation experiments with the ROMUL model, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 48-83, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-48-83

Благодарность:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-44-00006 “Сравнительное метагеномное исследование микробиома углеродного цикла в регионах вечной мерзлоты на полуострове Ямал и Цинхай-Тибетском нагорье”. Авторы также выражают благодарность Департаменту внешних связей Ямало-Ненецкого АО и Научному центру изучения Арктики за помощь в проведении и организации полевых работ.

Acknowledgments:

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-44-00006 “Comparative metagenomics study on carbon-cycling microbiome in permafrost regions in Yamal and the Qinghai-Tibet Plateau”. The authors are also grateful to the Department of External Relations of Yamal-Nenets AO and to the Arctic Research Center for assistance in conducting and organizing fieldwork.

Анализ динамики запасов органического вещества в пахотных почвах Ямала: вычислительные эксперименты с моделью ROMUL

© 2024 г. М. А. Надпорожская^{1*}, С. С. Быховец^{2****},
Т. И. Низамутдинов^{1**}, Е. Н. Моргун^{3*****},
Е. В. Абакумов^{1***}

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

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-8800-074X>,

e-mail: m.nadporozhskaya@spbu.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>, e-mail: t.nizamutdinov@spbu.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>, e-mail: e.abakumov@spbu.ru.

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Россия,

142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2,

^{****}<https://orcid.org/0000-0002-8860-2027>, e-mail: s.bykhovets@rambler.ru.

³ГАУ ЯНАО “Научный центр изучения Арктики”, Россия,

629008, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный

округ, Салехард, ул. Республики, д. 20, офис 203,

^{*****}<https://orcid.org/0000-0002-4178-4417>, e-mail: morqun148@gmail.com.

Поступила в редакцию 04.10.2023, после доработки 30.11.2023,

принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Динамику органического вещества (ПОВ) пахотных почв Ямала анализировали с помощью вычислительных экспериментов с моделью ROMUL, а температуры и влажности почвы – с помощью модели SCLISS. Почва – агрозем иллювиально-железистый агрогенно-аккумулятивный. Мощность гумусового горизонта РУ 30 см. Запасы для 0–20 и 0–30 см: ПОВ – 9.32 и 13.75; N – 0.46 и 0.66 кг/м² соответственно. Фон: ерниково-зеленомошная тундра около г. Салехард. Почва дерново-подбур: подстилка (О, 2 см) и гумусово-аккумулятивный (АУ, 4 см) и иллювиально-железистый (ВФ, 6 см) горизонты. Запасы для 0–2 и 2–6 см, кг/м²: ПОВ – 1.38 и 2.69; N – 0.03 и 0.18 соответственно. Количество и качество опада фона оценивали по литературным данным. Уточнение количества опада проводили методом решения обратной задачи (spin-up). Имитировали торфование: стартовое 12 кг/м² и поддерживающие (каждые 6 лет) – 4, 8 и 12 кг/м², N 1%. Внесение минеральных удобрений в дозе: N 4 г/м² (40 кг/га) в годы торфования и внесение той же дозы азота ежегодно. Ретроспектива вычислительных экспериментов 30 и 90 лет. Вычислительные эксперименты показали, что после стартового торфования, 12 кг/м², дерново-подбура через 30 лет остается детрита 15% от внесенного. Поддерживающее торфование, 8–12 кг/м² (80–120 т/га), приводит к увеличению запасов ПОВ до 20–30 кг/м² и избыточному накоплению детрита. Внесение 4 кг/м² (40 т/га) торфа раз в 6 лет в течение 90 лет показывает динамику запасов ПОВ от дерново-подбура до агрозема, что подтверждается данными полевых

исследований. Внесение минерального азота раз в 6 лет не влияет на запасы ПОВ. Ежегодное внесение минерального азота вызывает рост запасов ПОВ за счет усиления гумификации. Этот факт требует экспериментальной проверки.

Ключевые слова: имитационное моделирование; Ямал; северное земледелие; запасы органического вещества почв; детрит; гумус; органические и минеральные удобрения.

Analysis of organic matter stock dynamics in arable soils of Yamal: simulation experiments with the ROMUL model

© 2024 M. A. Nadporozhskaya^{1*}, S. S. Bykhovets^{2****},
T. I. Nizamutdinov^{1**}, E. N. Morgun^{3*****}, E. V. Abakumov^{1***}

¹St. Petersburg State University,
7-9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg 199034,
Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0001-8800-074X>,

e-mail: m.nadporozhskaya@spbu.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>, e-mail: t.nizamutdinov@spbu.ru,

***<https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>, e-mail: e.abakumov@spbu.ru.

²Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the
Russian Academy of Science,

2 Institutskaya Str., Pushchino 142290, Russian Federation,

****<https://orcid.org/0000-0002-8860-2027>, e-mail: s_bykhovets@rambler.ru.

³Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District,
office 203, 20 Republic Str., Salekhard 629008,

Tyumen Region, Yamalo-Nenets Autonomous District, Russian Federation,

*****<https://orcid.org/0000-0002-4178-4417>, e-mail: morgun148@gmail.com.

Received 04.10.2023, Revised 30.11.2023, Accepted 21.08.2024

Abstract: The goal of this work is to analyze the dynamics of soil organic matter (SOM) in arable soils of Yamal using computational experiments with the ROMUL model. Soil temperature and moisture dynamics were simulated using the SCLISS model. The Yamal experimental station was organized in 1932. The soil is Plaggic Podzol. The thickness of humus horizon (PY) is 30 cm. Pools, kg/m²: SOM – 9.32 and 13.75; N – 0.46 and 0.66 for 0–20 and 0–30 cm respectively. Background: soddy-green-moss tundra near Salekhard. Soil: Folic Podzol: litter (O, 2 cm) and humus-accumulative (AY, 4 cm) and

illuvial ferruginous (BF, 6 cm) horizons. Pools, kg/m^2 : SOM – 1.38 and 2.69, N – 0.03 and 0.18 for 0–2 and 2–6 cm respectively. The quantity and quality of background fall was estimated according to literature data. Clarification of the amount of fall was carried out by the method of inverse problem solving (spin-up). Peat application was simulated: starting application in the dose of 12 kg/m^2 and maintenance (every 6 years) in doses 4, 8 and 12 kg/m^2 , N 1%. Application of mineral fertilizers, 2 variants: a) N 4 g/m^2 (40 kg/ha) in peatting years and b) application of the same dose of nitrogen every year. The duration of computational experiments is 30 and 90 years. Computational experiments showed that after the starting peatting of Follic Podzol at the rate of 12 kg/m^2 after 30 years, only 15% of the applied detritus remained. Maintenance peatting of $8\text{--}12 \text{ kg/m}^2$ leads to an increase in SOM pool to $20\text{--}30 \text{ kg/m}^2$ and excessive accumulation of detritus. Application of 4 kg/m^2 of peat once every 6 years for 90 years shows the dynamics of SOM pools from Follic Podzol to Plaggic Podzol which is confirmed by field survey data. Application of mineral nitrogen (4 g/m^2) once every 6 years does not affect SOM pools. Annual application of mineral N (4 g/m^2) increases SOM pools due to intensified humification. This fact requires experimental verification.

Keywords: simulation modeling; Yamal; northern agriculture; soil organic matter stocks; detritus; humus; organic and mineral fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

В районах разрабатываемых месторождений нефти и газа Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) численность населения, по данным Росстата, составляет более 500 тыс. чел. (Федеральная служба..., 2023) и держится на этом уровне с конца 1980-х годов. Суровые климатические условия обостряют вопросы продовольственной безопасности региона. Завоз из других районов не полностью решает вопросы обеспечения людей продуктами питания. Например, затраты по привозному картофелю включают в себя стоимость транспортировки, а также потери товара из-за порчи клубней при хранении и трудозатраты по их сортировке. Картофелеводство в ЯНАО рискованное, поскольку оно не каждый год рентабельно из-за варьирования погодных условий. В то же время холодный вегетационный период Севера имеет и положительное влияние: исключает развитие фитофтороза и распространение колорадского жука. На дренированных супесчаных почвах картофель в этом районе начали выращивать более 90 лет

назад. Хотя перспективность картофелеводства в ЯНАО подтверждена как практикой, так и научными опытами на сортоиспытательных участках, в настоящее время в регионе площади под картофелем сокращаются, многие пропашные земли перешли в залежи, урожайность культурных растений падает (Тихановский, 2021). Высокая себестоимость продукции и низкий уровень механизации обработки почвы – вот главные причины сокращения площадей под картофелем и овощными культурами ЯНАО. Также отмечено, что в последние годы нарушена технология возделывания сельскохозяйственных культур: от неудовлетворительных подбора и предпосевной подготовки семян до нерационального проведения агротехнических работ. При адекватной агротехнике в ЯНАО в 1962 г. урожайность картофеля достигала 22.3 т/га. В 2020–2022 г. урожаи картофеля упали до 10.0–11.5 т/га (Моргун и др., 2022). В то же время сейчас на вновь освоенных почвах опытных полей вблизи города Салехарда (при соблюдении сроков и правильной обработки посадок) применение навоза (40 т/га) в сочетании с минеральными удобрениями ($N_{40}P_{120}K_{120}$) повышает урожайность картофеля с 10 до 22 т/га, на старопахотных почвах с 23 до 35 т/га по сравнению с контролем без удобрений (Тихановский, 2021).

Похожая ситуация с арктическим сельским хозяйством сложилась в Северной Америке. За более чем столетний период там не удалось создать эффективную государственную сельскохозяйственную индустрию. Самые успешные примеры северного земледелия представлены в общинах или фермерских хозяйствах, когда аграрная продукция идет не на продажу, а распределяется между членами сообществ бесплатно. В этих случаях экономической выгоды нет, но обеспечена локальная продовольственная безопасность. В последние годы интерес к арктическому сельскому хозяйству возрождается, запускаются новые проекты и программы финансирования, требуются новые научные исследования (Price, 2023).

Актуально детальное научное обоснование для экологической оптимизации сельского хозяйства в суровых климатических условиях Севера. Песчаные почвы тундры характеризуются низким эффективным плодородием из-за неблагоприятных физиче-

ских (низкая водоудерживающая способность) и химических (слабая гумусированность и невысокий запас элементов питания в доступной для растений форме) свойств. Принципы окультуривания тундровых почв известны давно: это комплекс агромелиоративных приемов, включающих применение органических удобрений для улучшения физико-химических характеристик пашни (теплоемкости, влагоемкости, поглотительной способности), внесение минеральных удобрений для пополнения пула доступных элементов питания растений и рыхление почвы с учетом биологических требований выращиваемых растений (Игнатенко, 1979; Переверзев и др., 1987, 1988; Исекеев, 1995; Тихановский, 2022). Значительная роль в этом комплексе агромелиоративных приемов отводится органическим удобрениям.

Актуальность и практическая ценность работы связаны с востребованностью локальных почвенно-агроэкологических ресурсов как для сокращения ввоза продуктов, так и вследствие экспансии земледелия в северные регионы из-за изменения климата (Моргун и др., 2022). Важнейшие условия получения экологически обоснованного высокого урожая – оптимизация норм внесения удобрений с учетом требований картофеля к количеству питательных веществ, поддержание и повышение эффективного плодородия почвы. При этом не следует допускать выноса избыточных нутриентов из почвенного профиля в грунтовые воды и водоемы.

Для возврата залежных почв в сельскохозяйственное использование нужны технологии, специфичные для условий Крайнего Севера. Современные практические исследования в ЯНАО уже проводятся: уточняется эффективность доз органических и минеральных удобрений на урожайность картофеля (Тихановский, 2015, 2021). Цель данной работы – провести теоретический анализ динамики органического вещества пахотных почв Ямала с помощью вычислительных экспериментов с математической моделью ROMUL.

В задачи работы входили:

- анализ полученных авторами и литературных данных по содержанию и запасам органического вещества и азота в фоновых и залежных почвах Ямальской опытной станции и со-

- ставление почвенных сценариев для вычислительных экспериментов;
- анализ метеорологических данных и составление климатических сценариев для вычислительных экспериментов;
 - оценка приемами математического моделирования параметров стабилизации запасов, изменения структуры и качества почвенного органического вещества (ПОВ) при освоении тундровых земель и при сельскохозяйственном использовании в зависимости от вносимых доз органических и минеральных (азотных) удобрений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория ЯНАО находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Глубина протаивания суглинистых почв в северной части округа – 20–80 см, в средней части – 60–100 см. В почвах на мощных песчаных отложениях мерзлота залегает глубже, 2–4 м от дневной поверхности. Период интенсивной вегетации продолжается 50–70 дней. Ограничивающим рост растений фактором является неравномерное распределение осадков в теплое время года: дефицит в июне, избыток в июле и августе. Длинный световой день (до 20 часов) позволяет получать сельскохозяйственную продукцию (в том числе многолетние травы) при недостатке тепла. Микробиологическая активность замедлена, наблюдается дефицит доступных растениям элементов питания, особенно азота (Тихановский, 2004б; Низамутдинов и др., 2023).

Окультуривание поля Ямальской сельскохозяйственной опытной станции было начато в 1932 г. по программе развития полярного земледелия в СССР. Как отмечено выше, урожайность картофеля зависит от погодных условий. По данным департамента АПК ЯНАО, урожайность картофеля в 2017 г. на опытном поле составила 60,3 ц/га, в 2018 г. – 120 ц/га. С 2019 г. поле не возделывают. В 2021 г. растительность залежи уже представляла злаково-разнотравный луг с проективным покрытием 90–95%. Почва агрозем иллювиально-железистый агрогенно-аккумулятивный. Мощность гумусового горизонта РУ – 30 см. Почвы с мощным гумусовым горизонтом, сконструированным в процессе агроосвоения

предложено отнести к агрогенно-аккумулятивным (Nizamutdinov et al., 2021; Низамутдинов и др., 2022), актуальные ведущие почвообразовательные процессы – дерновый процесс, распашка и длительное внесение органических удобрений.

В качестве фоновой экосистемы выбран участок тундры за границей города Салехард под ерничково-зеленомошным (с участием черники) фитоценозом. Проективное покрытие около 20%. Почва дерново-подбур. Биологически активные горизонты представлены подстилкой (О, 2 см) и гумусово-аккумулятивным (АУ, 4 см) и иллювиально-железистым (ВF, 6 см) горизонтами. Условились, что почвенные процессы данного дерново-подбур находится в равновесии с факторами среды, следовательно, запасы ПОВ близки к стабильным.

Почва поля опытной станции и фоновая почва сформированы на элювии древних аллювиальных отложений – хорошо сортированных песках. Полевое обследование проведено в 2020–2021 гг. Выполнено морфологическое описание, отобраны пробы из генетических горизонтов для определения плотности сложения и основных физико-химических характеристик почв. Анализ сухих почвенных проб проведен в аналитических лабораториях на кафедрах прикладной экологии и агрохимии СПбГУ в 2021–2022 гг.

Физико-химические анализы и расчет входных параметров для модели

Физико-химические характеристики почв (pH_{H_2O} , плотность сложения) определяли по общепринятым методикам (Аринушкина, 1970; Растворова, 1983).

Определение углерода органических соединений ($C_{орг.}$) проводили по Тюрину в модификации Никитина с колориметрическим окончанием (Орлов, 1985), определение валового азота ($N_{общ.}$) – по Кьельдалю с колориметрическим окончанием (Аринушкина, 1970). Полученные результаты по $C_{орг.}$ и $N_{общ.}$ были использованы для расчета запасов ПОВ и азота для составления базовых сценариев вычислительных экспериментов. Отметим, что для расчета истинного содержания $C_{орг.}$, аналитические результаты $C_{орг.}$ по Тюрину умножали на коэффициент 1.15 для компенсации

неполноты окисления органического вещества по данному методу (Шамрикова и др., 2022). Пересчет $C_{\text{орг.}}$ на органическое вещество проводили умножением на 2. Именно такое значение этого пересчетного коэффициента рекомендовано издавна (Тюрин, 1937; Пономарева, Плотникова, 1980; Орлов, 1985), но рутинно до сих пор применяют избыточно точный коэффициент 1.724, рассчитанный С. Шпренгелем в 1837 г. (Пономарева, Плотникова, 1980, с. 59). Итоговая формула пересчета $C_{\text{орг.}}$ по Тюрину на органическое вещество такова:

$$\text{ПОВ, \%} = 2 \times 1.15 \times C_{\text{орг.}}$$

Метод учета запасов $C_{\text{орг.}}$ (почвенного органического вещества) детально описан (Алексеев, Бердси, 1994). Расчет проводили по формуле: $\text{ПОВ (т/га)} = \text{ПОВ} \times h \times d$, где ПОВ – содержание в почвенном горизонте; h – мощность почвенного горизонта; d – плотность сложения. Для перевода т/га в кг/м^2 (единицы, которыми оперирует модель ROMUL) результат надо разделить на 10. Запасы $N_{\text{общ.}}$ в почве рассчитывали по аналогичной формуле:

$$N \text{ (т/га)} = N_{\text{общ.}} \times h \times d.$$

Мощность почвы для расчета исходных запасов ПОВ в вычислительных экспериментах. Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта агрозема – 30 см. Из них верхние 20 см – это современный пахотный горизонт, наиболее биологически активный. Нижние 10 см гумусово-аккумулятивного горизонта РУЗ являются результатом длительного окультуривания. Рыхление подпахотного гумусового горизонта могло быть проведено дискованием без перемешивания с вышележащей толщей, как это происходит при распашке с оборотом пласта. Увеличение мощности гумусового горизонта (до 40–50 см и более), широко распространенное следствие длительного внесения органических удобрений, характерно и для хорошо окультуренных почв (Plaggic Anthrosols) (Hubbe et al., 2007; Поляков и др., 2024).

В вычислительных экспериментах с агроземом использовали величины запасов ПОВ для толщи 0–20 см с целью определе-

ния актуального баланса вносимых удобрений, а для толщи 0–30 см – для анализа скорости аккумуляции ПОВ за весь 90-летний период окультуривания данной почвы.

Запас подстилки дерново-подбуря рассчитан отдельно. Запасы в горизонтах АУ и ВF рассчитаны по их индивидуальным характеристикам, а затем суммированы и в вычислительных экспериментах приняты за единый пул ПОВ.

Вычислительные эксперименты по определению динамики запасов органического вещества в фоновых и пахотных почвах. Математическую модель ROMUL (Комаров и др., 2007) уже применяли для анализа динамики ПОВ экосистем различных природных зон – от лесных до Антарктических (Комаров и др., 2007; Надпорожская и др., 2017, 2022). Использовали модель ROMUL, решая похожие задачи для оптимизации приемов рекультивации нарушенных земель промышленных карьеров в таежной зоне, оценивали величины экологически адекватных доз органических удобрений (Надпорожская и др., 2009; Nadporozhskaya et al., 2014). Такой широкий географический спектр применения модели ROMUL допустим, поскольку ее базовые коэффициенты (скорости минерализации и гумификации органического вещества) рассчитаны по результатам лабораторных опытов, проведенных в контролируемых условиях, а поэтому не зависят от физических факторов среды (температуры и влажности), которые в полевых условиях определяют до 50% варьирования скоростей трансформации опада (Meentemeyer, 1978). Параметризация базовых коэффициентов модели при разных режимах температуры и влажности выполнена по независимым данным, опубликованным в научной литературе (Комаров и др., 2007). Структура модели ROMUL (рис. 1) позволяет имитировать поступление и трансформацию органического вещества (опада растений или органических удобрений) а также минерального азота (минеральных удобрений или атмосферных выпадений) двумя потоками – в органическом (на почве) и в минеральном горизонтах (в почве).

Теоретическая база модели ROMUL состоит в параметризации скоростей трансформации опада в зависимости от относительного содержания азота в нем. Отношение C/N в опаде опреде-

ляет степень доступности растительных остатков для микробной деструкции и скорости минерализации и гумификации на первых стадиях трансформации органического вещества в почве. Дальнейшее уменьшение скорости минерализации связано с формированием комплекса гумусовых веществ и неразложившихся растительных остатков (детрита). Фракция детрита соответствует ферментированному и гумифицированному (средне- и сильно-разложившемуся) подгоризонтам лесной подстилки и лабильной части органического вещества органоминеральных горизонтов почвы. Коэффициенты модели ROMUL k_1 – k_5 зависят также от температуры, влажности и pH почвы. Коэффициенты трансформации органического вещества индикаторными группами почвенных грибов и клещей: k_1 и k_2 – минерализации углерода слабо и суммы средне и сильно разложившихся подгоризонтов подстилки соответственно. Коэффициент k_3 характеризует скорость образования гумусовых веществ и формирования их комплексов с частично разложившимся опадом, т. е. формирования детрита; k_1 , k_2 и k_3 рассчитаны по результатам лабораторных опытов, как отмечено выше. Коэффициенты k_4 (влияние комплексов организмов-деструкторов, сообществ бактерий и почвенных артропод) и k_5 (влияние комплексов сообществ дождевых червей) были оценены по литературным данным. В вычислительных экспериментах с тундровыми почвами используется модификация модели ROMUL, где коэффициент k_5 отключен. Размерность коэффициентов 1/сутки. В модели ROMUL есть калибруемые коэффициенты. Это, во-первых, доля лабильного гумуса в составе органического вещества минерального горизонта (соответствуют блокам лабильного и стабильного ПОВ, т. е. детрита и гумусовых комплексов с минеральной матрицей почвы). Во-вторых, это коэффициент скорости минерализации собственно гумусовых веществ k_6 , варьируется от $6 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ (1/сутки) от суглинистых к песчаным почвам (Комаров и др., 2007).

Итак, модель ROMUL рассчитывает: 1) изменение запасов органического вещества и ассоциированного с ним азота по структурным пулам, указанным на рисунках 1 и 2) количество минеральных соединений азота (без деления на нитратный и аммонийный) и количество углекислого газа, выделяющееся из почвы. Мо-

дель ROMUL не имитирует вынос растворенных веществ из почвенного профиля, выделение продуктов неполной минерализации органических соединений, эрозионные процессы.

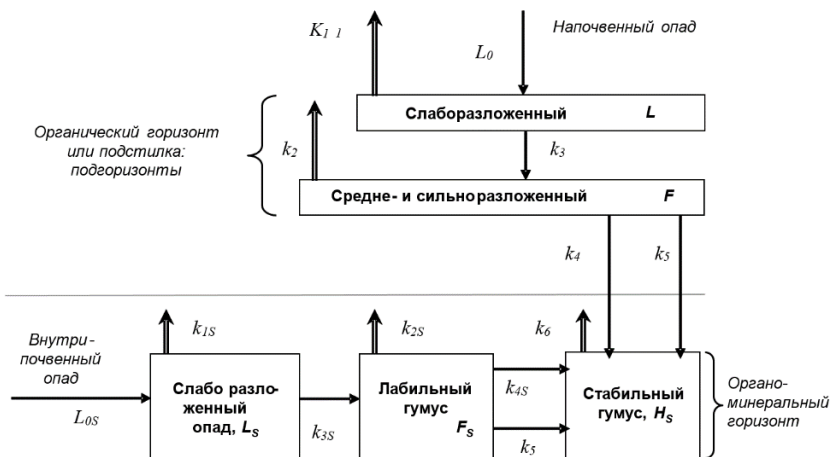


Рис. 1. Блок-схема модели ROMUL. Индексы на стрелках – коэффициенты гумификации (тонкие сплошные стрелки) и минерализации (широкие вертикальные стрелки) ПОВ (Комаров и др., 2007). Лабильный гумус – комплекс гумусовых веществ с растительными остатками (детрит). Индексы L и S обозначают процессы, идущие в подстилке (L – litter) и минеральной части почвы (S – soil).

Fig. 1. The block scheme of the ROMUL model. Indices on the arrows are humification (thin solid arrows) and mineralization (wide vertical arrows) coefficients of SOM (Komarov et al., 2007). Labile humus – complex of humus substances with plant remains (detritus). Indices L and S denote the processes occurring in the litter (L – litter) and the mineral part of the soil (S – soil).

Подготовка рабочих сценариев для вычислительных экспериментов с моделью ROMUL

Для работы с моделью ROMUL нужны два рабочих сценария – климатический и почвенный. Климатический сценарий имитирует изменение среднемесячных температур и влажности органического (подстилки) и органоминерального (биологически ак-

тивного) горизонтов почвы. Предусмотрена возможность учета поступления минерального азота из атмосферы в почву. В нашей работе эту функцию мы применили для вариантов с имитацией внесения азотных удобрений. Почвенный сценарий включает в себя данные об исходных запасах органического вещества и азота в указанных выше структурных частях почвы, а также имитирует среднемесячное поступление органического вещества и связанного с ним азота (опада растений и/или органических удобрений). Описание сценариев приведено ниже.

Климатические сценарии для вычислительных экспериментов

Динамику температуры и влажности почвы имитировали с помощью модели SCLISS (Быховец, Комаров, 2002; Комаров, 2007). Были использованы ряды температуры воздуха (Булыгина и др., 2022) и скорректированных осадков (Ильин и др., 2022) в Салехарде за 1986–2015 гг. Для сценария температуры почвы под естественной тундровой растительностью – параметры модели SCLISS, описывающие взаимосвязь температуры почвы с температурой воздуха – были оценены по данным ст. Петрунь (северо-восток Республики Коми, 260 км к западу от Салехарда). Основанием для выбора именно этой станции была близость значений температуры воздуха в теплое время года (зимние температуры для моделирования динамики органического вещества почвы имеют гораздо меньшее значение). Для оценки температуры почвы под пашней рассчитаны средние разности соответствующих средних месячных значений температуры под черным паром и под естественной поверхностью, по данным станций Нарьян-Мар (Ненецкий АО, 600 км к ЗСЗ) и Берёзово (ХМАО, 300 км к ЮЮЗ от Салехарда) – ближайших станций, на которых проводились оба вида наблюдений (Шерстюков, 2022а, 2022б). Данные по водно-физическим свойствам минеральных горизонтов почв опытного поля (агрозем) и фоновой тундры (дерново-подбур) были представлены Т.И. Низамутдиновым. По этим данным были оценены средние характеристики метрового слоя. Водно-физические свойства подстилки оценивали по их зависимостям от плотности (Быховец, 2013). Климатические параметры, использованные при со-

ставлении сценариев температуры и влажности почвы, представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Средние значения температуры воздуха (Т, °С) и скорректированные суммы осадков (Р, мм) по данным станции Салехард за 1986–2015 гг. (Булыгина и др., 2022; Ильин и др., 2022)

Table 1. Average air temperatures (Т, °С) and adjusted precipitation amounts (Р, mm) according to Salekhard station data for 1986-2015. (Bulygina et al., 2022; Il'in et al., 2022)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Т, °С	-23.0	-21.9	-13.9	-7.8	0.4	9.9	14.4	11.0	5.2	-2.9	-14.6	-19.6	-5.2
Р, мм	29	24	28	33	45	55	66	64	44	53	35	32	508

Запасы ПОВ в исходных почвах, используемые в почвенных сценариях

Исходные запасы органического вещества фонового дерново-подбугра (табл. 3) составили 1.38 и 2.69 кг/м², запасы азота – 0.03 (C/N = 26) и 0.18 (C/N = 7) кг/м² для подстилки и верхних 10 см минерального профиля соответственно. Запасы ПОВ в биологически активных верхних 20 см агрозема – 9.32 кг/м², запасы азота – 0.46 (C/N = 10). Запасы ПОВ в 30 см агрозема 13.75 кг/м², запасы азота 0.66 (C/N = 10). Порядок полученных величин согласуется с данными А.Н. Тихановского (2021) для разных почв – вновь осваиваемой и пахотной (30 лет), – 3.80 кг/м² (азот – 0.20 кг/м², C/N = 9) и 10.40 кг/м² (азот – 0.38 кг/м², C/N = 14). Данные по запасам ПОВ и азота одного порядка, можно считать их представительными для данных почв.

Реакция почвенной среды оказывает влияние на интенсивность трансформации ПОВ. Для модели ROMUL созданы моди-

фикации с корректировкой коэффициентов по диапазонам в единицах рН 3, 4 и 5. Значения реакции среды рН_{Н2О} моделируемых почв лежали в диапазоне 4.6–5.3. В вычислительных моделях использовали версию ROMUL – рН 5.

Таблица 2. Средние значения температуры (Т, °С) на глубине 20 см и влажности (W, % от массы) органоминерального горизонта почвы по результатам моделирования

Table 2. Average values of temperature (T, °C) at a depth of 20 cm and humidity (W, % by weight) of the organomineral soil horizon according to the simulation results

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Тундра													
T, °C	-7.2	-7.0	-5.4	-2.8	1.2	8.6	14.3	12.2	6.7	1.7	-1.7	-4.8	1.3
W, %	26	26	26	26	29	31	28	26	26	26	26	26	27
Опытное поле													
T, °C	-7.2	-7.0	-5.3	-2.8	1.2	9.3	14.8	12.2	6.3	1.7	-1.7	-4.8	1.4
W, %	21	21	21	21	24	26	23	21	21	21	21	21	22

Установлено, что почвенный покров Ямальской агрохимической станции отличается значительной пестротой по содержанию биогенных элементов в гумусовом горизонте. Эту пестроту связывают с влиянием внесения различных доз удобрений и варьирования типов севооборотов в долгосрочных полевых опытах (Моргун и др., 2022). Поэтому модельные оценки влияния окультуривания почв на динамику ПОВ в наших вычислительных экспериментах следует рассматривать как вероятностные прогнозы, которые надо уточнять в полевых опытах. Используя эти прогнозы, можно показать принципиальные закономерности динамики

ПОВ и оптимизировать нормы внесения удобрений в первом приближении. Прогнозные оценки следует проверять в полевых опытах по контролю выноса нутриентов в грунтовые воды и гидрографическую сеть.

Таблица 3. Физико-химические параметры дерново-подбур и агрозема
Table 3. Physico-chemical parameters of soils

Гори-зонт	Глубина, см	pH H ₂ O	d, г/см ³	C, %	N, %	C/N	Запасы, кг/м ²	
							ПОВ	N
Дерново-подбур								
О	0–2	4.6	0.22	15.78	0.61	26	1.38	0.03
АУ	2–6	4.7	0.64	2.61	0.24	11	1.33	0.06
ВФ	6–12	5.3	1.04	1.09	0.19	6	1.36	0.12
Агрозем								
РУ1	0–10	4.8	1.27	1.47	0.17	9	3.72	0.21
РУ2	10–20	5.1	1.30	2.16	0.19	11	5.60	0.25
РУ3	20–30	4.9	1.18	1.87	0.17	11	4.43	0.20

Сценарии поступления опада и внесения органических (торфа) и минеральных (азотных) удобрений

Количество и качество опада оценивали по данным о продуктивности растений кустарниково-кустарничково-мохово-лишайниковой тундры из монографии Н.И. Базилевич (1993, с. 14–15). Поскольку в монографии приведены обобщенные характеристики, то уточнение количества опада для изучаемого дерново-подбур проводили методом решения обратной задачи (spin-up), используемом в имитационном математическом моделировании для определения входных параметров при отсутствии измеренных величин. В вычислительных экспериментах подбирали такие количественные характеристики опада, при которых запас ПОВ фонового дерново-подбур был стабилен (Комаров и др., 2007). Содержание азота в когортах опада подбирали по литературным данным (Базилевич, Титлянова, 2008, с. 50–55). Поскольку справочные величины приведены для зеленых листьев, то содержание

азота в листьях уменьшали, учитывая его отток в древесные органы в конце вегетационного сезона. Данные по количеству и качеству опада для дерново-подбур, использованные для составления сценариев модели, приведены в таблице 4. Напочвенный опад составляли листья и ветки кустарников и кустарничков, травы и зеленые мхи. Опадом лишайников (3 г/м², Базилевич, 1993) пренебрегли. Опад корней принят равным наземному опаду кустарничков и трав. Поскольку подстилка небольшой мощности (2 см), то условились весь корневой опад отнести к почвенной когорте, поступающей в минеральную часть профиля почвы. Опад распределяли равными долями в течение четырех месяцев, с июня по сентябрь. Варьирование количества опада по годам не имитировали.

Таблица 4. Количество (годовое) и качество опада, соответствующие субстационарным запасам органического вещества дерново-подбур

Table 4. Quantity (annual) and quality of fallen debris corresponding to substationary reserves of organic matter in the Plaggic Podzol

Вид опада	Листья	Ветки	Травы	Мхи	Корни
Масса, г/м ² <i>Б</i>	95	19	4	28	54
Масса, г/м ² <i>Р</i>	55	19	4	28	78
N, %	0.8	0.5	0.9	1.9	0.5
Зола, %	1.5	0.8	0.7	1.0	0.8

Примечание. *Б* – данные Базилевич (1993); *Р* – наши расчетные значения.

Note. *Б* – data according to Bazilevich (1993); *Р* – authors' calculated values.

Нормы внесения и качество органических удобрений (переходного торфа) брали по литературным данным (Справочник..., 1964; Игнатенко, 1979; Переверзев и др., 1988; Балаганская, 1990; Тихановский, 2004а,б, 2015, 2021). Имитировали внесение 4, 8 и 12 кг/м² торфа (сухой массы). Проведен перерасчет на сухую беззольную массу торфа по средним значениям зольности переходного торфа 10%. Содержание валового азота в переходном торфе варьируется в диапазоне 1.0–1.8% (Переверзев и др., 1988). Для вычислительных экспериментов применяли минимальную кон-

центрацию азота в торфе (1.0%). Данные о дозах торфа и азота в пересчете на сухую беззольную массу приведены в таблице 5.

При первичном окультуривании имитировали внесение стартовой дозы торфа 12 кг/м^2 , затем каждые 6 лет – поддерживающие плодородие дозы – 4, 8, 12 кг/м^2 (в пересчете на беззольную массу – 3.6, 7.2, 11.6 кг/м^2). Далее в тексте указаны общепринятые обозначения доз торфа (4, 8, 12 кг/м^2), с пометкой об использовании в сценариях модели пересчета на беззольную массу. Периодичность внесения поддерживающих доз торфа имитировали согласно литературным данным, учитывая, что последствие такого удобрения выражено только в первые 7–10 лет после внесения (Переверзев и др., 1988). Дополнительно с той же частотой имитировали сопутствующее внесение азотных минеральных удобрений, 4 г/м^2 действующего вещества, что соответствует оптимальной дозе N 40 кг/га. Второй вариант внесения азотных удобрений – 4 г/м^2 ежегодно.

Таблица 5. Расчет доз переходного торфа (на сухое вещество и с учетом зольности) и азота (качество переходного торфа по: Переверзев и др., 1988)

Table 5. Calculation of doses of peat (per dry matter and ash content) and nitrogen (quality of peat according to: Pereverzev et al., 1988)

Торф, сухая масса	Торф, без золы, кг/м^2	N%	N, кг/м^2	C/N
40	3.6	1.0	0.036	50
80	7.2	1.0	0.072	50
120	10.8	1.0	0.108	50

Продолжительность вычислительных экспериментов

Для калибровки модели и сравнительного анализа стабильности (стационарности) структуры запасов ПОВ фоновой почвы в данных климатических условиях, количества и качества поступающего растительного опада и удобрений был выбран период 30 лет. Сроки и уровни стабилизации ПОВ при разных поддержива-

ющих дозах торфа были исследованы в длительных (90 лет) вычислительных экспериментах.

Калибровка доли лабильного гумуса и скорости разложения гумуса

Значения калибруемых коэффициентов модели ROMUL, т. е. доли лабильного гумуса (детрита) и коэффициента скорости минерализации гумусовых веществ k_6 для дерново-подбуря, устанавливали в пробных вычислительных экспериментах. Условия корректности коэффициентов – стабилизация запасов ПОВ фоновой почвы. В таком случае условиям стабильности запасов ПОВ дерново-подбуря соответствуют: доля лабильного гумуса 0.6 и k_6 0.0008 (1/сутки).

Доля детрита в окультуренных песчаных почвах Мурманской области, 10 лет удобрявшихся навозом в дозе 90 т/га ежегодно была определена в работах В.Н. Переверзева с соавторами (1987). По этим данным, регулярное удобрение вновь освоенных почв приводит к росту содержания детрита с 2.5% до 9.7–14.6% от суммы ПОВ, то есть увеличивается в 4–6 раз (табл. 6). На основании этих экспериментальных данных нами был сделан расчет доли лабильного гумуса для почвенных сценариев агрозема: 0.85 для земель, удобрявшихся органическими удобрениями (навозом). Для почв, удобряемых торфом, долю лабильного гумуса условились считать такой же, принимая во внимание, что лабильные компоненты навоза и торфа разлагаются за 7–10 лет, а в почве остаются неразложившиеся растительные остатки, пополняющие почвенный детрит. Коэффициент k_6 в пробных вычислительных экспериментах был принят равным 0.0009 (1/сутки).

Метод Монте-Карло в модели ROMUL

Варьирование расчетных данных имитировали с помощью метода Монте-Карло, приема статистического моделирования для имитации реальных процессов при заданных предположениях о возможном разбросе исходных параметров (Комаров и др., 2007). Исходное варьирование запасов органического вещества и азота почвы принимали за 30%.

Таблица 6. Доля детрита в составе окультуренных песчаных почв Мурманской области (по: Переверзев и др., 1987)

Table 6. Proportion of detritus in the structure of farmed sandy soils of the Murmansk region (from: Pereverzev et al., 1987)

Угодье	Вариант	Содержание, %			Детрит, % от суммы	Доля лабильного гумуса	
		Детрит	Гумус	Сумма		К	У
Освоенная целина	К	2.5	1.2	37	68	069	085
	У	14.6	19	165	88		
Освоенная залежь	К	2.5	17	42	60		
	У	9.7	22	119	81		
Пашня	К	5.2	14	66	79		
	У	12.6	21	147	86		

Примечание. К – контроль, У – удобрения NPK + навоз.

Note. К – control, У – fertilizers NPK + manure.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика ПОВ дерново-подбюра

Стабильное (субстационарное) (рис. 2) состояние запасов ПОВ фоновой почвы было определено при структуре опада, приведенной в таблице 2. Запасы ПОВ варьировались в диапазонах: подстилка 1.2–1.4, детрит 1.5–1.7, гумус 1.1–1.2 кг/м². Общие запасы дерново-подбюра за 30 лет вычислительного эксперимента не менялись существенно, составляя 4.1–4.2 кг/м².

Оценка влияния внесения максимальной дозы стартового торфования на запасы органического вещества при окультурировании дерново-подбюра

При освоении почвы кустарниково-кустарничковую растительность удаляют вместе с подстилкой, затем почву распахиывают. Условились, что исходный запас органического вещества окультуриваемой почвы будет составлен из запасов детрита и гумуса, к которым добавится материал органических удобрений (переходного торфа). Торф состоит из частично разложившихся растительных остатков, пропитанных гумусовыми веществами. Фактически, переходный торф представляет собой почвенный детрит. Логично

задать вопрос: куда отнести торф при составлении почвенного сценария? повысить на величину вносимого торфа содержание детрита почвы? или сформировать когорту опада, поступающую в минеральную часть профиля почвы? Мы испытали оба варианта (рис. 3).

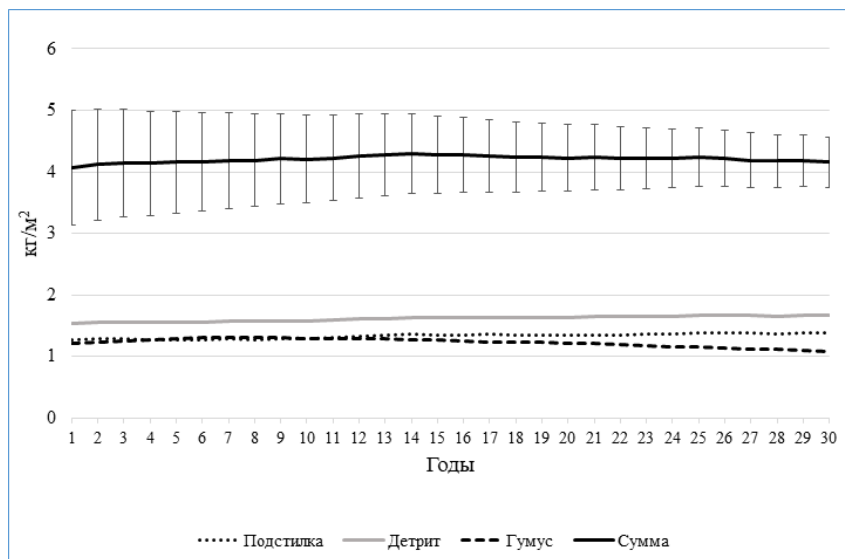


Рис. 2. Субстационарная динамика запасов органического вещества фоновой почвы, дерново-подбура. Обозначения: Подстилка – запасы органического горизонта. Детрит и гумус – запасы POV биологически активных горизонтов минеральной части профиля. Сумма – общий запас POV.

Fig. 2. Sub-stationary dynamics of organic matter stocks of mature soil. Denotations: Litter – reserves of SOM in organic horizon. Detritus and humus – SOM reserves of biologically active horizons of the mineral part of the soil profile. Sum – total SOM reserve.

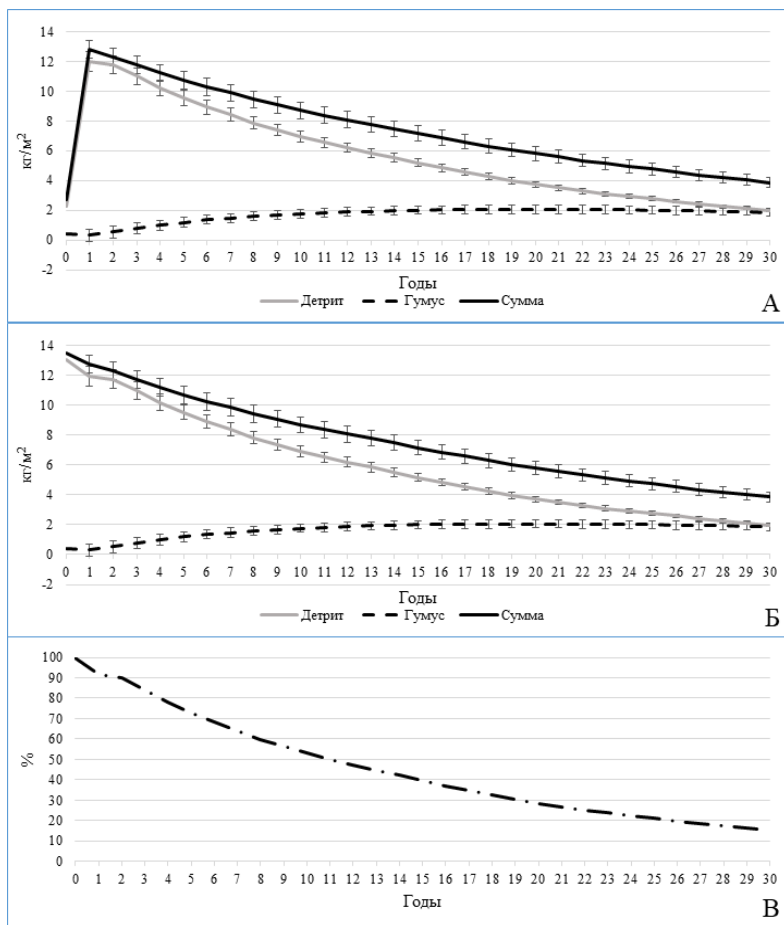


Рис. 3. 30-летняя динамика ПОВ окультуриваемого дерново-подбугра после торфования (торфа (сухой беззольной массы 11.6 кг/м², содержание азота 1.0%)) в вычислительном эксперименте. Имитация поступления торфа: **а)** как фракции внутрипочвенного опада; **б)** как доли лабильного гумуса. **в)** Доля остаточного детрита от исходного содержания. Обозначения когорт ПОВ как на рис. 1.

Fig. 3. The 30-year dynamics of the SOM of cultivated mature soil after peating (peat (dry ash-free mass 11.6 kg/m², nitrogen content 1.0%)) in a computational experiment. Simulation of peat input: **a)** as fraction of in-soil fall; **б)** as fraction of labile humus; **в)** Fraction of residual detritus from initial content.

Для анализа трансформации органических удобрений имитировали только стартовое торфование, предположив, что пашня затем будет находиться в состоянии “идеального черного пара”, без поступления опада восстанавливающейся растительности или пожнивных остатков. Либо будет использована для выращивания пропашных культур, количество пожнивных остатков которых пренебрежимо мало. В вычислительных экспериментах длительностью 30 лет применяли сценарий климата, составленный для пахотной песчаной почвы, агрозема.

Внесение стартовой дозы торфа 12 кг/м^2 приводит к резкому увеличению запасов детрита в первые годы после торфования. Имитация способа введения торфа как когорты внутрипочвенного опада (соответствует запахиванию) или с включением в состав исходной почвы как когорты детрита не меняло результатов вычислительных экспериментов (рис. 3а, 3б). При имитации запахивания торфа около 10% удобрений формировали когорту слабо разложившегося внутрипочвенного опада (рис. 1), около 90% внесенного торфа модель относила к когорте детрита. Разница в структуре рассчитываемых запасов ПОВ заметна только в первый год после торфования, затем различия становятся несущественными.

По наблюдениям за результатами торфования в Мурманской области через 5–7 лет в почве остается около 70% торфа, затем скорость его минерализации значительно замедляется (Переверзев и др., 1988). По результатам нашего вычислительного эксперимента, через 5 и 7 лет после торфования в почве остается 73 и 64% от исходного запаса детрита соответственно (рис. 3в). По результатам наших вычислительных экспериментов, доля детрита за 30 лет уменьшается в 5.8 раз от исходного количества, с 13.21 до 2.27 кг/м^2 . Долгосрочные прогнозы динамики детрита требуют дальнейшего обсуждения в рамках практического исследования. Запасы гумуса за 30 лет данного вычислительного эксперимента увеличиваются почти в 2 раза, от 1.08 до 2.11 кг/м^2 , а суммарный запас ПОВ возрастает, по сравнению с фоновой почвой, в 1.6 раза – с 2.69 до 4.37 кг/м^2 (рис. 3а, 3б). В целом полученные в математической имитации закономерности динамики состава ПОВ, сочетания процессов минерализации и гумификации после стартового

торфования при окультуривании почвы совпадают с описанными в литературе экспериментальными результатами (Переверзев и др., 1987, 1988).

В длительных вычислительных экспериментах (90 лет) показано, что при внесении стартовой дозы торфа 12 кг/м^2 , а затем поддерживающих доз торфа раз в 6 лет (рис. 4), запасы ПОВ стабилизируются через 60 лет при внесении 12 и 8 кг/м^2 на $20\text{--}30 \text{ кг/м}^2$ (рис. 5). Эти величины намного превышают запасы ПОВ выбранного нами в качестве эталонного агрозема. Такие результаты интенсивного торфования, вероятно, экономически и экологически нецелесообразны. При поддерживающем торфование раз в 6 лет по 4 кг/м^2 запасы ПОВ стабилизируются через 30 лет на уровнях, близких эталонному дерново-подбуру с гумусовым горизонтом мощностью 30 см.

При имитации дополнительного к торфованиему внесения минеральных удобрений ($\text{N } 4 \text{ г/м}^2$ раз в 6 лет) общие запасы ПОВ сопоставимы с запасами в 20- и 30-сантиметровой толще агрозема (рис. 5). Количество и структура запасов по этим вариантам, внесение торфа (4) и торфа с азотными удобрениями (4+N), не различаются. Вариант с торфованием раз в 6 лет и внесением азотных удобрений ($\text{N } 4 \text{ г/м}^2$ ежегодно) приводит к увеличению запасов гумуса. Суть изменений этих результатов в вычислительных экспериментах понятна: добавление минерального азота в систему ускоряет процессы гумификации поступающего торфа. Насколько это соответствует процессам в реальной почве? Надо отметить, что модель ROMUL не имитирует потерь азота из-за выноса растворимых соединений или выделения газообразных продуктов. Нужны комплексные полевые исследования для планирования баланса минерализации, продуктивности и эвтрофикации сопредельных экосистем.

Проведенные вычислительные эксперименты дают представление об общих закономерностях динамики запасов ПОВ, поскольку мы не знаем историю внесения удобрений в принятую за эталон моделируемую почву. Основываясь на этих предварительных прогнозах, можно предположить, что в уже окультуренную пашню оптимально вносить минимальное количество торфа из рекомендованных в литературе величин – 40 т/га .

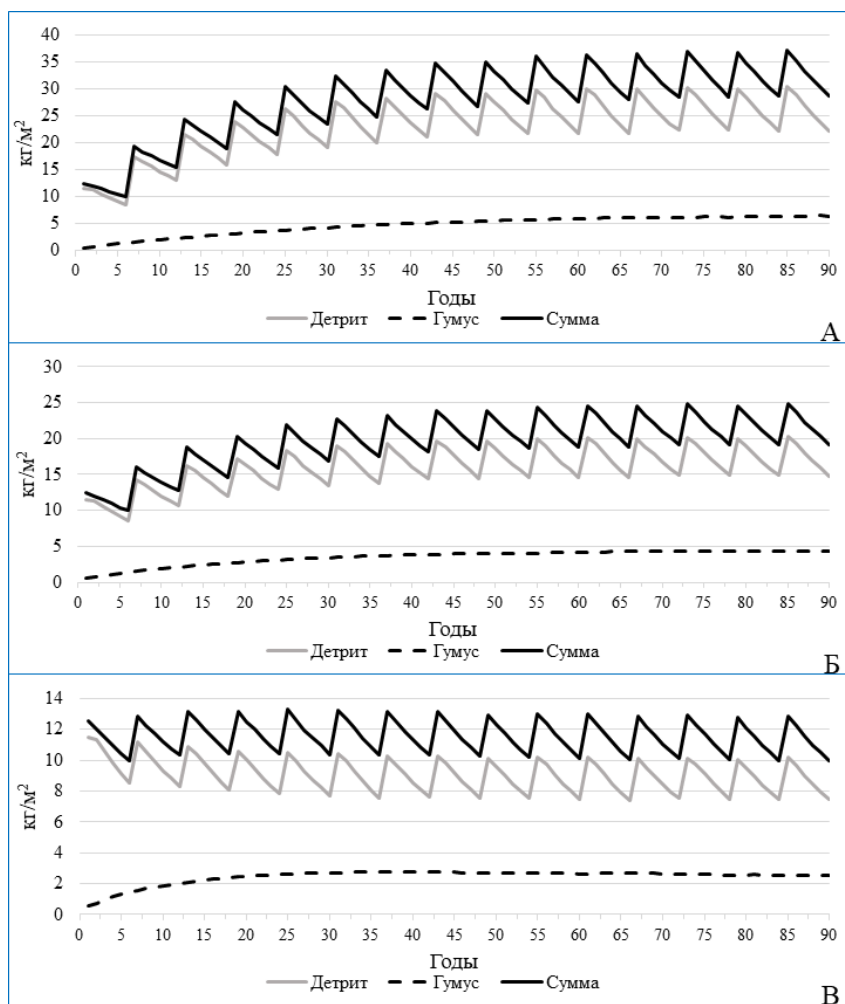


Рис. 4. 90-летняя динамика ПОВ агрозема при внесении 12 (А), 8 (Б) и 4 (В) кг/м² торфа (сухой массы в пересчете на беззольную) каждые 6 лет вычислительного эксперимента. Стартовое торфование 12 кг/м² в первый год. Обозначения аналогичны таковым на рис. 3.

Fig. 4. The 90-year dynamics of Plaggic Podzol SOM when applying 12 (А), 8 (Б) and 4 (В) kg/m² of peat (dry mass in terms of ash-free) every 6 years of the computational experiment. Starting peat application at the dose of 12 kg/m² in the first year.

Нормы внесения органических удобрений можно изменять в зависимости от выращиваемой культуры. В нашей работе мы имитировали динамику ПОВ под пропашными культурами, когда пожнивные остатки минимальны. Например, в биоклиматических условиях Мурманской области для выращивания однолетних трав была признана эффективной доза торфа (сухая масса с золой) 20 т/га (Переверзев и др., 1988).

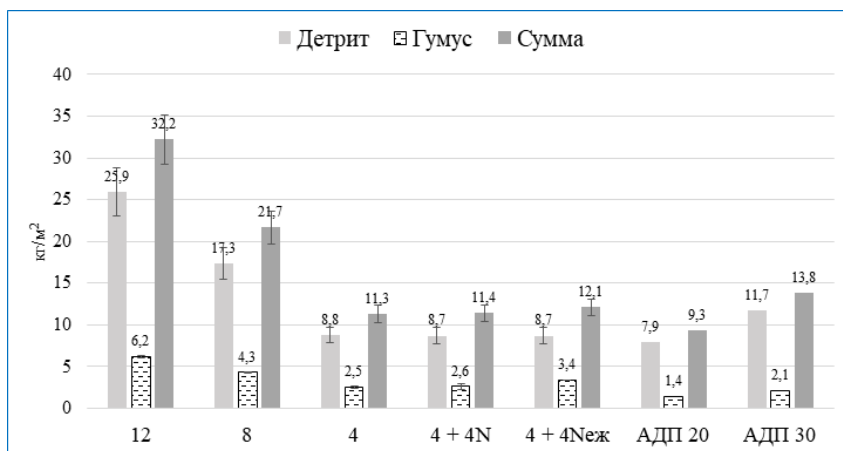


Рис. 5. Запасы ПОВ агрозема по результатам 90-летнего вычислительного эксперимента. Варианты: 12, 8 и 4 кг/м² торфа (сухой массы, раз в 6 лет); 4+N (4 кг/м² торфа и 4 г/м² N минеральных удобрений, раз в 6 лет), 4+N_{сж} – то же количество азотных удобрений ежегодно. На рисунке представлены средние величины, рассчитанные за периоды стабилизации запасов 12 и 8 – за последние 30 лет моделирования, 4 – за последние 60 лет моделирования. АДП 20 и АДП 30 – запасы ОБ агрозема в верхних 20 и 30 см профиля соответственно.

Fig. 5. Stocks of SOM Plaggic Podzol based on results of a 90-year computational experiment. Variants: 12, 8 and 4 kg/m² peat (dry mass, once in 6 years); 4+N (4 kg/m² peat and 4 g/m² N mineral fertilizer, once in 6 years). 4+N_{сж} – the same amount of N mineral fertilizer applied annually. The figure shows the mean values calculated for stock stabilization periods 12 and 8 for the last 30 years of simulation, 4 – for the last 60 years of simulation. АДП 20 and АДП 30 – SOM stocks in Plaggic Podzol in the upper 20 and 30 cm of the profile respectively.

Соответствие расчетных и экспериментальных данных можно проверить еще по одному параметру. Это дыхание почвы или выделение углекислого газа при минерализации ПОВ. Летом после внесения стартовой дозы торфа (12 кг/м^2) за сутки в среднем выделяется $4.5 \text{ С-СО}_2 \text{ г/м}^2$; после внесения поддерживающей дозы торфа (4 кг/м^2) за сутки в среднем выделяется $3.2 \text{ С-СО}_2 \text{ г/м}^2$. Варьирование дыхания почвы по периодам торфования и после обусловлено изменением погодных условий в разные годы имитации. В летние периоды после торфования (каждые 5 лет) среднесуточное дыхание почвы составляет $1.8 \text{ С-СО}_2 \text{ г/м}^2$ (рис. 6).

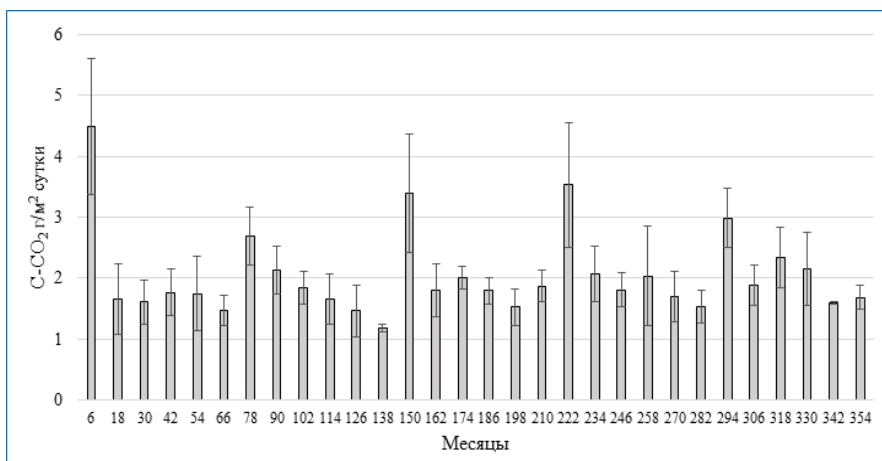


Рис. 6. Выделение углекислого газа из агрозема. Среднесуточное за июнь–август в 30-летнем вычислительном эксперименте. Средние суточные величины С-СО_2 (г/м^2 сутки) за летний период привязаны к июню месяцу каждого года модельного ряда. Торфование, сроки и дозы: 6-й месяц – 12 кг/м^2 ; 78-й, 150-й, 222-й, 294-й месяцы – по 4 кг/м^2 .

Fig. 6. Carbon dioxide emission from the Plaggic Podzol. Daily averages for June–August in a 30-year computational experiment. Daily averages of C-CO_2 (g/m^2 day) for the summer period are referenced to the June month of each year of the model series. Peat application, timing, and doses: month 6th – 12 kg/m^2 ; months 78th, 150th, 222th, and 294th – 4 kg/m^2 each.

Эти расчетные величины коррелируют с экспериментальными данными для опытного поля Ямальской агрохимической станции после внесения 30 т/га (3 кг/м^2) навоза, составившими $2.7\text{--}5.5 \text{ г С-СО}_2 \text{ /м}^2$ (Тихановский, 2021). Такое совпадение еще раз подтверждает адекватность проведенных нами вычислительных экспериментов с математической моделью ROMUL по анализу динамики запасов органического вещества в пахотных почвах Ямала.

ВЫВОДЫ

1. Рассчитанные запасы ПОВ в исследуемых почвах, принятых за эталонные для наших вычислительных экспериментов – дерново-подбура и агрозема иллювиально-железистого, были одного порядка с опубликованными литературными данными для Ямальской опытной станции.

2. Климатические сценарии, выполненные с использованием математической программы SCLISS, позволили провести вычислительные эксперименты по анализу динамики ПОВ изучаемых почв ЯНАО и получить результаты, адекватные результатам полевых исследований.

3. Проведенные вычислительные эксперименты с математической моделью ROMUL показали, что разовое внесение повышенной дозы торфа 120 т/га через 30 лет почти нивелируется, а более частое внесение 80–120 т/га торфа нецелесообразно, поскольку может вызвать заторфовывание почвы (избыточное накопление неразложившихся растительных остатков, детрита). Повышенная концентрация детрита может вызывать нежелательные изменения физико-химических свойств почв и может быть экономически неэффективна.

4. Поддерживающее торфование 4 кг/м^2 (40 т/га) с периодичностью раз в 6 лет оптимально для стабилизации запасов ОБ агрозема иллювиально-железистого агрогенно-аккумулятивного.

5. Дополнительное к торфованию внесение минеральных азотных удобрений $\text{N } 4 \text{ г/м}^2$ не меняет результаты вычислительных экспериментов по сравнению с вариантом внесения оптимальной дозы торфа; ежегодное внесение того же количества азота вызывает интенсификацию гумификации и усиление накопления гуму-

са. Этот факт требует экспериментальной проверки.

6. Параметры дыхания почвы по экспериментальным и вычисленным при моделировании результатам близки. Полагаем, что это может служить подтверждением адекватности проведенных вычислительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А., Бердси Р.А.* Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1994. 224 с.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: изд. Моск. Унив., 1970. 487 с.
3. *Базилевич Н.И., Титлянова А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
4. *Балаганская Е.Д.* Органическое вещество окультуренных подзолистых почв Мурманской области: Автореф. дис. ... к. б. н. 03.00.27. М., 1990. 16 с.
5. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>.
6. *Быховец С.С.* О параметризации влажности лесной подстилки в простой модели водного режима лесных почв // Математическое моделирование в экологии. Материалы 3-й Национальной научной конференции с международным участием. Пушкино, 2013. С. 40–41.
7. *Быховец С.С., Комаров А.С.* Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
8. *Игнатенко И.В.* Почвы восточноевропейской тундры и лесотундры. М.: Наука, 1979. 280 с.
9. *Ильин Б.М., Булыгина О.Н., Богданова Э.Г., Веселов В.М., Гаврилова С.Ю.* Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov>.
10. *Исекеев И.И.* Система повышения продуктивности и улучшения качества кормов луговых травостоев в лесостепной и лесотундровой зонах Западной Сибири Автореферат дис. ... докт. с.-х. н. 06.01.04. Омск, 1995. 38 с.

11. *Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В. и др.* Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. *В.Н. Кудеяров*. М.: Наука, 2007. 380 с.
12. *Моргун Е.Н., Абакумов Е.В., Низамутдинов Т.И., Ильясов Р.М.* Полярное земледелие в Ямало-Ненецком автономном округе. Возрождение. СПб.: Астерион, 2022. 250 с.
13. *Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Чертов О.Г.* Оптимизация рекультивации нарушенных земель промышленных карьеров с использованием математической модели динамики органического вещества ROMUL // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. № 11 (197). С. 1522–1526.
14. *Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Шанин В.Н., Комаров А.С.* Оценка возможной динамики органического вещества почв Антарктиды с применением математической модели ROMUL при климатических изменениях // Криосфера Земли. 2017. XXI. № 1. С. 57–65.
15. *Надпорожская М.А., Быховец С.С., Абакумов Е.В.* Применение математической модели ROMUL для оценки эмиссии CO₂ и динамики органического вещества литоземов Субантарктики // Почвоведение. 2022. № 4. С. 415–427.
16. *Низамутдинов Т.И., Сулейманов А.Р., Моргун Е.Н., Динкелакер Н.В., Абакумов Е.В.* Почвы залежного поля Ямальской опытной станции: эколого-аналитическая оценка // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 350–360. (На англ.). DOI: [10.21603/2074-9414-2022-2-2369](https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2369).
17. *Низамутдинов Т.И., Сулейманов А.Р., Моргун Е.Н., Гусев А.В., Тупахина О.С., Гусев А.В., Плеханов А.В., Тупахин Д.С., Абакумов Е.В.* Почвы заполярного археологического памятника “Поселение Лабитнанги 1 (Комяцкая деревня)”: морфологический анализ и химическая характеристика // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 114. С. 66–108. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-66-108](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-66-108).
18. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд. Моск. Унив., 1985. 376 с.
19. *Переверзев В.Н., Коробейникова Н.М., Балаганская Е.Д.* Влияние органических удобрений на плодородие и продуктивность новоосвоенной подзолистой почвы // Изучение целинных и окультуренных почв Мурманской области. Апатиты: изд. КФШ СССР. 1987. С. 64–83.
20. *Переверзев В.Н., Коробейникова Н.М., Балаганская Е.Д.* Применение торфа при мелиорации песчаных подзолистых почв в Мурманской области. Апатиты: 1988. 16 с.

21. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 222 с.
22. Поляков В.И., Петров А.А., Абакумов Е.В., Кимеклис А.К., Гладков Г.В., Андронов Е.Е. Микробиом постагрогенных палевых почв центральной Якутии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 119. С. 6–29. DOI: [10.19047/0136-1694-2024-119-6-29](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-6-29).
23. Растворова О.Г. Физика почв. Л.: ЛГУ, 1983. 195 с.
24. Справочник по климату СССР. Вып. 17. Омская и Тюменская области. Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 259 с.
25. Справочник по удобрениям. М.: Колос, 1964. 719 с.
26. Тихановский А.Н. Картофель на Ямале. Новосибирск: Академиздат, 2021. 160 с.
27. Тихановский А.Н. Биологическая рекультивация земель на Крайнем Севере // Аграрная наука. 2004а. № 8. С. 12–13.
28. Тихановский А.Н. Влияние органических и минеральных удобрений на численность и биомассу микроорганизмов в почвах Крайнего Севера // Агрохимия, 2004б. № 6. С. 24–29.
29. Тихановский А.Н. Теория и практика применения удобрений на почвах Крайнего Севера. М.: Научный консультант, 2015. 273 с.
30. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.: Сельхозгиз, 1937. 285 с.
31. Федеральная служба государственной статистики. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 24.07.2023 г.).
32. Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Кондратёнок Б.М., Лантева Е.М., Кострова С.Н. Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 787–794. DOI: [10.31857/S0032180X22070097](https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097).
33. Шерстюков А.Б. Описание массива суточных данных о температуре почвы на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации. URL: <http://meteo.ru/data/164-soil-temperature>.
34. Шерстюков А.Б. Описание массива суточных данных о температуре почвы по коленчатым термометрам Савинова по метеорологическим станциям Российской Федерации. URL: <http://meteo.ru/data/597-sutochnye-dannye-o-temperature-pochvy-po-kolenchatym-termometram-savinova>.

35. Hubbe A., Chertov O., Kalinina O., Nadporozhskaya M., Tolksdorf-Lienemann E., Giani, L. Evidence of plaggen soils in European North Russia (Arkhangelsk region) // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. Vol. 170. No. 3. P. 329–334.
36. Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates // Ecology. 1978. Vol. 59. No. 3. P. 465–472.
37. Nadporozhskaya M.A., Chertov O.G., Abakumov E.V. Determination of the optimal doses of organic fertilizers for plant protection by the computing experiments with mathematical model ROMUL // Mathematical modeling in plant protection. Dedicated to the memory of Professor R.A. Poluektov / V.A. Pavljushin, N.N. Semenova (Eds.). All-Russia Institute of Plant Protection, Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg State University, 2014. P. 31–36.
38. Nizamutdinov T., Abakumov E., Morgun E. Morphological features, productivity and pollution state of abandoned agricultural soils in the Russian Arctic (Yamal Region) // One Ecosystem. 2021. Vol. 6. e68408.
39. Price M.J. Seeing Green: Lifecycles of an Arctic Agricultural Frontier // Rural Sociology, 2023. DOI: [10.1111/ruso.12506](https://doi.org/10.1111/ruso.12506).

REFERENCES

1. Alekseev V.A., Berdsi P.A., *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii* (Carbon in ecosystems of forests and wetlands of Russia), Krasnoyarsk: Izd-vo SO RAN, 1994, 224 p.
2. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Руководство по химическому анализу почв), Moscow: Izd. Mosk. Univ., 1970, 487 p.
3. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., *Bioticheskii krugovorot na pyati kontinentakh: azot i zol'nye elementy v prirodnykh nazemnykh ekosistemakh* (Biotic cycling on five continents: nitrogen and ash elements in natural terrestrial ecosystems), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008, 381 p.
4. Balaganskaya E.D., *Organicheskoe veshchestvo okul'turenykh podzolistykh pochv Murmanskoi oblasti: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Organic matter of cultivated podzolic soils of Murmansk region: Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1990, 16 p.
5. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V., *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury vozdukha na stantsiyakh Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2014621485* (Description of the data set of monthly mean air temperature at the stations of Russia. Certificate of state registration of the database No. 2014621485.). URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#opisanie>

[massiva-dannykh.](#)

6. Bykhovets S.S., O parametrizatsii vlazhnosti lesnoi podstilki v prostoi modeli vodnogo rezhima lesnykh pochv (On parameterization of forest litter moisture in a simple model of forest soil water regime), *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical modeling in ecology), Proc. 3rd National Sci. Conf. with Intern. participation, Pushchino, 2013, pp. 40–41.
7. Bykhovets S.S., Komarov A.S., Prostoi statisticheskii imitator klimata pochvy s mesyachnym shagom (Simple statistical simulator of soil climate in monthly increments), *Pochvovedenie*, 2002, No. 4, pp. 443–452.
8. Ignatenko I.V., *Pochvy vostochnoevropeiskoi tundry i lesotundry* (Soils of Eastern European tundra and forest tundra), Moscow: Nauka, 1979, 280 p.
9. Il'in B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G., Veselov V.M., Gavrilova S.Yu., *Opisanie massiva mesyachnykh summ osadkov, s ustraneniem sistematicheskikh pogreshnostei osadkomernykh priborov* (Description of the array of monthly precipitation totals, with elimination of systematic errors of precipitation gauges), URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov>.
10. Isekeev I.I., *Sistema povysheniya produktivnosti i uluchsheniya kachestva kormov lugovykh travostoev v lesostepnoi i lesotundrovoi zonakh Zapadnoi Sibiri: Avtoref. diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (The system of increasing productivity and improving forage quality of meadow grass stands in the forest-steppe and forest-tundra zones of Western Siberia: Extended abstract of Dr. agric. sci. thesis), Omsk, 1995, 38 p.
11. Komarov A.S., Chertov O.G., Mikhailov A.V. et al., Kuderyarov V.N. (Ed.), *Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh* (Organic matter dynamics modeling in forest ecosystems), Moscow: Nauka, 2007, 380 p.
12. Morgun E.N., Abakumov E.V., Nizamutdinov T.I., Il'yasov R.M., *Polyarnoe zemledelie v Yamalo-Nenetskom avtonomnom okruge. Vozrozhdenie* (Polar agriculture in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Revival), Saint Petersburg: Asterion, 2022, 250 p.
13. Nadporozhskaya M.A., Abakumov E.V., Chertov O.G., Optimizatsiya rekul'tivatsii narushennykh zemel' promyshlennykh kar'erov s ispol'zovaniem matematicheskoi modeli dinamiki organicheskogo veshchestva ROMUL (Optimization of reclamation of disturbed lands of industrial quarries using the mathematical model of organic matter dynamics ROMUL), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, Vol. 11, No. 197, pp. 1522–1526.
14. Nadporozhskaya M.A., Abakumov E.V., Khoras'kina Yu.S., Bykhovets S.S., Shanin V.N., Komarov A.S., Otsenka vozmozhnoi dinamiki

organicheskogo veshchestva pochv Antarktidy s primeneniem matematicheskoi modeli ROMUL pri klimaticheskikh izmeneniyakh (Assessment of possible dynamics of organic matter of Antarctic soils using the mathematical model ROMUL under climatic changes), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 57–65.

15. Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Abakumov E.V., *Primenenie matematicheskoi modeli ROMUL dlya otsenki emissii SO₂ i dinamiki organicheskogo veshchestva litozemov Subantarktiki* (Application of the ROMUL mathematical model to estimate CO₂ emissions and organic matter dynamics of Subantarctic lithozems), *Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 415–427.

16. Nizamutdinov T.I., Suleymanov A.R., Morgun E.N., Dinkelaker N.V., Abakumov E.V., *Ecotoxicological Analysis of Fallow Soils at the Yamal Experimental Agricultural Station, Food Processing: Techniques and Technology*, 2022, Vol. 52, No. 2, pp. 350–360, DOI: [10.21603/2074-9414-2022-2-2369](https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2369).

17. Nizamutdinov T.I., Suleymanov A.R., Morgun E.N., Gusev A.V., Tupakhina O.S., Gusev A.V., Plekhanov A.V., Tupakhin D.S., Abakumov E.V. Soils of the polar archaeological site “Settlement Labytangi 1 (Komy village)”: morphological analysis and chemical composition, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 114, pp. 66–108, DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-66-108](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-66-108).

18. Orlov D.S., *Khimiya pochv* (Soil chemistry), Moscow: Izd. Mosk. Univ., 1985, 376 p.

19. Pereverzev V.N., Korobeinikova N.M., Balaganskaya E.D., *Vliyanie organicheskikh udobrenii na plodorodie i produktivnost' novo-osvoennoi podzolistoi pochvy* (Effect of organic fertilizers on fertility and productivity of newly-developed podzolic soil), Apatity: izd. KFSH SSSR, 1987, pp. 64–83.

20. Pereverzev V.N., Korobeinikova N.M., Balaganskaya E.D., *Primenenie torfa pri melioratsii peschanykh podzolistykh pochv v Murmanskoi oblasti* (Application of peat in reclamation of sandy podzolic soils in Murmansk region), Apatity, 1988, 16 p.

21. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., *Gumus i pochvoobrazovanie* (Humus and soil formation), Leningrad: Nauka, 1980, 222 p.

22. Polyakov V.I., Petrov A.A., Abakumov E.V., Kimeklis A.K., Gladkov G.V., Andronov E.E., Soil microbiome of Plaggic Anthrosol and Calcic Cryosols in Central Yakutia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 6–29, DOI: [10.19047/0136-1694-2024-119-6-29](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-6-29).

23. Rastvorova O.G., *Fizika pochv* (Soil physics), Leningrad: LGU, 1983, 195 p.

24. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 17. Omskaya i Tyumenskaya oblasti.*

Ch. 4. Vlazhnost' vozdukha, atmosferynye osadki i snezhnyi pokrov (Reference book on the climate of the USSR. Vol. 17. Omsk and Tyumen oblasts. Ч. 4. Air humidity, precipitation and snow cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968, 259 p.

25. *Spravochnik po udobreniyam* (Fertilizer Handbook), Moscow: Kolos, 1964, 719 p.

26. Tikhonovskii A.N., *Kartofel' na Yamale* (Potatoes in Yamal), Novosibirsk: Akademizdat, 2021, 160 p.

27. Tikhonovskii A.N., *Biologicheskaya rekul'tivatsiya zemel' na Krainem Severe* (Biological land reclamation in the Far North), *Agrarnaya nauka*, 2004a, No. 8, pp. 12–13.

28. Tikhonovskii A.N., *Vliyanie organicheskikh i mineral'nykh udobrenii na chislennost' i biomassu mikroorganizmov v pochvakh Krainego Severa* (Influence of organic and mineral fertilizers on the number and biomass of microorganisms in soils of the Far North), *Agrokimiya*, 2004b, No. 6, pp. 24–29.

29. Tikhonovskii A.N., *Teoriya i praktika primeneniya udobrenii na pochvakh Krainego Severa* (Theory and practice of fertilizer application on soils of the Far North), Moscow: Nauchnyi konsul'tant, 2015, 273 p.

30. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii. Uchenie o pochvennom gumuse* (Soil organic matter and its role in soil formation and fertility. The doctrine of soil humus), Moscow: Sel'khozgiz, 1937, 285 p.

31. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. Chislennost' naseleniya Rossiiskoi Federatsii po munitsipal'nym obrazovaniyam* (Federal State Statistics Service. Population of the Russian Federation by municipalities), URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>.

32. Shamrikova E.V., Vanchikova E.V., Kondratenok B.M., Lapteva E.M., Kostrova S.N., *Problemy i ogranicheniya dikhromatometricheskogo metoda izmereniya sodержaniya pochvennogo organicheskogo veshchestva (obzor)* (Problems and limitations of the dichromatometric method for measuring soil organic matter content (review)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 7, pp. 787–794, DOI: [10.31857/S0032180X22070097](https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097).

33. Sherstyukov A.B., *Opisanie massiva sutochnykh dannykh o temperature pochvy na glubinakh do 320 sm po meteorologicheskim stantsiyam Rossiiskoi Federatsii* (Description of the array of daily data on soil temperature at depths up to 320 cm by meteorological stations of the Russian Federation), URL: <http://meteo.ru/data/164-soil-temperature>.

34. Sherstyukov A.B., *Opisanie massiva sutochnykh dannykh o temperature pochvy po kolenchatym termometram Savinova po meteorologicheskim stantsiyam Rossiiskoi Federatsii* (Description of daily soil temperature data set

by Savinov bent-stem thermometers for meteorological stations of the Russian Federation), URL: <http://meteo.ru/data/597-sutochnye-dannye-o-temperature-pochvy-po-kolenchatym-termometram-savinova>.

35. Hubbe A., Chertov O., Kalinina O., Nadporozhskaya M., Tolksdorf-Lienemann E., Giani L., Evidence of plaggen soils in European North Russia (Arkhangelsk region), *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, Vol. 170(3), pp. 329–334.

36. Meentemeyer V., Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates, *Ecology*, 1978, Vol. 59(3), pp. 465–472.

37. Nadporozhskaya M.A., Chertov O.G., Abakumov E.V., Determination of the optimal doses of organic fertilizers for plant protection by the computing experiments with mathematical model ROMUL, *Mathematical modeling in plant protection*, V.A. Pavljushin, N.N. Semenova (Eds.), Proc. Conf. Dedicated to the memory of Professor R.A. Poluektov, All-Russia Institute of Plant Protection, Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg State University, 2014, pp. 31–36.

38. Nizamutdinov T., Abakumov E., Morgun E., Morphological features, productivity and pollution state of abandoned agricultural soils in the Russian Arctic (Yamal Region), *One Ecosystem*, 2021, No. 6, e68408.

39. Price M.J., Seeing Green: Lifecycles of an Arctic Agricultural Frontier, *Rural Sociology*, 2023, DOI: [10.1111/ruso.12506](https://doi.org/10.1111/ruso.12506).

УДК 631.46

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-84-106



Ссылки для цитирования:

Рогожина Е.В., Моисеева Е.В., Худокормов А.А., Захарихина Л.В. Микробиологические индикаторы раннеголоценовой притеррасной почвы долины реки Мзымта Черноморского побережья Кавказа // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 84-106. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-84-106

Cite this article as:

Rogozhina E.V., Moiseeva E.V., Khudokormov A.A., Zakharikhina L.V., Microbiological indicators of early Holocene near-terrace soil in the valley of the Mzymta River on the Black Sea coast of the Caucasus, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 84-106, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-84-106

Благодарность:

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания FGRW-2024-0004 № госрегистрации 1022040700994-8-1.5.4;1.5.5;1.5.8;1.5.10.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment No. FGRW-2024-0004, state registration No. 1022040700994-8-1.5.4;1.5.5;1.5.8;1.5.10.

Микробиологические индикаторы раннеголоценовой притеррасной почвы долины реки Мзымта Черноморского побережья Кавказа

© 2024 г. Е. В. Рогожина^{1*}, Е. В. Моисеева^{2**},
А. А. Худокормов^{2***}, Л. В. Захарихина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФИЦ “Субтропический научный центр РАН”, Россия,
354002, Сочи, ул. Я. Фабрициуса, 2/28,

*<https://orcid.org/0000-0002-8473-4217>, e-mail: rogojinaEW@yandex.ru.

²Кубанский Государственный университет, Россия,
350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149,

**<https://orcid.org/0000-0002-4720-0021>, e-mail: moisieieva97@inbox.ru,

***<https://orcid.org/0000-0001-8212-3941>.

Поступила в редакцию 27.10.2023, после доработки 13.03.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: На примере изучения раннеголоценовой палеоаллювиальной почвы (стоянка древнего человека в гроте Ахцу, надпойменная терраса среднего течения реки Мзымта Сочинского Причерноморья) показана эффективность применения комплекса микробиологических методов, раскрывающих условия формирования древнего палеообъекта и генезис геоморфологии речной долины. Исследование морфологии и мезоморфологии палеопочвы позволило сделать предположение о возможном ее формировании в условиях существенно более гидроморфных в сравнении с современными. Вероятно, ранее, в начале голоцена, данный участок являлся не террасой, а притеррасной переувлажненной частью поймы реки. Микробиологические характеристики подтвердили данное предположение. Из выделенной почвенной ДНК прокариотных микроорганизмов (бактерий и архей) методом ДНК-метабаркодинга идентифицирован состав микробного сообщества. Это представители доминантного в составе микробиома (более 1% от общей ДНК) филума *Planctomycetes* классов *Phycisphaerae* и *Planctomycetia* и цианобактерии класса *Chloroplast* порядков *Streptophyta*, *Stramenopiles* и *Pseudanabaenale*. Микробиологическими индикаторами переувлажненных условий формирования палеопочв в раннеголоценовом периоде являлся вид архей (0.5% от общей ДНК) филума *Euryarchaeota*; класса *Thermoplasmata*; семейства *Methanomassiliicoccaceae*, способный к метаногенезу. В микробном комплексе современной фоновой почвы данный вид не обнаружен. Выявленные в составе прокариотного сообщества палеопочв индикаторные микроорганизмы могут потенциально обладать полезными прикладными свойствами. Отмечено отсутствие культивируемых форм аэробных и анаэробных целлюлозолитиков, что обусловлено, возможно, отсутствием субстрата (клетчатки).

Ключевые слова: притеррасные палеопочвы; микроорганизмы; биоиндикаторы; метабеном; ДНК-метабаркодинг; Сочинское Причерноморье.

Microbiological indicators of early Holocene near-terrace soil in the valley of the Mzymta River on the Black Sea coast of the Caucasus

© 2024 E. V. Rogozhina^{1*}, E. V. Moiseeva^{2**},
A. A. Khudokormov^{2***}, L. V. Zakharikhina¹

¹*Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre
of the Russian Academy of Sciences,
2/28 Ya. Fabricius Str., Sochi 354002, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-8473-4217>, e-mail: rogojinaEW@yandex.ru.

²*Kuban State University,
149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0002-4720-0021>, e-mail: moisieieva97@inbox.ru,
***<https://orcid.org/0000-0001-8212-3941>.*

Received 27.10.2023, Revised 13.03.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: By the example of studying the Early Holocene paleoalluvial soil (ancient man's site in Akhtsu Grotto, an overflow terrace of the middle reaches of the Mzymta River, Sochi Black Sea region), the efficiency of using a set of microbiological methods revealing the conditions of formation of the ancient paleoobject and the genesis of the geomorphology of the river valley was shown. The study of morphology and mesomorphology of the palaeo-soil allowed to assume its possible formation under the conditions significantly more hydromorphic in comparison with the modern ones. It is probable that earlier, at the beginning of the Holocene, this area was not a terrace, but a near-terrace, over-watered part of the river floodplain. Microbiological characteristics confirmed this assumption. The composition of the microbial community was identified from the isolated soil DNA of prokaryotic microorganisms (bacteria and archaea) by DNA metabarcoding. Groups and species of microorganisms-indicators reflecting the specificity of genesis of the studied soils were identified. Microbiological indicators of overwatered conditions were representatives of the phylum *Planctomycetes* of *Phycisphaerae* and *Planctomycetia* classes dominant in the microbiome (more than 1% of total DNA) and cyanobacteria of *Chloroplast* class of *Streptophyta*, *Stramenopiles* and *Pseudanabaenale* orders, as well as archaea (0.5% of total DNA) of *Euryarchaeota* phylum; *Thermoplasmata* class; *Methanomassiliicoccaceae* family, capable of methanogenesis. This species was not found in the microbial complex of the modern background soil. Indicator microorganisms identified as part of the prokaryotic community of palaeo-soils may potentially have useful applicable properties.

Keywords: preterra paleosol; microorganisms; bioindicators; metagenome; DNA-metabarcoding; Sochi Black Sea coastline.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи палеомикробиологии имели большое значение для формирования представлений об эволюции климата и условий

почвообразования на Земле. Погребенные микробные сообщества палеопочв не только жизнеспособны, но и отражают природные условия, существовавшие в древности (Frindte et al., 2020). Эволюция конкретного почвенного ареала определяет состояние микробных сообществ почвы в тот или иной исторический период, поэтому возникает локальная специфика в структурно-функциональной организации микробного сообщества (Дёмкина, 2020).

Древние почвы довольно часто бывают обнаружены на территории речных террас (Hsu et al., 2021; Kuznetsova et al., 2020; Sedov et al., 2022), в том числе заселенных в древности человеком (Плеханова., 2019; Ovchinnikov et al., 2022). Речные террасы являются древними образованиями, сформированными двумя природными процессами – периодическим затоплением полыми водами и отложением аллювия (наилка). При этом процессе происходит естественное орошение и влагозарядка почв. Аллювиальные почвы наследуют от отлагаемого аллювия гранулометрический, петрографический, биолитный состав. Органические вещества поступают за счет привносимого наилка, так как он богат органическим углеродом, соединениями калия и фосфора, а также содержит разнообразную микрофлору, которая формирует впоследствии экосистему почвы или входит в состав уже существующего сообщества (Добровольский, 2011). Формирование палеоаллювиальных почв Кавказа также происходило под влиянием гидрорежима рек. Согласно литературным данным, аллювиальные почвы долин горных рек целесообразно использовать для восстановления кратковременных (голоценовых) событий в циклах потепления-похолодания, так как из-за высокой скорости течения годовая мощность отложений в поймах горных рек невелика (Kovaleva, Stolpnikova, 2020). Однако древние микробные сообщества формируются не только под влиянием климата эпохи, но и обусловлены спецификой биотопа, в котором шел процесс почвообразования. Гидрогеологические процессы (изменение русла реки, образование речных террас) приводят к сукцессии экосистем в пойме реки. В результате древние почвы сохраняют в своем составе микроорганизмы-индикаторы ранее существующих экотопов (Hsu et al., 2021). Исследования палеопочв с целью выделения микроор-

ганизмов-хроноиндикаторов и экомаркеров проводятся сегодня не только традиционно – посевом почвенной суспензии на питательные среды, но и с привлечением молекулярно-биологических и биоинформационных (выделение тотальных ДНК и РНК из почвы, количественная ПЦР с детекцией в реальном времени, высокопроизводительное секвенирование) методов. Результаты исследований отражают численность генов основных групп почвенных микроорганизмов, содержание функциональных генов и таксономическую структуру микробиомов (Chernov et al., 2018). В совокупности использование химико-аналитических и количественных микробиологических, а также молекулярно-генетических исследований позволяет изучать не только текущее состояние микробиома почвы, но и следы древнего сообщества, которое неактивно или слабо выражается на фоне культивируемого сообщества.

В публикациях последних лет палеопочвы рассматривают как банк древних микроорганизмов, обладающих хозяйственно ценными свойствами – антимикробной, противовирусной, ростстимулирующей активностью, а также способностью к синтезу важных биополимеров, биологически активных веществ (ферментов, витаминов) или к гидролизу ксенобиотиков, углеводов, полимеров (Manuchanova et al., 2020). В этой связи представлял интерес анализ прикладных свойств видов-индикаторов, обнаруженных в микробиоме. В Сочинском Причерноморье подобные исследования проводятся впервые.

Таким образом, целью исследований являлось определение групп и видов микроорганизмов-индикаторов, способных раскрыть историю формирования раннеголоценовой палеопочвы, обнаруженной в долине реки Мзымта Черноморского побережья Кавказа в месте стоянки древнего человека, а также выполнение анализа возможных прикладных свойств в области биотехнологии, выявленных в палеообъекте видов микроорганизмов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись на археологическом объекте Сочинского Причерноморья, который был отнесен к памятникам каменного века и получил наименование “пещерная стоянка в гроте Ахцу”. Грот Ахцу расположен в 20 км от береговой линии моря

(43°56'N; 39°99'E) примерно в 70 м от уреза р. Мзымта, абсолютная высота его над уровнем моря составляет 133 м, высота над уровнем реки 12 м (рис. 1).

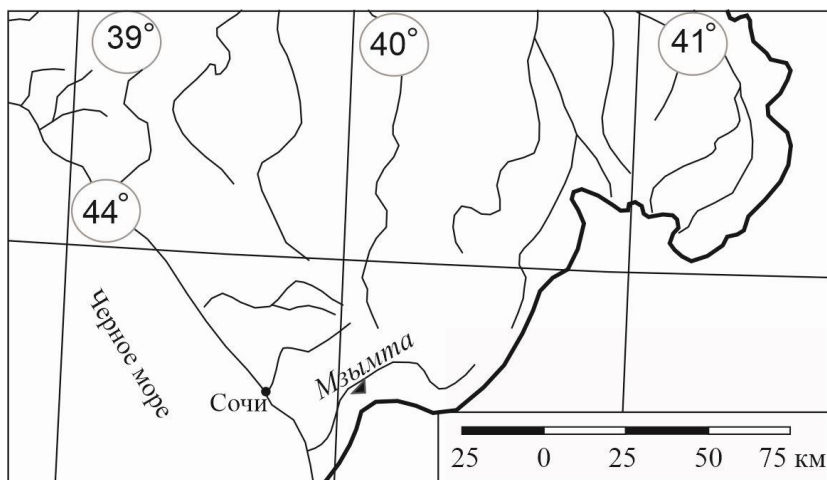


Рис. 1. Обзорная схема расположения грота Ахцу.

Fig. 1. Overview of the location of the Akhtsu grotto.

В открытом археологическом раскопе (заложенном при археологических раскопках в 2014–2015 гг.) была обнаружена палеопочва. Возраст слоя, в котором она располагалась, установленный археологами радиоуглеродным методом по кости древних животных, составляет 8.3 тыс. лет (Кулаков и др., 2017). Палеопочва залегала на глубине 12–30 см. Перекрыта она была мелко раздробленной породой пещерных отложений, имевших очень плотное, сцементированное сложение. Педогенное происхождение палеообъекта подтверждалось наличием отдельных фрагментов, хорошо сохранившихся ризолитов (древних корней) и высоким содержанием в нем органического углерода (2.3%).

Установленный почвенный палеогоризонт имел очень темную, фактически черную окраску, рыхлое аморфное сложение. Под лупой (×10) он представлял собой рыхло-сложенный темно бурый аморфный материал, скрепленный в комковатые отдельно-

сти, напоминающий по сложению перегнойный горизонт Н. Все морфологические и мезоморфологические особенности свидетельствовали в пользу гидроморфного происхождения палеопочвы. Кроме того, очень большая для погребенной почвы мощность горизонта (около 20 см) также указывала на то, что, вероятнее всего, в период раннего голоцена это была не минеральная почва, а, скорее, органогенная – либо аллювиальная с мощным перегнойным горизонтом Н, сформированным прибрежной высокотравной растительностью, либо вовсе низинная торфяная почва. Поверхностные органоминеральные горизонты минеральных почв, имеющие, как правило, мощность при современном (дневном) залегании около 10–15 см, переходя в погребенное состояние приобретают небольшую мощность – не более 1–2 см (Zakharikhina et al., 2021).

В пользу органогенно-гидроморфного происхождения палеопочвы не свидетельствовало лишь ее очень сухое состояние. Она не имела мажущуюся консистенцию, характерную для перегнойных и низинных торфяных почв. Вероятно, ранее, в начале голоцена данный участок являлся не террасой, а притеррасной переувлажненной частью поймы реки. Такие низинные переувлажненные участки, часто образованные маломощными низинными торфяными почвами, характерны и в современности для долин рек региона. Позже, когда русло реки сместилось, пойма изменила геоморфологическое положение, перейдя в надпойменную террасу. Условия увлажнения здесь существенно изменились, стало суше, и гидроморфная органогенная почва значительно трансформировалась по степени увлажнения, сохранив при этом свое характерное сложение.

В целях сравнительного анализа современные аналоги палеопочвы (фон), имеющие схожие свойства и мезоморфологические характеристики, были опробованы в непосредственной близости от грота под высокотравной и разнотравной растительностью в расщелинах крупноглыбистой породы.

В сравнении с фоновыми почвами палеопочва грота имела пониженные содержания органического углерода (фон – 2.9%, палеопочва – 2.3%), подвижных форм калия (фон – 757 мг/кг, палеопочва – 209 мг/кг) и повышенные концентрации доступного

фосфора (фон – 69 мг/кг, палеопочва – 219 мг/кг). Степень насыщенности основаниями в ней составляла 99%, что соответствовало показателям фона. Кислотность (pH_{KCl}) палеопочвы и фона имела сходные значения и была равна 7.0 ед. Влажность палеопочвы была незначительно ниже (18%) по сравнению с фоном (24%) (Zakharikhina et al., 2021).

Морфология, свойства и местоположение в рельефе позволило классифицировать почву как аллювиальную темnogумусовую (Шишов., 2008). В соответствии с World Reference Base for Soil Resources (World Reference Base..., 2014) и специальной палеопочвенной классификацией Г. Мака (Mack et al., 1993), почва диагностировалась как Histosols (Folic).

Качественное и количественное определение физиологических групп микроорганизмов проводили стандартными микробиологическими методиками с высевом на питательные среды (Практикум по микробиологии, 2005). Для количественной оценки содержания бактерий, мобилизующих органические источники азота, использовали мясо-пептонный агар (МПА), для учета олигокарбофилов – стандартную среду МПА, разбавленную в 10 раз, нитрификаторов – нитритный агар, свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов – среду Эшби, анаэробных целлюлозолитиков – жидкую среду Имшенецкого, аэробных – почвенную вытяжку с карбоксиметилцеллюлозой. Для культивирования фототрофных серобактерий использовали накопительную среду Ван-Ния. Для выявления серобактерий различных экологических групп применяли более универсальную среду Бейеринка.

Отбор почвенной пробы для проведения микробиологических посевов и молекулярно-генетического анализа был произведен с соблюдением условий стерильности. Образец погребенных почв отбирался с помощью стерильных перчаток и ножа, затем помещался в стерильный полиэтиленовый пакет и пластиковую пробирку с герметичной крышкой, которую замораживали в морозильной камере при температуре -20°C до отправки в специализированную лабораторию генетического анализа. Транспортировали образец в охлаждающей камере. ДНК-метабаркодирование состояло из следующих этапов: выделение из почвы суммарной ДНК, амплификация участков генов и идентификация ампликонов. Подго-

товку геномных библиотек осуществляли согласно протоколу “Preparing 16S Ribosomal RNA Gene Amplicons for the Illumina MiSeq System”. Амплификацию V3-V4 региона 16S рРНК проводили с использованием прокариотических праймеров: прямой – TCGTCCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGG NGGCWGCAG; обратный – GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGT-ATAAGAGAC AGGACTACHVGGGTATCTAATCC, – с последующей индексацией ампликонов. Секвенирование выполнялось на платформе Illumina MiSeq (США) (режим парного чтения 300 пар нуклеотидов). При обработке данных секвенирования использовали алгоритм классификации операционных таксономических единиц (OTE) с открытым референсом (Open-reference OTU), порог классификации – 97% сходства, что обычно соответствует виду. Визуализация данных проведена с помощью построения диаграмм потоков (Sankey diagram библиотека plotly, python).

Химические показатели были определены по общепринятым стандартным методикам (Практикум по агрохимии, 2001): рН_{KCl} – потенциометрически (ионметр рН-121); органический углерод – по Тюрину в модификации Орлова и Гриндель; фосфор подвижный – по Олсену (прибор УСФ 01); калий обменный – по Масловой со спектрометрическим окончанием (прибор КВАНТ - АФА); содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} в солевой вытяжке NaCl – трилонометрическим методом; гидролитическая кислотность – по Каппену; влажность – весовым методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования аллювиальной темnogумусовой почвы раннеголоценового периода (грот Ахцу) показали, что численность в ней аммонифицирующих бактерий на порядок ниже, по сравнению с современной фоновой почвой ($1.7 \cdot 10^5$ и $7.5 \cdot 10^6$ КОЕ/г соответственно), а содержание олиготрофов ($1.7 \cdot 10^6$ и $3.6 \cdot 10^6$ КОЕ/г соответственно) и азотфиксаторов ($5.2 \cdot 10^6$ и $3.6 \cdot 10^6$ КОЕ/г соответственно) соразмерно. Более активное развитие в палеопочве олиготрофов, по сравнению с аммонификаторами, является характерной особенностью погребенных почв (Демкин и др., 2013; Демкина, 2020) и может свидетельствовать о низком содержании в исследуемом образце органических

соединений азота. Высокое (на уровне фона) содержание азотфиксаторов в микробных комплексах палеопочв может быть связано с недостатком доступных форм азота (Чернов, Железова, 2020). Численность нитрификаторов в палеопочве грота и фона различалась на 3 порядка и составила $6.0 \cdot 10^3$ и $1.4 \cdot 10^6$ КОЕ/г соответственно. На численность нитрификаторов, способных к разложению сложных азотсодержащих соединений (в том числе гумуса), возможно, в большей степени повлияли процессы диагенеза – трансформации палеопочв, происходящей при их погребении (Zakharikhina et al., 2021).

В результате исследования целлюлозолитической активности микроорганизмов палеопочвы разложения целлюлозы в анаэробных условиях не обнаружено. После 30-дневного культивирования в жидкой питательной среде заметного изменения плотности бумаги не наблюдалось, однако появлялся зеленый налет на бумаге и стенках пробирок, который связан с возможным заселением фототрофных анаэробных бактерий или водорослей. В аэробной среде наблюдали единичные колонии бактерий, разлагающих клетчатку, в то время как в фоновой почве их содержание соответствовало $1.1 \cdot 10^5$ КОЕ/г. Культивируемые формы аэробных и анаэробных целлюлозолитиков практически отсутствуют в палеопочве, что, возможно, связано с отсутствием клетчатки, гидролизованной в процессе диагенеза. В результате культивирования на среде Ван-Ниля были обнаружены обитатели природных вод – фототрофные серобактерии в виде единичных колоний на плотной среде. Столь незначительное их содержание в палеопочве, вероятно, являлось результатом контаминации в периоды паводков. Подтверждало данное предположение отсутствие серобактерий на среде Бейеринка.

По результатам секвенирования 16S рРНК прокариотное сообщество палеопочв грота и современных фоновых почв представлено преимущественно видами домена *Bacteria* (295 и 325 видов соответственно). Домен *Archaea* являлся минорным (3 и 2 вида соответственно). Своего рода индикатором палеопочвы грота Ахцу, в которой процессы минерализации органического вещества протекали в переувлажненных условиях, создающих анаэробные условия, выступает вид домена *Archaea*; филума *Euryarchaeota*;

класса *Thermoplasmata*; семейства *Methanomassiliicoccaceae*. Высокая доля содержания в микробоценозе палеопочвы данного вида (0.5% от общей ДНК) предполагает значительное участие *Methanomassiliicoccales* в метаногенезе – анаэробном окислении метана. В микробном комплексе современной фоновой почвы данный вид не обнаружен. Согласно литературным данным, гены 16S рПНК, ассоциированные с *Methanomassiliicoccales*, были обнаружены в широком диапазоне бескислородных сред (Borrel et al., 2013), включая морскую среду обитания, рисовые поля и кишечные тракты термитов, млекопитающих, людей. Совсем недавно Зёллингер и др. (Sollinger et al., 2016) подтвердили, что *Methanomassiliicoccales* предпочитают анаэробную среду обитания, и разделили этот отряд на основе филогенетического и геномного анализа метаногенных последовательностей, выделенных из водно-болотных угодий и кишечного тракта животных, на 2 группы: “экологическую” и “желудочно-кишечного тракта”. Авторы также сообщили о более крупных геномах и большем количестве генов, кодирующих антиоксидантные ферменты в “экологической” группе, что делает их интересными для использования в биотехнологии. С большой долей вероятности можно предположить, что в палеопочве грота присутствует экологическая группа метаномассиликокковых бактерий, распространенная в заболоченных местах обитания.

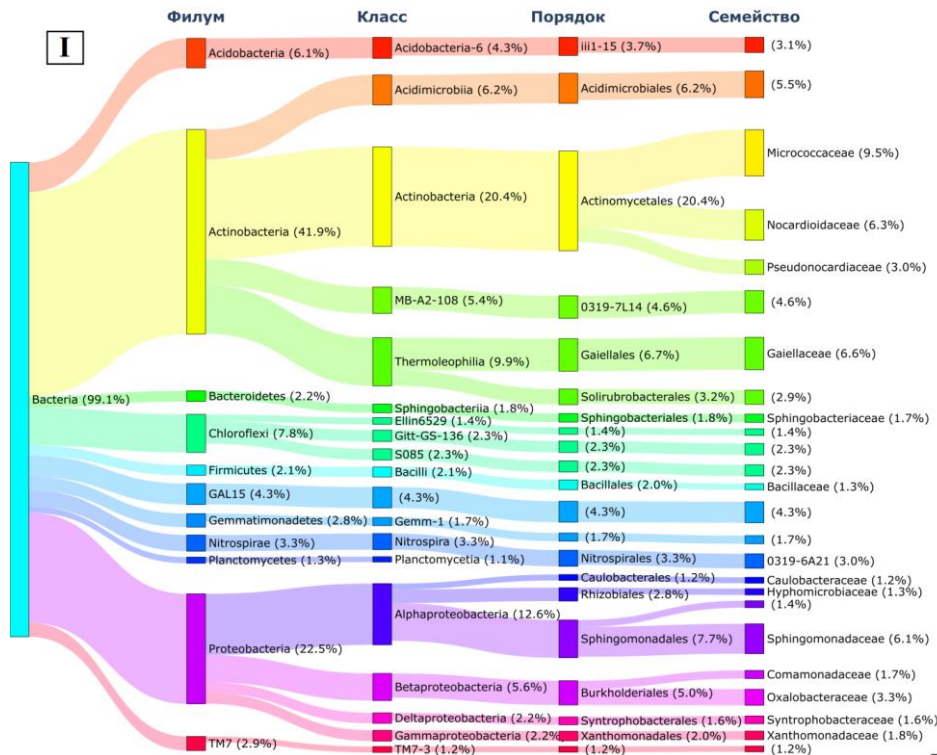
Все эти данные являются подтверждением выдвинутой выше гипотезы об изначальном гидроморфном происхождении палеопочвы и свидетельствуют в пользу того, что формирование почвы на дневной поверхности в начале голоцена протекало в переувлажненных условиях.

Генетическое сходство микробиомов палеопочвы и фона подтверждалось доминированием (встречаемость ДНК более 1% от общего) в прокариотных сообществах 8 филумов бактерий (рис. 3). В меньшей степени различалось содержание ДНК представителей филумов *Actinobacteria* (41.9 и 44.9% соответственно), *Proteobacteria* (22.5 и 26.3% соответственно), *Bacteroidetes* (2.2 и 1.8% соответственно), *Gemmatimonadetes* (2.8 и 2.3%, соответственно), *Nitrospirae* (3.3 и 2.3% соответственно), *Planctomycetes* (1.3 и 2.2%, соответственно), в большей степени – *Acidobacteria*

(6.1 и 11.1% соответственно), *Chloroflexi* (7.8 и 4.4% соответственно). Снижение содержания представителей *Acidobacteria* (на 5.0%) и увеличение *Chloroflexi* (на 3.4%) в погребенных почвах вряд ли может служить индикатором временной (эволюционной) перестройки структуры микробиома. Это связано с тем, что изменения содержания таксонов в микробиоме в пределах 5% ДНК соответствуют уровню сезонных колебаний содержания этих групп микроорганизмов в почвах (Чернов, Железова, 2020). Еще 3 филума (*TM7* (2.9%), *GAL15*(4.3%), *Firmicutes* (2.0%)) доминировали в микробиоме грота, а в фоновых почвах являлись минорными компонентами. Роль первых двух до конца не изучена, их рассматривают как кандидатов в филумы. Представители *Firmicutes* относятся к классу *Bacilli* (род *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*). Бациллы широко встречаются в природе, предпочитают богатые органические субстраты и их доминирование в палеопочве может быть связано с деятельностью древнего человека-охотника, использующего грот в качестве стоянки для разделки туш животных, о чем свидетельствуют многочисленные артефакты, найденные в погребенной почве (Кулаков и др., 2017).

Большинство представленных на диаграмме доминантных филумов встречаются в составе прокариотных сообществ различных типов почв, образуя ассоциации и комплексно участвуя в деструкции органического вещества (Чирак и др., 2013; Chernov et al., 2018), что является еще одним подтверждением педогенной природы погребенной в гроте палеопочвы.

Однако филум *Planctomycetes*, являясь одной из важных и численно репрезентативных групп бактерий в доминантном микробном сообществе палеопочвы грота и фона, может преобладать только в гидроморфных условиях. Изначально планктомицеты были описаны как класс водных бактерий, который обнаруживался в образцах водорослей в морской воде (Elshahed et al., 2007). Однако с введением в практику методов молекулярной экологии они были обнаружены в торфяных сфагновых болотах (Kulichavskaia et al., 2006), в анаэробных источниках, богатых соединениями серы (Elshahed et al., 2007), в почвенных сообществах микроорганизмов.



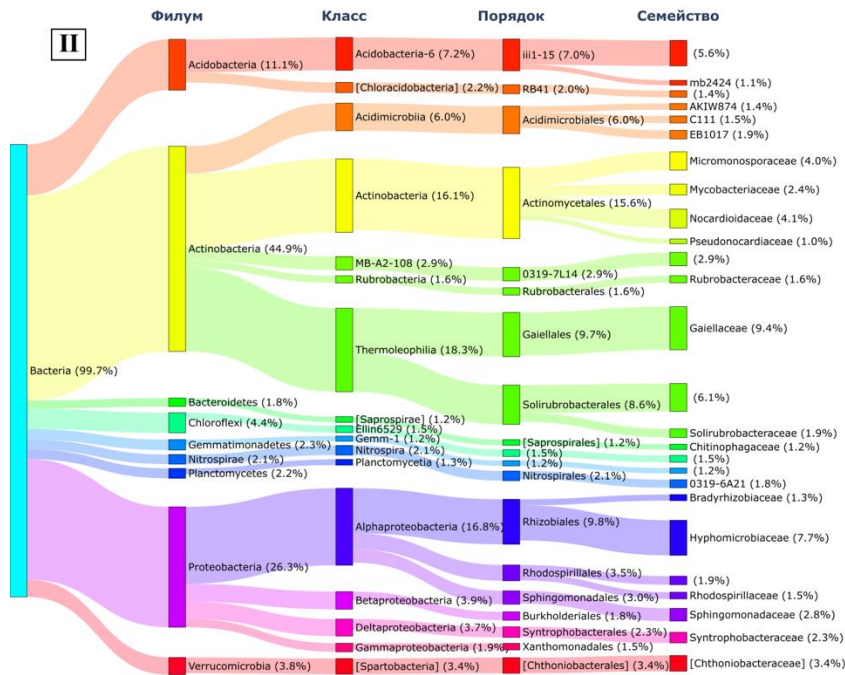


Рис.3. Содержание доминантных (более 1% от общей ДНК) таксонов в микробиоме: I – палеопочва грота Ахцу; II – современная аллювиальная фоновая почва.

Fig. 3. Content of dominant (more than 1% of total DNA) taxa in the soil microbiome of the Akhtsu Grotto.

Из-за сложностей культивирования, перечень доступных для исследования изолятов планктомицетов остается ограниченным, причем подавляющее большинство ныне охарактеризованных представителей *Planctomycetes* принадлежат к классу *Planctomycetia*, который включает порядки *Planctomycetales*, *Gemmatales*, *Isosphaerales* и *Pirellulales* (Dedysh et al., 2020). Все перечисленные порядки определены в микробиоме палеопочвы грота и фона. Класс *Phycisphaerae* представлен в меньшей степени и менее изучен. Рядом исследователей была выявлена способность планктомицетов болот и торфяников к деструкции биополимеров, таких как пектин, ксилан и ламинарин (Иванова, Куличевская., 2021; Наумов и др., 2022) а также антимикробная активность пресноводного вида *Gemmata palustris* (порядок *Gemmatales*) (Белова и др., 2020), что может предполагать наличие среди данной группы микроорганизмов видов с высоким биотехнологическим потенциалом.

Среди минорных таксонов представляли интерес цианобактерии или сине-зеленые водоросли, содержание которых от тотальной ДНК палеопочвы составляло 0.6%, а в фоновых почвах на порядок ниже – 0.05%. Среди трех классов цианобактерий в составе микробиома палеопочвы в большем количестве содержались представители класса *Chloroplast* порядков *Streptophyta* и *Stramenopiles*. Цианобактерии – это морские, пресноводные и почвенные виды, участники симбиозов (например, в лишайнике), они составляют значительную долю океанического фитопланктона, способны к формированию толстых бактериальных матов, а также являются главными участниками цветения воды, которое вызывает массовые заморы рыбы и отравления животных и людей. Однако существуют цианобактерии, населяющие аридные территории, это в основном род *Nostoc* (Горовцов, Герасименко, 2014), который отсутствовал в микробиоме грота.

Большое значение для науки и экологического благополучия всего человечества могут иметь представители нитчатого рода *Leptolingbya*, присутствующие в самых разных средах обитания, включая пресноводные, морские и наземные объекты, а также в экстремальных местах, таких как термальные источники. Данный род был определен и в палеопочве грота. В исследовании 2022 г.

впервые изучалось образование поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ) у *Leptolingbya sp.* NIVA-СYA 255, выделенного из египетской почвы. ПГБ – исходное вещество для производства биоразлагаемого пластика. Склонность к биоразложению при воздействии определенных активных биологических сред делает пластик на основе ПГБ потенциальной заменой полимерам на нефтехимической основе, таким как вездесущий полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) (Kettner et al., 2022).

ВЫВОДЫ

В результате исследования группового и видового состава прокариотического сообщества палеопочвы грота Ахцу, сформированной в гидроморфных условиях притеррасной части реки Мзымта в раннеголоценовый период, было определено низкое содержание нитрификаторов и аэробных целлюлозоразлагающих микроорганизмов по сравнению с современной аллювиальной фоновой почвой. По результатам секвенирования ампликонов гена 16S - рРНК установлено, что вид домена *Archaea*, филума *Euryarchaeota*, класса *Thermoplasmata*, семейства *Methanomassiliicoccaceae*, способный к метаногенезу, может являться индикатором переувлажнения, которое создаст анаэробные условия. Доминирование в составе бактериоценоза филума *Planctomycetes* (1.3% от общей ДНК) также характеризует условия формирования палеопочвы грота как гидроморфные. Использованный комплекс микробиологических методов показал хорошую эффективность при изучении истории и условий формирования древнего палеобъекта. Данные анализа подтвердили гипотезу о гидроморфном генезисе изученной палеоаллювиальной почвы в момент ее дневного формирования в начале голоцена и объяснили историю формирования геоморфологии речной долины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова С.Э., Салтыкова В.А., Дедыш С.Н. Антимикробная активность нового пресноводного планктомицета *Lacipirellula parvula* PX69T // Микробиология. 2020. Т. 89. № 5. С. 503–510. DOI: [10.31857/S0026365620050043](https://doi.org/10.31857/S0026365620050043).
2. Водяницкий Ю.Н., Плеханова И.О. Биогеохимия тяжелых металлов в

- загрязненных переувлажненных почвах (аналитический обзор) // Почвоведение. 2014. № 3. С. 273–282.
3. Горовцов А.В., Герасименко А.А. Родовой состав и численность цианобактерий в антропогенно-преобразованных почвах г. Волгодонска // Научно-методический электронный журнал “Концепт”. 2014. № 26. С. 326–330. URL: <http://e-koncept.ru/2014/64366.htm>.
4. Дёмкин В.А., Ельцов М.В., Дёмкина Т.С., Хомутова Т.Э. Палеопочвы археологических памятников степной зоны как индикаторы развития природной среды в голоцене // Вестник Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. Вып. 3. С. 966–970.
5. Дёмкина Т.С. Пространственно-временная динамика состояния микробных сообществ почв степей Волго-Донского междуречья // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26. № 1(82). С. 76–83.
6. Добровольский Г.В., Балабко П.Н., Стасюк Н.В., Быкова Е.П. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 5–13.
7. Иванова А.А., Куличевская И.С. *Gemmata palustris* sp. nov. Новый планктомицет, выделенный из низинного болота севера России // Микробиология. 2021. Т. 90. № 5. С. 564–573.
8. Кулаков С.А., Кизилов А.С., Дятлов А.С. Открытие нового памятника мезолита в Сочинском Причерноморье // Археологические открытия. 2017. Т. 2015. С. 233–234.
9. Наумов Д.Г., Куличевская И.С., Дедыш С.Н. Генетические детерминанты утилизации ксилана у планктомицета класса *Phycisphaerae*, *Humisphaera borealis* M1803 T // Микробиология. 2022. Т. 91. № 3. С. 300–311. DOI: [10.31857/S0026365622300048](https://doi.org/10.31857/S0026365622300048).
10. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 687 с.
11. Практикум по микробиологии / под ред. М.А. Егорова, Л.М. Захарчук, А.И. Нетрусова. М.: Изд-во Академия, 2005. 608 с.
12. Плеханова Л.Н. Антропогенная деградация почв речных террас Волго-Уральского региона в эпоху бронзы и ее влияние на современный почвенно-растительный покров // Аридная экосистема. 2019. Т. 25. № 3 (80). С. 187–192. DOI: [10.24411/1993-3916-2019-10065](https://doi.org/10.24411/1993-3916-2019-10065).
13. Чернов Т.И., Железова А.Д. Динамика микробных сообществ почвы в различных диапазонах времени (обзор) // Почвоведение. 2020. № 5. С. 590–600. DOI: [10.31857/S0032180X20050044](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050044).
14. Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Беспалов В.А., Гармашова Л.В. Мониторинг микробиологических параметров сезонно переувлажненных почв Каменной Степи // Научный альманах. 2015. № 4. С. 259–265.

DOI: [10.17117/na.2015.04](https://doi.org/10.17117/na.2015.04).

15. Чирак Е.Л., Першина Е.В., Дольник А.С., Крутовая О.В., Василенко Е.С., Козут Б.М., Мерзлякова Я.В., Андронов Е.Е. Таксономическая структура микробных сообществ в почвах различных типов по данным высокопроизводительного секвенирования библиотек гена 16S-rPHK // Сельскохозяйственная биология. 2013. № 3. С. 100–109. DOI: [10.15389/agrobiology.2013.3.100rus](https://doi.org/10.15389/agrobiology.2013.3.100rus).

16. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация почв России. М.: Изд-во Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 343 с.

17. Borrel G.O., Toole P.W., Harris H.M., Peyret P., Brugere J.F., Gribaldo S. Phylogenomic data support a seventh order of Methylophilic methanogens and provide insights into the evolution of Methanogenesis // Genome Biology and Evolution. 2013. Vol. 5. No. 10. P. 1769–1780. DOI: [10.1093/gbe/evt128](https://doi.org/10.1093/gbe/evt128).

18. Chernov T.I., Zhelezova A.D., Kutovaya O.V., Tkachkova A.K., Bgazhba N.A., Kurbanova F.G., Makeev A.O., Puzanova T.A., Rusakov A.V., Khokhlova O.S. Comparative analysis of the structure of buried and surface soils by analysis of microbial DNA // Microbiology. 2018. Vol. 87. No. 6. P. 833–841. DOI: [10.1134/S0026261718060073](https://doi.org/10.1134/S0026261718060073).

19. Dedys S.N., Kulichevskaya I.S., Beletsky A.V., Ivanova A.A., Rijpstra W.I.C., Sinninghe-Damsté J.S., Mardanov A.V., Ravin N.V. *Lacipirellula parvula* gen. nov., sp. nov., representing a lineage of planctomycetes widespread in low-oxygen habitats, description of the family *Lacipirellulaceae* fam. nov. and proposal of the orders *Pirellulales* ord. nov., *Gemmatales* ord. nov. and *Isosphaerales* ord. nov // Systematic and Applied Microbiology. 2020. Vol. 43. No. 1. P. 126050. DOI: [10.1016/j.syapm.2019.126050](https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.126050).

20. Elshahed M.S., Youssef N.H., Luo Q., Najar F.Z., Roe B.A., Sisk T.M., Bühring S.I., Hinrichs K., Krumholz L.R. Phylogenetic and metabolic diversity of *Planctomycetes* from anaerobic, sulfide- and sulfur-rich Zodletone Spring, Oklahoma // Applied and environmental microbiology. 2007. Vol. 73. No. 15. P. 4707–4716. DOI: [10.1128/AEM.00591-07](https://doi.org/10.1128/AEM.00591-07).

21. Frindt K., Lehdorff E., Vlaminc S., Werner K., Kehl M., Khormali F., Knief C. Evidence for signatures of ancient microbial life in paleosols // Scientific reports. 2020. Vol. 10. No. 1. DOI: [10.1038/s41598-020-73938-9](https://doi.org/10.1038/s41598-020-73938-9).

22. Hsu C.-C., Tsai H., Huang W.-S., Huang S.-T. Carbon Storage along with Soil Profile: An Example of Soil Chronosequence from the Fluvial Terraces on the Pakua Ta-bleland, Taiwan // Land. 2021. Vol. 10. No. 5. DOI: [10.3390/land10050447](https://doi.org/10.3390/land10050447).

23. Kettner A., Noll M., Griehl C. *Leptolyngbya* sp. NIVA-CYA 255, a

- promising candidate for poly (3-hydroxybutyrate) production under mixotrophic deficiency conditions // *Biomolecules*. 2022. Vol. 12. No. 4. DOI: [10.3390/biom12040504](https://doi.org/10.3390/biom12040504).
24. Kovaleva N.O., Stolpnikova E.M. Volcanic Soil Series of the Lesser Caucasus as an Archive of Early Pleistocene Paleoeological Information // *Paleontological Journal*. 2020. Vol. 8. No. 54. P. 872–881. DOI: [10.1134/S0031030120080092](https://doi.org/10.1134/S0031030120080092).
25. Kulichevskaya I.S., Pankratov T.A., Dedys S.N. Detection of representatives of the *Planctomycetes* in sphagnum peat bogs by molecular and cultivation methods // *Microbiology*. 2006. Vol. 75. No. 3. P. 389–396. DOI: [10.1134/S0026261706030155](https://doi.org/10.1134/S0026261706030155).
26. Kuznetsova A.I., Ivanova E.A., Samylina O.S., Pimenov N.V., Ivanova E.A., Kurbanova F.G., Gruzdev D.S. Prokaryotic communities in saline soils of the Lake Elton Area in a Soil Catena along the Khara River // *Microbiology*. 2020. Vol. 89. No. 6. P. 670–684. DOI: [10.1134/S0026261720060119](https://doi.org/10.1134/S0026261720060119).
27. Mack G.H., James W.C., Moger H.C. Classification of paleosols // *Geological society of America bulletin*. 1993. Vol. 105. No. 2. P. 129–136. DOI: [10.1130/0016-7606\(1993\)105<1635:COPDAR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<1635:COPDAR>2.3.CO;2).
28. Manucharova N.A., Cheptsov V.S., Belov A.A., Vorobyeva E.A., Zenova G.M., Stepanov A.L. Soil as a natural bank of microbial diversity: new approaches and relevant aspects // *Bulletin of the Russian foundation for fundamental research*. 2020. Vol. 106. No. 2. P. 88–100. DOI: [10.22204/2410-4639-2020-106-02-88-100](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-02-88-100).
29. Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A. Sartanian (MIS 2) ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation // *Quaternary International*. 2022. Vol. 632. P. 192–205. DOI: [10.1016/j.quaint.2022.05.002](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002).
30. Sollinger A., Schwab C., Weinmaier T., Loy A., Tveit A.T., Schleper C., Urich T. Phylogenetic and genomic analysis of *Methanomassiliicoccales* in wetlands and animal intestinal tracts reveals clade-specific habitat preferences // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. Vol. 92. No. 1. DOI: [10.1093/femsec/fiv149](https://doi.org/10.1093/femsec/fiv149).
31. World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps / edited by: P. Schad, C. Huyssteen, E. Michéli. World Soil Resources Reports. Rome. 2014. 203 p.
32. Zakharikhina L.V., Rogozhina E.V., Kizilov A.S. Paleosols of archaeological sites in the Sochi Black Sea coast // *Natural volatiles & essential oils journal*. 2021. Vol. 8. No. 4. P. 8004–8036. URL: <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/1668/1457>.

REFERENCES

1. Belova S.E., Saltykova V.A., Dedysh S.N., Antimikrobnaya aktivnost' novogo presnovodnogo planktomitseta *Lacipirellula parvula* PX69T (Antimicrobial activity of the new freshwater planctomycete *Lacipirellula parvula* PX69T), *Mikrobiologiya*, 2020, Vol. 89, No. 5, pp. 503–510, DOI: [10.31857/S0026365620050043](https://doi.org/10.31857/S0026365620050043).
2. Vodyanitskii Yu.N., Plekhanova I.O., Bioge okhimiya tyazhelykh metallov v zagryaznennykh pereuvlazhnennykh pochvakh (analiticheskii obzor) (Biogeochemistry of heavy metals in contaminated waterlogged soils (analytical review)), *Pochvovedenie*, 2014, No. 3, pp. 273–282.
3. Gorovtsov A.V., Gerasimenko A.A. Rodovoi sostav i chislennost' tsianobakterii v antropogenno-preobrazovannykh pochvakh g. Volgodonska (Generic composition and abundance of cyanobacteria in anthropogenically transformed soils of Volgodonsk), *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal "Kontsept"*, 2014, No. 26, pp. 326–330, URL: <http://e-koncept.ru/2014/64366.htm>.
4. Demkina T.S., Prostranstvenno-vremennaya dinamika sostoyaniya mikrobnnykh soobshchestv pochv stepei Volgo-Donskogo mezhdurech'ya (Spatiotemporal dynamics of the state of microbial communities of soils in the steppes of the Volga-Don interfluvium), *Aridnye ekosistemy*, 2020, Vol. 26, No. 1(82), pp. 76–83.
5. Dobrovol'skii G.V., Balabko P.N., Stasyuk N.V., Bykova E.P., Alluvial'nye pochvy rechnykh poim i del't i ikh zonal'nye otlichiya (Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences), *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 3(48), pp. 5–13.
6. Ivanova A.A., Kulichevskaya I.S., *Gemmata palustris* sp. nov. Novyi planktomitset, vydelennyi iz nizinnogo bolota severa Rossii, *Mikrobiologiya*, 2021, Vol. 90, No. 5, pp. 564–573.
7. Kulakov S.A., Kizilov A.S., Dyatlov A.S., Otkrytie novogo pamyatnika mezolita v Sochinskom Prichernomor'e (Mesolithic monument in the Sochi Black Sea region), *Arkheologicheskie otkrytiya*, 2017, Vol. 2015, pp. 233–234.
8. Kutovaya O.V., Tkachukhova A.K., Cheverdin Yu.I., Effects of surface flooding on biological properties of meadow-chernozems in Kamennaya steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, No. 82, pp. 56–70, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-56-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70).
9. Naumov D.G., Kulichevskaya I.S., Dedysh S.N., Geneticheskiye determinanty utilizatsii ksilana u planktomitseta klassa Phycisphaerae, *Humisphaera borealis*M1803 T (Genetic determinants of xylan utilization in a planctomycete of the Phycisphaerae class, *Humisphaera borealis*M1803 T), *Mikrobiologiya*, 2022, Vol. 91, No. 3, pp. 300–311,

DOI: [10.31857/S0026365622300048](https://doi.org/10.31857/S0026365622300048).

10. Mineev V.G. (Ed.), *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agrochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 687 p.

11. Egorov M.A., Zakharchuk L.M., Netrusov A.I. (Eds), *Praktikum po mikrobiologii* (Workshop on microbiology), Moscow: Izd-vo Akademiiya, 2005, 608 p.

12. Plekhanova L.N., Antropogennaya degradatsiya pochv rechnykh terras Volgo-Ural'skogo regiona v epokhu bronzy i ee vliyanie na sovremennyyi pochvenno-rastitel'nyi pokrov (Anthropogenic degradation of soils on river terraces in the Volga-Ural region during the Bronze Age and its impact on modern soil and vegetation cover), *Aridnaya ekosistema*, 2019, Vol. 25, No. 3 (80), pp. 187–192, DOI: [10.24411/1993-3916-2019-10065](https://doi.org/10.24411/1993-3916-2019-10065).

13. Chernov T.I., Zhelezova A.D., Dinamika mikrobnnykh soobshchestv pochvy v razlichnykh diapazonakh vremeni (obzor) (Dynamics of soil microbial communities in different time ranges (review)), *Pochvovedenie*, 2020, No. 5, pp. 590–600, DOI: [10.31857/S0032180X20050044](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050044).

14. Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Bepalov V.A., Garmashova L.V., Monitoring mikrobiologicheskikh parametrov sezonno pereuvlazhnennykh pochv Kamennoy Stepi (Monitoring of microbiological parameters of seasonally waterlogged soils of the Kamennaya Steppe), *Nauchnyy al'manakh*, 2015, No. 4, pp. 259–265, DOI: [10.17117/na.2015.04](https://doi.org/10.17117/na.2015.04).

15. Chirak E.L., Pershina E.V., Dol'nik A.S., Krutovaya O.V., Vasilenko E.S., Kogut B.M., Merzlyakova Ya.V., Andronov E.E., Taksonomicheskaya struktura mikrobnnykh soobshchestv v pochvakh razlichnykh tipov po dannym vysokoproizvoditel'nogo sekvenirovaniya bibliotek gena 16S-Rrnk (Taxonomic structure of microbial communities in soils of various types according to high-throughput sequencing of 16S-rRNA gene libraries), *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2013, No. 3, pp. 100–109, DOI: [10.15389/agrobiology.2013.3.100rus](https://doi.org/10.15389/agrobiology.2013.3.100rus).

16. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya pochv Rossii* (Classification of soils in Russia), Moscow: Izd-vo Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva RASKhN, 2008, 343 p.

17. Borrel G.O., Toole P.W., Harris H.M., Peyret P., Brugere J.F., Gribaldo S., Phylogenomic data support a seventh order of Methylophilic methanogens and provide insights into the evolution of Methanogenesis, *Genome Biology and Evolution*, 2013, Vol. 5, No. 10, pp. 1769–1780, DOI: [10.1093/gbe/evt128](https://doi.org/10.1093/gbe/evt128).

18. Chernov T.I., Zhelezova A.D., Kutovaya O.V., Tkachakhova A.K., Bgashba N.A., Kurbanova F.G., Makeev A.O., Puzanova T.A., Rusakov A.V., Khokhlova O.S., Comparative analysis of the structure of buried and surface soils by analysis of microbial DNA, *Microbiology*, 2018, Vol. 87, No. 6,

pp. 833–841, DOI: [10.1134/S0026261718060073](https://doi.org/10.1134/S0026261718060073).

19. Dedysh S.N., Kulichevskaya I.S., Beletsky A.V., Ivanova A.A., Rijpstra W.I.C., Sinninghe-Damsté J.S., Mardanov A.V., Ravin N.V., *Lacipirellula parvula* gen. nov., sp. nov., representing a lineage of planctomycetes widespread in low-oxygen habitats, description of the family Lacipirellulaceae fam. nov. and proposal of the orders Pirellulales ord. nov., Gemmatales ord. nov. and Isosphaerales ord. nov, *Systematic and Applied Microbiology*, 2020, Vol. 43, No. 1, pp. 126050, DOI: [10.1016/j.syapm.2019.126050](https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.126050).

20. Elshahed M.S., Youssef N.H., Luo Q., Najjar F.Z., Roe B.A., Sisk T.M., Böhning S.I., Hinrichs K., Krumholz L.R., Phylogenetic and metabolic diversity of Planctomycetes from anaerobic, sulfide- and sulfur-rich Zodletone Spring, Oklahoma, *Applied and environmental microbiology*, 2007, Vol. 73, No. 15, pp. 4707–4716, DOI: [10.1128/AEM.00591-07](https://doi.org/10.1128/AEM.00591-07).

21. Frindt K., Lehdorff E., Vlaminc S., Werner K., Kehl M., Khormali F., Knief C., Evidence for signatures of ancient microbial life in paleosols, *Scientific reports*, 2020, Vol. 10, No. 1, DOI: [10.1038/s41598-020-73938-9](https://doi.org/10.1038/s41598-020-73938-9).

22. Hsu C.-C., Tsai H., Huang W.-S., Huang S.-T., Carbon Storage along with Soil Profile: An Example of Soil Chronosequence from the Fluvial Terraces on the Pakua Ta-bleland, Taiwan, *Land*, 2021, Vol. 10, No. 5, DOI: [10.3390/land10050447](https://doi.org/10.3390/land10050447).

23. Kettner A., Noll M., Griehl C., *Leptolyngbya* sp. NIVA-CYA 255, a promising candidate for poly (3-hydroxybutyrate) production under mixotrophic deficiency conditions, *Biomolecules*, 2022, Vol. 12, No. 4, DOI: [10.3390/biom12040504](https://doi.org/10.3390/biom12040504).

24. Kovaleva N.O., Stolpnikova E.M., Volcanic Soil Series of the Lesser Caucasus as an Archive of Early Pleistocene Paleoeological Information, *Paleontological Journal*, 2020, Vol. 8, No. 54, pp. 872–881, DOI: [10.1134/S0031030120080092](https://doi.org/10.1134/S0031030120080092).

25. Kulichevskaya I.S., Pankratov T.A., Dedysh S.N., Detection of representatives of the Planctomycetes in sphagnum peat bogs by molecular and cultivation methods, *Microbiology*, 2006, Vol. 75, No. 3, pp. 389–396, DOI: [10.1134/S0026261706030155](https://doi.org/10.1134/S0026261706030155).

26. Kuznetsova A.I., Ivanova E.A., Samylina O.S., Pimenov N.V., Ivanova E.A., Kurbanova F.G., Gruzdev D.S., Prokaryotic communities in saline soils of the Lake Elton Area in a Soil Catena along the Khara River, *Microbiology*, 2020, Vol. 89, No. 6, pp. 670–684, DOI: [10.1134/S0026261720060119](https://doi.org/10.1134/S0026261720060119).

27. Mack G.H., James W.C., Moger H.C., Classification of paleosols, *Geological society of America bulletin*, 1993, Vol. 105, No. 2, pp. 129–136, DOI: [10.1130/0016-7606\(1993\)105<1635:COPDAR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<1635:COPDAR>2.3.CO;2).

28. Manucharova N.A., Cheptsov V.S., Belov A.A., Vorobyeva E.A., Zenova G.M., Stepanov A.L., Soil as a natural bank of microbial diversity: new approaches and relevant aspects, *Bulletin of the Russian foundation for fundamental research*, 2020, Vol. 106, No. 2, pp. 88–100, DOI: [10.22204/2410-4639-2020-106-02-88-100](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-02-88-100).
29. Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A., Sartanian (MIS 2) ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation, *Quaternary International*, 2022, Vol. 632, pp. 192–205, DOI: [10.1016/j.quaint.2022.05.002](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002).
30. Sollinger A., Schwab C., Weinmaier T., Loy A., Tveit A.T., Schleper C., Urich T., Phylogenetic and genomic analysis of Methanomassiliicoccales in wetlands and animal intestinal tracts reveals clade-specific habitat preferences, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, Vol. 92, No. 1, DOI: [10.1093/femsec/fiv149](https://doi.org/10.1093/femsec/fiv149).
31. Schad P., Huysteen C., Michéli E. (Eds), *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, Rome, 2014, 203 p.
32. Zakharikhina L.V., Rogozhina E.V., Kizilov A.S., Paleosols of archaeological sites in the Sochi Black Sea coast, *Natural volatiles & essential oils journal*, 2021, Vol. 8, No. 4, pp. 8004–8036, URL: <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/1668/1457>.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135



Ссылки для цитирования:

Хирк А.В., Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В., Петросян Р.Д. Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 107-135. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135

Cite this article as:

Khirk A.V., Khaidapova D.D., Karpova D.V., Petrosyan R.D., Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye: composition and strength of aggregates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 107-135, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135

Благодарность:

Исследования выполнены с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:

Research was conducted using the equipment obtained within the framework of the Moscow State University Development Program.

Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность

© 2024 г. А. В. Хирк^{1,2*}, Д. Д. Хайдапова¹, Д. В. Карпова¹,
Р. Д. Петросян³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,
*e-mail: khirkav@my.msu.ru.

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

³ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”, Россия,
601261, Суздаль, поселок Новый, ул. Центральная, 3.

Поступила в редакцию 06.12.2023, после доработки 25.04.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Исследован характерный для Владимирского Ополья комплекс почв: агросерая типичная глубокопахотная, агрозем языковатый и агросерая глееватая почва. Высокая контрастность свойств почв, которая обусловлена генезисом опольных ландшафтов, прослеживается в

различиях пахотных и подпахотных горизонтах агросерых почв на агрегатном и микроагрегатном уровне. Почвы обладают отличным структурным состоянием, высокими водоустойчивостью и механической прочностью агрегатов. В агрегатной структуре пахотных горизонтов обнаружены зависимости от положения в рельефе: вниз по склону уменьшается содержание агрономически ценных агрегатов, увеличивается средневзвешенный диаметр агрегатов, уменьшается водоустойчивость агрегатов и механическая прочность агрегатов при капиллярном насыщении. Однако распределение и размер микроагрегатов, а также прочность агрегатов в воздушно-сухом состоянии отражают сложный генезис ландшафта и сохраняют влияние палеорельефа с западинами и повышениями. Средневзвешенный диаметр микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополья близок к таковому в черноземах Курской области. Гранулометрический состав исследованных почв типичен для почв Владимирского Ополья и близок между собой. В соответствии с классификацией Н.А. Качинского, пахотные горизонты – среднесуглинистые крупнопылеватые, горизонты ВТ – тяжелосуглинистые крупнопылеватые. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной почвы, он имеет крупные микроагрегаты и самое большое содержание агрономически-ценных агрегатов, а также обладает высокой водоустойчивостью. Наиболее однородной по агрегатному составу является агрозем языковатый, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны и близки по содержанию микроагрегатов и агрономически ценных агрегатов. Также эта почва отличается высокой водоустойчивостью. Агросерая глееватая почва содержит меньше агрономически ценных агрегатов, а ее водопрочность неудовлетворительная.

Ключевые слова: механическая прочность агрегатов; микрорельеф; водоустойчивость; средневзвешенный диаметр агрегатов; гранулометрический состав.

Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye: composition and strength of aggregates

© 2024 A. V. Khirk^{1,2*}, D. D. Khaidapova¹, D. V. Karpova¹,
R. D. Petrosyan³

¹Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
^{*}e-mail: khirkav@my.msu.ru.

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

³*FSBSI “Upper Volga Federal Agrarian Research Center”,
3 Central Str., Noviy village 601261, Suzdal, Russian Federation.*

Received 06.12.2023, Revised 25.04.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: A complex of soils characteristic of the Vladimir Opole region was studied: agro-gray typical deep-arable soil, tongue-shaped agrozem and agro-gray gleyic soil. The high contrast of soil properties, which is due to the genesis of field landscapes, can be traced in the differences in the arable and subarable horizons of agro-gray soils at the aggregate and microaggregate levels. The soils have an excellent structural condition, high water resistance and mechanical strength of aggregates. In the aggregate structure of arable horizons, dependences on the position in the relief were found: down the slope the content of agronomically valuable aggregates decreases, the weighted average diameter of aggregates increases, the water resistance of aggregates and the mechanical strength of aggregates at capillary saturation decreases. However, the distribution and size of microaggregates, as well as the strength of aggregates in an air-dry state, reflects the complex genesis of the landscape and retains the influence of paleorelief with depressions and elevations. The weighted average diameter of microaggregates of arable horizons of the soils of the Vladimir Opole region is close to the chernozems of the Kursk region. The granulometric composition of the studied soils is typical of Vladimir Opolye soils and close to each other. In accordance with the classification of N.A. Kachinsky arable horizons are medium loamy, coarse silt, BT horizons are heavy loamy, coarse silt. The most structural is the arable horizon of agro-gray typical deep-arable soil, it has large microaggregates, it also has high water resistance and the highest content of agronomically valuable aggregates. The most homogeneous in terms of aggregate composition is tongue-shaped agrozem; the average diameter of aggregates and microaggregates in the arable and subarable horizons are equal and similar in the content of microaggregates and agronomically valuable aggregates. This soil is also highly water resistant. Agro-gray gleyic soil contains fewer agronomically valuable aggregates and its water stability is unsatisfactory.

Keywords: mechanical strength of aggregates; microrelief; water resistance; weighted average diameter of aggregates; particle size distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегатная структура почв чрезвычайно важна для обеспечения оптимальных условий для роста и развития корневых си-

стем растений, именно она противодействует механическому разрушению и эрозии почв. Оценка агрегатного состояния и ее устойчивости к водным и механическим воздействиям позволяет оптимизировать необходимые агротехнические мероприятия и прогнозировать урожайность высеваемых культур.

Почвы Владимирского Ополя имеют большую вариабельность в свойствах пахотных горизонтов. Например, они различаются по гидротермическому режиму: серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом прогреваются и остывают медленнее, чем фоновые серые лесные почвы, их температура отличается большей инерционностью и меньшим размахом годовых колебаний (Архангельская, 2008). Контрастность почвенного покрова Владимирского Ополя приводит к тому, что в агрономическом отношении комплекс серых лесных почв неоднороден. Потенциальное плодородие серых лесных почв микроповышений ниже, чем потенциальное плодородие почвы микропонижений со вторым гумусовым горизонтом (Шеин, 2017). Эти различия обусловлены генезисом всего ландшафта ополей, для которых характерен микрорельеф с регулярной сеткой из мелких блюдцеобразных понижений, диаметром от 5 до 10 м, и неясно выраженных повышений, расстояние между западинами 15–20 м. Образование этих западин характерно для всех ополей, которые были во времена оледенений перегляциальными тундрами. Сложились различные представления о причинах возникновения данного микрорельефа, но неоспоримо то, что именно он является причиной высокой контрастности почв ополей на высоком таксономическом уровне. А.Н. Тюрюканов и Т.Л. Быстрицкая назвали эти два самостоятельных, но генетически сопряженных типа почв в повышениях и понижениях микрорельефа “ополец” и “ополица” и объясняли их палеопойменными процессами (Тюрюканов, 1971.) Алифанов В.М. (Алифанов, 2010) также связывает образование темноцветного гумусового горизонта в западинах с гидроморфным этапом развития центра Русской равнины с палеокриогенезом, когда происходило мерзлотно-гидроморфное почвообразование лугово-болотного типа почв в микропонижениях. По мнению А.А. Величко, Т.Д. Морозовой и др. (Величко, 1975), второй гумусовый горизонт является реликтом западных почв и развит в понижениях

реликтового криогенного микрорельефа. Второй гумусовый горизонт имеет почти черный цвет, плотное сложение, плитчато-крупитчатую структуру, резко выраженный гуматный состав гумуса. Характерную для них языковатую нижнюю границу А.А. Величко, Т.Д. Морозова и др. объяснили процессами морозобойного растрескивания и усыхания сезонного характера во время суббореального похолодания. При этом морозобойное растрескивание второго гумусового горизонта произошло уже после формирования полигонально-блочного рельефа, так языковатость второго гумусового горизонта не связана с элементами рельефа: клиновидная форма второго гумусового горизонта встречается и на блоках, и в межблочьях, и на склонах блоков. Макеев А.Д. и Дубровина И.В. также считают второй гумусовый горизонт реликтом мерзлотно-гидроморфной стадии почвообразования позднеледниковой эпохи, а формирование палеокриогенных западных комплексов связывают с заключительными этапами лёссового осадконакопления. И, следовательно, положение второго гумусового горизонта в профиле они объясняют погребением в процессе финального осадконакопления (Макеев, 2006). Во времена атлантического оптимума голоцена, когда уже был сформирован второй гумусовый горизонт, в профиле серых лесных почв наиболее сильно проявился процесс оподзоливания. Причем интенсивность процессов оподзоливания, по данным Шеина Е.В., максимальна в почвах со вторым гумусовым горизонтом и постепенно снижается при удалении от центров занятых ими участков (Шейн, 2002). Таким образом, палеокриогенез как экологический фактор изменил направление почвообразовательного процесса на уровне типа и сформировал комплексную структуру почвенного покрова центральной России (Овчинникова, 2020).

В настоящее время на возделываемых сельскохозяйственных полях микрорельеф, благодаря которому сформировался сложный комплекс опольных почв, выровнен. Существующие различия по рельефу в содержании водопрочных агрегатов в серых лесных почвах Владимирского Ополья рассмотрены в работе И.Ю. Винокурова (Винокуров и др., 2019). Верхняя часть катены соответствует зональным серым лесным почвам, а нижняя – серым лесным полугидроморфным. Показано, что минимум содер-

жания гумуса наблюдали на водоразделе. Локальные максимумы содержания водопрочных почвенных агрегатов совпадали с максимумами величин pH_{KCl} почвы. На агрегатное состояние пахотного горизонта влияет интенсивное механическое рыхление почвы в агроэкосистемах с помощью вспашки, которое приводит к разрушению агрономически ценных агрегатов: коэффициент структурности серой лесной почвы в слое 0–30 см снижается на 10–20% по сравнению с почвой, подвергавшейся безотвальной обработке (Зинченко, 2020). Также при обработке ухудшаются условия формирования водопрочных агрегатов. Однако при ежегодном безотвальном рыхлении на глубину 6–8 см условия для формирования водопрочных агрегатов наиболее благоприятные (Зинченко, 2019). Тем не менее механические обработки могут по-разному воздействовать на почвы, входящие в комплекс. Поэтому цель данной работы состояла в исследовании особенностей агрегатной структуры агросерой почвы, сформированной на разных элементах микрорельефа. Для этого были проведены определения гранулометрического, микроагрегатного, агрегатного составов, определена водопрочность и механическая прочность агрегатов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования находятся на поле в нижней части склона к реке Каменка (ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”). На момент исследования поле находилось под чистым паром, и поверхность почвы представляла собой чередование темно-серых и светло-серых пятен 10–15 м в диаметре, что соответствует приведенным выше описаниям особенностей почвенного покрова Владимирского Ополья с чередованием почв, сформированных в микрозападинах и на микроповышениях. На поле были заложены три разреза в характерных точках (рис. 1): первый разрез находился в верхней части склона в темном пятне пашни, второй – в 50 м от него в светлом пятне пашни, и третий – в ложбине в 100 м от первого. Превышение между первым и третьим разрезами составляет 2 м. В таблице 1 представлены некоторые характеристики почв, схема строения почв показана рисунке 1.

В первом разрезе агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва имеет гумусированный горизонт мощно-

стью 42 см, который отличается очень темно-серой окраской и комковато-зернистой структурой, горизонт мягкий, структурно рыхлый. Можно предположить, что в нижней части гумусированной толщи был второй гумусовый горизонт. Кроме мощности об этом свидетельствует структура и темный цвет. Горизонт BEL (42–60 см) коричневато-охристый с белесой (светло-серой) присыпкой, призматически-плитчатой структурой в белесых языках и ореховатой между ними, уплотненный горизонт с присыпкой и кутанами по граням структурных отдельностей (ГСО). Граница горизонта BEL волнисто-языковатая. Горизонт ВТ (60–85 см) коричневато-охристый, средний суглинок, структура столбчато-ореховатая, уплотненный, сложение плотное структурное, кутаны по ГСО, кутаны коричневые, агрегаты охристые внутри.

Во втором разрезе агрозем языковатый имел гумусированный горизонт мощностью 30 см, комковато-зернисто-порошистую структуру, и горизонт уплотненный, но мягкий, с рыхлым структурным сложением. Горизонт BEL не выделялся и находился в виде языков отбеленного мягкого материала в горизонте ВТу. Горизонт ВТ (30–85 см) неоднородной окраски: на коричневато-охристом фоне серые прожилки, тяжелый суглинок, структура столбчато-мелкоореховатая (столбик делится на мелкие (квадраты) орехи), сложение плотное структурное, агрегаты твердоватые, обильные коричневые кутаны по ГСО (агрегаты внутри светло-охристые). В верхней части 30–45 см языки отбеленного мягкого материала (BEL) в виде белесой присыпки по ГСО.

В третьем разрезе, в ложбине, агросерая глееватая почва имела пахотный горизонт (0–20 см) однородной темно-серой окраски, комковато-зернистой структуры, уплотненный, мягкий, с рыхлым структурным сложением.

Горизонт BELg (20–38 см) неоднородной окраски, на темно-сером сизоватом фоне светло-охристые маленькие пятна и светло-серио-оливковые примазки-прослои (сложены легким пылеватым материалом), среднесуглинистый, структура глыбисто-ореховатая, сложение структурное.

Таблица 1. Характеристика почв

Table 1. Soil characteristics

Координаты	Положение	Название (Классификация почв России, 2004)	Горизонт	Гумус*, %	Плотность, г/см ³
56.416723, 40390007	Верх склона	постлитогенная текстурно- дифференцированная агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках	Р 0–42 см	3.57	1.29 ± 0.01
			BEL 42–60 см	0.51	1.51 ± 0.01
			BT 60–85 см	0.85	1.50 ± 0.01
56.417041, 40392407	Середина склона	постлитогенный агрозем текстурно-дифференцированный языковатый среднепахотный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках	Р 0–30 см	2.04	1.37 ± 0.02
			BTy 30–85 см	0.68	1.50 ± 0.02
56.417361, 40394844	Ложбина	постлитогенная текстурно- дифференцированная агросерая глеватая мелкопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках	Р 0–20 см	2.55	1.39 ± 0.02
			BELg 20–38 см	2.21	1.48 ± 0.01
			BTg 38–75 см	0.34	1.49 ± 0.02

Примечание. * Содержание органического вещества определялось по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91).

Note. * The content of organic matter was determined by the Tyurin method (GOST 26213-91).

Горизонт ВТ отличается неоднородной, мраморовидной окраской, на светло-рыже-охристом фоне прожилки и затеки темно-серого цвета по ходам корней и трещинам, сизоватость, структура столбчато-призмовидная, горизонт уплотненный, ближе к плотному, сложение плотное структурное, также в горизонте встречаются редкие железистые стяжения.

Таким образом описан характерный для Владимирского Ополья комплекс: почвы, сформированные в микропонижении, с мощным темноокрашенным гумусовым горизонтом и оподзоливанием, слабооподзоленные почвы, сформированные на микроповышении, и почвы ложбины с грунтовым оглеением.

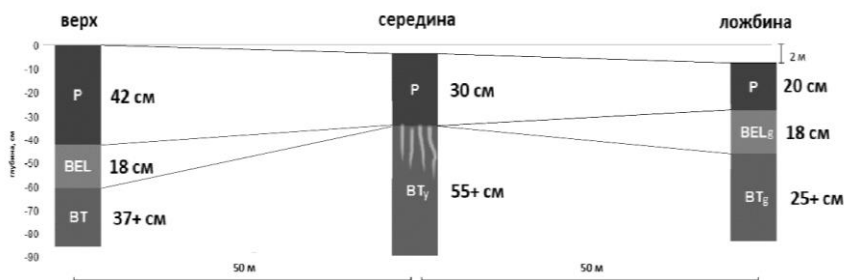


Рис. 1. Схема расположения и строения разрезов.

Fig. 1. Scheme of the soils location and structure.

Гранулометрический состав был определен двумя методами – седиментрическим методом пипетки (Полевые и лабораторные методы, 2001) и методом лазерной дифракции (ЛД) частиц на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) (Юдина и др., 2017). Для определения гранулометрического и микроагрегатного состава образцы были растерты резиновым пестиком и просеяны через сито 1 мм. Для определения гранулометрического состава пипет-методом почва была диспергирована 4%-ным раствором пирофосфата натрия. Для определения гранулометрического состава методом лазерной дифракции пробу суспендировали (20 мг почвы в 15 мл дистиллированной воды) и обрабатывали ультразвуком на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со стан-

дартным наконечником при энергии диспергации 500 Дж/мл. Для микроагрегатного анализа пробы суспендировали в дистиллированной воде и встряхивали на вортексе (Yudina et al., 2022).

Просеивание воздушно-сухих агрегатов было проведено на виброгрохоте Anallysette 3 Spartan (Фомин и др., 2019) в шести повторностях, размер одной пробы 500 г. Водопрочность определяли просеиванием в стоячей воде по методу Саввинова в трехкратной повторности. Агрегаты перед просеиванием в воде капиллярно насыщались сутки на фильтровальной бумаге.

Определение прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов проводилось на коническом пластометре П.А. Ребиндера (Хайдапова и др., 2022). Анализировалась прочность агрегатов размером 3–5 мм каждого горизонта. Агрегаты этой фракции являются наиболее удобными для определения механической прочности среди агрономически ценных агрегатов. Агрегаты исследовались в воздушно-сухом и капиллярно-насыщенном состоянии. Для капиллярного насыщения агрегаты увлажнялись на фильтровальной бумаге в течение восьми часов. Анализ проводился в десятикратной повторности. После разрушения определялась влажность агрегатов термостатно-весовым методом. Предельное напряжение сдвига $P_m \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right)$ рассчитывается по формуле (1), где K_α – коэффициент площади соприкосновения конуса с агрегатом, для воздушно-сухих – 4.4, для насыщенных – 1.108, F (кг) – нагрузка на конус, h (см) – глубина погружения конуса, в данном случае средний диаметр агрегатов:

$$P_m = K_\alpha \frac{F}{h^2}. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав исследованных почв методом седиментометрии (рис. 2.) типичен для почв Владимирского Ополья. Содержание крупной пыли составляет более 40%, средней пыли – 10–20%, илистой фракции – от 10 до 30%. Полученные результаты близки к данным, опубликованным в работе В.В. Окоркова (Окорков, 2010). В соответствии с классификацией

Н.А. Качинского пахотные горизонты среднесуглинистые крупно-пылеватые, горизонты ВТ тяжелосуглинистые крупнопылеватые. Горизонт BELg агросерой глееватой почвы среднесуглинистый, а BELg агросерой типичной глубокопахотной – тяжелосуглинистый. Во всех трех почвах количество физической глины увеличивается вниз по профилю, а содержание ила в горизонтах ВТ примерно в два-три раза выше, чем в горизонтах Р и BEL.

Дифференциальное распределение элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) и микроагрегатов представлено на рисунке 3, на котором видно, что кроме крупной пыли, наблюдается высокое содержание мелкой пыли.

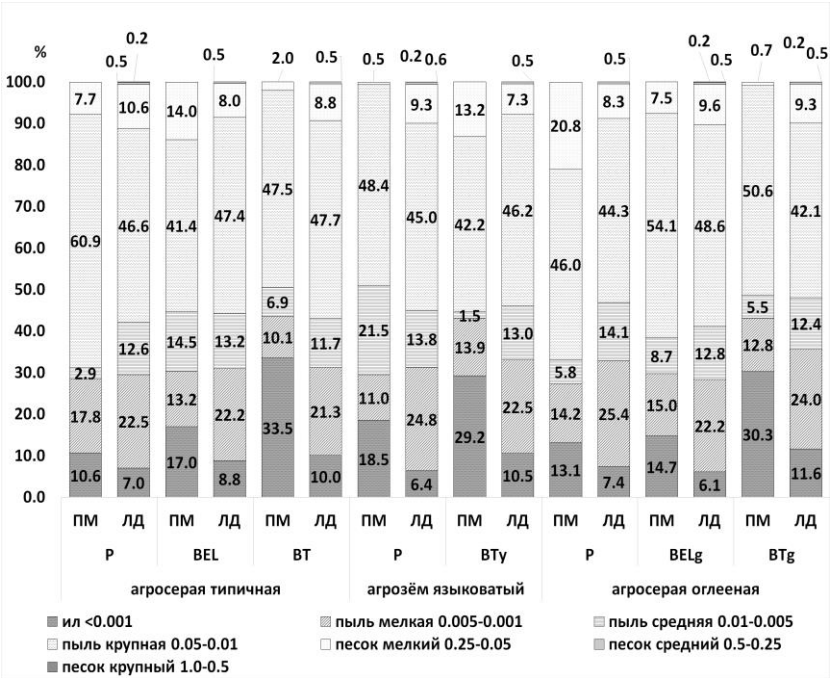


Рис. 2. Гранулометрический состав; ПМ – метод седиментометрии, ЛД – метод лазерной дифракции.

Fig. 2. Particle size distribution studied by sedimentometry and laser diffraction methods.

Содержание физической глины при определении ЛД больше, чем в седиментрическом анализе, а содержание илистой фракции – меньше. Это различие определяется особенностями методов. Легкие органические частицы медленно оседают и при определении пипет-методом попадают в категорию ила, однако при определении лазерным дифрактометром органические частицы оказываются крупнее и определяются во фракциях пыли. Поэтому при поиске зависимостей прочности агрегатов от свойств использовались данные пипет-метода. Подобные результаты при использовании классификации Н.А. Качинского к результатам ЛД были показаны в работе ряда авторов (Юдина и др., 2020). При определении методом ЛД гранулометрический состав исследованных почв получился однородным, без существенных различий по горизонтам, в отличие от результатов, полученных методом седиментометрии.

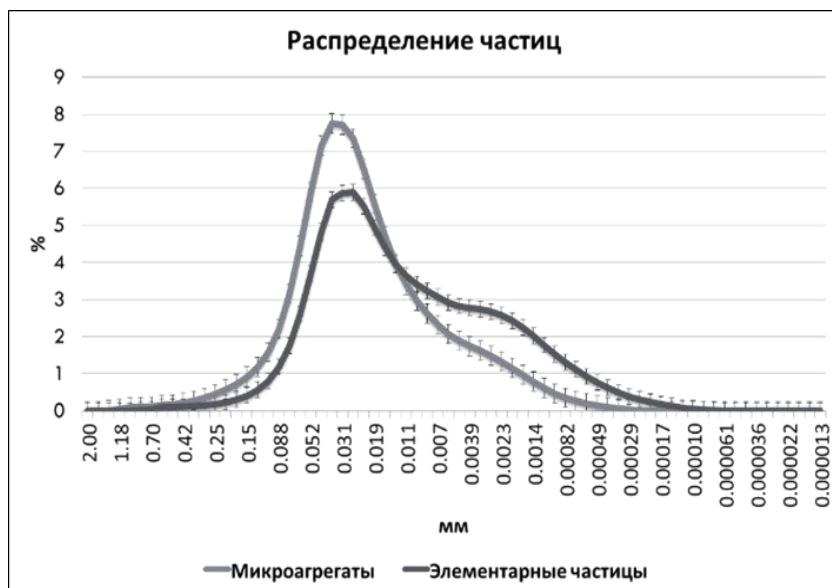


Рис. 3. Дифференциальное распределение ЭПЧ и микроагрегатов.

Fig. 3. Differential distribution of elementary soil particles and microaggregates.

В таблице 2 показаны средневзвешенные диаметры микроагрегатов (СВД), их процентное содержание и коэффициент дисперсности. Средневзвешенный диаметр микроагрегатов составляет от 170.9 до 244.0 мкм. Содержание микроагрегатов в пахотных горизонтах выше, чем в подпахотных. Наиболее крупные микроагрегаты отмечены в пахотном горизонте агросерой типичной глубокопахотной почвы. По содержанию микроагрегатов наиболее контрастной является почва в ложбине. В горизонте BELg микроагрегаты имеют максимальный СВД, но их содержание минимально. Был вычислен коэффициент дисперсности (Кд): отношение частиц <0.001 мм при гранулометрическом анализе к частицам <0.001 мм при микроагрегатном анализе в процентах. Наиболее дисперсным является горизонт Р агрозема, а горизонт Р агросерой глееватой почвы, наоборот, высоко оструктуренный, горизонты BEL и BT хорошо оструктурены.

Таблица 2. Характеристика микроагрегатного состава
Table 2. Characteristics of the microaggregate composition

Почва	Агросерая типичная глубокопахотная			Агрозем языкова- тый		Агросерая глеваятая мелкопахотная		
	Р	BEL	BT	Р	BTy	Р	BELg	BTg
СВД, мкм	201	196	214	190	171	183	244	189
Содержа- ние	20%	19%	20%	21%	22%	23%	18%	20%
Кд	18%	23%	22%	32%	19%	12%	15%	21%

Сравнение с почвами пахотных горизонтов зонального ряда в Европейской России показало, что СВД микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополя в два раза выше, чем у серых лесных почв Тульской области (СВД = 67–101 мкм). СВД

микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополя близки к черноземам Курской области (90–250 мкм). Содержание микроагрегатов в исследованных пахотных горизонтах почв составляет около 20%, что немного ниже, чем в пахотных серых лесных почвах Тульской области (25%), и значительно ниже, чем в пахотных горизонтах черноземов, где содержание микроагрегатов составляет примерно 50% (Филиппова и др., 2019).

Результаты определения агрегатного состава и водостойчивости агрегатов представлены в таблице 3. В качестве показателей использованы: содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА), т.е. сумма содержаний фракций от 0.25 мм до 10 мм; коэффициент структурности ($K_{стр.}$), т.е. отношение АЦА к сумме фракций >10 мм и <0.25 мм и коэффициент водопрочности ($K_{в-пр.}$), т.е. сумма содержания фракций >0.25 мм. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной ($K_{стр.} = 7.2$), также он обладает высокой водостойчивостью и имеет самое большое содержание агрономически ценных агрегатов. Пахотный горизонт агрозема языковатого имеет меньшую оструктуренность. Но при этом интересно, что горизонт ВТу агрозема имеет самую отличную водопрочную структуру. Почва агросерая глееватая содержит меньше агрономически ценных агрегатов и водопрочность ее не удовлетворительная.

Пахотный горизонт почвы агросерой типичной глубокопахотной имеет наименьший СВД агрегатов (таблица 4), однако он имеет самое высокое содержание АЦА и высокое содержание водостойчивых агрегатов. У агросерой глееватой СВД агрегатов пахотного горизонта значительно больше (6.1 мм против 4.8 и 3.3 мм), также содержание АЦА ниже на 10%, чем у других пахотных горизонтов. Агросерая глееватая почва содержит меньше 50% водостойчивых агрегатов и диаметр их меньше, чем у других почв. Выявлена взаимосвязь между средневзвешенным диаметром и содержанием АЦА и водостойчивых агрегатов (-0.9), чем крупнее агрегаты, тем меньше процент АЦА и водостойчивых агрегатов, что характерно для агросерой глееватой почвы ложбины.

Таблица 3. Агрегатный состав и водоустойчивость
Таблица 3. Aggregate composition and water resistance

Горизонт		Агрегаты	Размер (мм)									Содер- дер- жание АЦА	K _{стр}	K _{в-пр}
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25			
агросерая типичная глубокопахотная	Р	естественные	0.05	0.07	0.10	0.14	0.13	0.20	0.16	0.09	0.07	90%	7.2	55%
		водоустойчивые			—	—	—	—	—	—	—			
	ВЕР	естественные	0.24	0.15	0.05	0.09	0.11	0.16	0.09	0.09	0.41	67%	2.3	60%
		водоустойчивые			0.37	0.16	0.11	0.12	0.05	0.03	0.15			
	ВТ	естественные	0.28	0.19	0.17	0.14	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01	71%	2.4	24%
		водоустойчивые			0.45	0.16	0.09	0.07	0.03	0.03	0.17			
агрозем эзл- коватый	Р	естественные	0.15	0.11	0.12	0.14	0.12	0.15	0.12	0.05	0.05	80%	4.0	49%
		водоустойчивые			—	—	—	—	—	—	—			
	ВТу	естественные	0.06	0.13	0.12	0.15	0.12	0.17	0.10	0.06	0.29	91%	10.8	62%
		водоустойчивые			0.40	0.25	0.10	0.10	0.05	0.04	0.07			

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт		Агрегаты	Размер (мм)									Содер- дер- жание АЦА	K _{стр}	K _{в-пр}
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25			
агросерая глееватая мелкопашотная	Р	естественные	0.28	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12	0.08	0.04	0.05	67%	2.0	28%
		водоустойчивые			— 0.11	— 0.05	— 0.13	— 0.07	— 0.09	— 0.12	— 0.43			
	BEL g	естественные	0.20	0.14	0.16	0.15	0.11	0.10	0.05	0.03	0.06	74%	2.8	42%
		водоустойчивые			— 0.30	— 0.15	— 0.10	— 0.09	— 0.05	— 0.06	— 0.23			
	BTg	естественные	0.48	0.16	0.13	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02	50%	1.0	29%
		водоустойчивые			— 0.60	— 0.14	— 0.06	— 0.05	— 0.03	— 0.03	— 0.10			

Таблица 4. Таблица интегральных показателей структуры
Таблица 4. Table of integral indicators of the structure

Положение	Горизонт	Агрегаты естественного сложения		Водоустойчивые агрегаты (5-0.25 мм)		Микроагрегаты	
		СВД, мм	АЦА, %	СВД, мм	Содержание, %	СВД, мкм	Содержание, %
агросерая типичная глубокопахотная	P	3.3	90	1.0	54	200.9	20.1
	BEL	6.2	70	1.2	48	195.9	18.8
	BT	7.2	71	1.0	37	213.4	19.6
агрозем языковатый	P	4.8	81	0.9	59	189.6	20.5
	BT	4.8	92	1.5	54	170.9	21.6
агросерая глееватая мелкопахотная	P	6.1	67	0.8	46	183.2	22.6
	BELg	5.9	74	1.1	47	244.0	17.8
	BTg	8.9	50	0.8	30	188.8	19.7
Корреляции, * - достоверные значения							
агрегаты естественного сложения	СВД, мм						
	АЦА, %	-0.92*					
водоустойчивые агрегаты (5-0.25 мм)	СВД, мм	-0.34	0.60				
	Содержание, %	-0.91	0.85	0.36			
микроагрегаты	СВД, мкм	0.07	-0.10	-0.08	-0.17		
	Содержание, %	-0.22	0.20	-0.11	0.22	-0.80	

Большему содержанию АЦА, соответствует большее количество водоустойчивых агрегатов (0.85). СВД микроагрегатов отрицательно коррелирует с содержанием микроагрегатов (-0.8).

Анализ агрегатного состава методом главных компонент

Анализ агрегатного состава методом главных компонент (МГК) позволяет оценить структурное состояние не только по отдельным соотношениям (коэффициенты структурности, водопрочности), но и сравнить соотношение всех фракций агрегатов и оценить их вклад в различия между почвами и горизонтами (Холодов, 2016; Мешалкина, 2008).

Результаты анализа МГК содержания воздушно-сухих агрегатов представлены на рисунке 4, коэффициент собственного вектора – в таблице 5. Наибольший разброс наблюдается в содержании агрегатов размером >10 мм. Первая компонента описывает 62.8% варьирования агрегатного состава. Для нее значимы все фракции агрегатов кроме 7–5 и 5–3 мм, которые значимы для второй компоненты, описывающей 30.3% варьирования. Все горизонты разделились на факторной плоскости на группы пахотных, элювиальных и иллювиальных. На координатной плоскости видно, что наиболее отличный агрегатный состав у горизонта ВТ агрозема языковатого, где больше всего агрегатов размером 7–5, 5–3 мм.

Результаты анализа МГК содержания водоустойчивых агрегатов представлены на рисунке 5, в таблице 6 – коэффициент собственного вектора. Распределение водопрочных агрегатов имеет два максимума >5, агрегаты не распавшиеся, и <0.25мм – остатки распавшихся агрегатов. У второго фактора вклад 18.78% и одна значимая фракция 2–1 мм. На координатной плоскости видно, что пахотные горизонты отличаются по содержанию водопрочных агрегатов от горизонтов ВЕЛ и ВТ. В подпахотных горизонтах крупные агрегаты (>5 мм) в основном сохранились и не распались на более мелкие.

Таким образом, МГК позволил оценить различия агрегатного состава и содержания водоустойчивых агрегатов.

Таблица 5. Коэффициент собственного вектора агрегатов естественного сложения

Таблица 5. Eigenvector coefficient of natural addition aggregates

	вклад, %	>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
1	62.8%	0.8	0.9	0.4	-0.2	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.8
2	30.3%	0.6	-0.2	-0.9	-1.0	-0.6	0.0	0.2	0.2	0.2

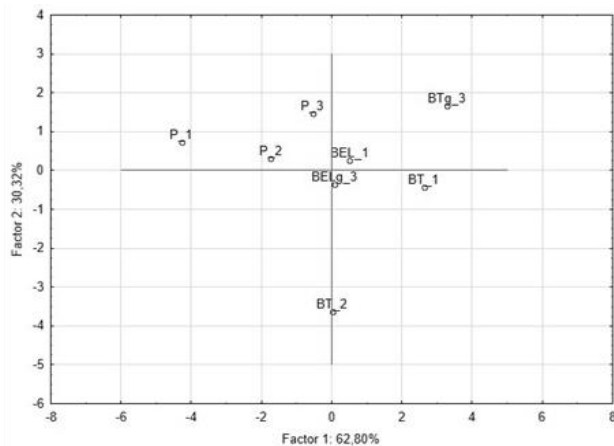
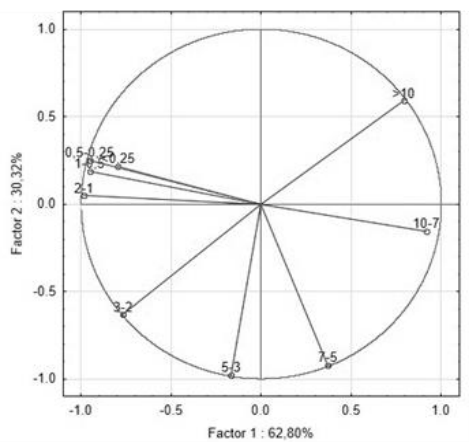


Рис. 4. Результаты анализа методом главных компонент содержания агрегатов; P_1, BEL_1, BT_1– горизонты агросерой типичной глубокопахотной, P_2, BT_2– горизонты агрозема языковатого, P_3, BELg_3, BTg_3 – горизонты агросерой глееватой мелкопахотной.

Fig. 4. Results of principal component analysis of aggregate content; P_1, BEL_1, BT_1 – top soil horizons, P_2, BT_2 – middle soil horizons, P_3, BELg_3, BTg_3 – soil horizons in the hollow.

Таблица 6. Коэффициент собственного вектора водоустойчивых агрегатов

Таблица 6. Eigenvector coefficient of water-resistant aggregates

	вклад, %	>5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
1	72.50%	1.0	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.9	-1.0
2	18.78%	0.2	-0.6	-0.3	-0.8	-0.2	0.4	0.3

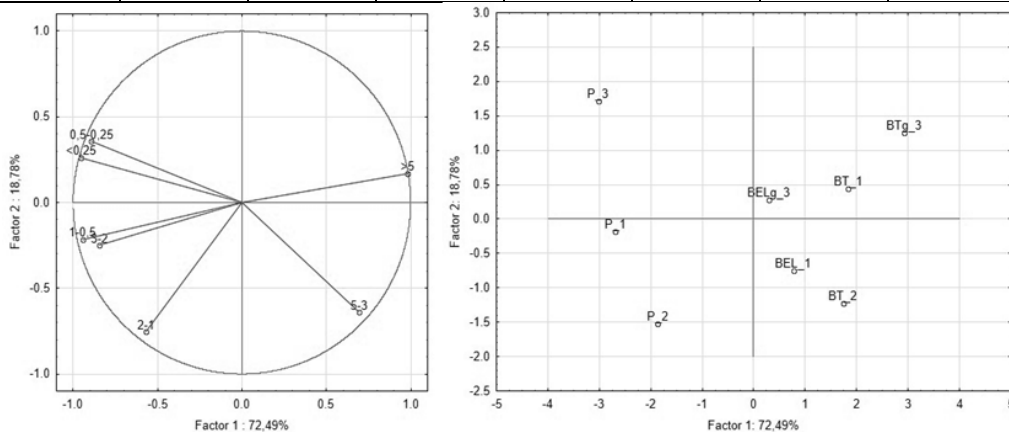


Рис. 5. Результаты анализа методом главных компонент содержания водоустойчивых агрегатов; P_1, BEL_1, BT_1– горизонты агросерой типичной глубокопахотной, P_2, BT_2– горизонты агрозема языковатого, P_3, BELg_3, BTg_3 – горизонты агросерой глееватой мелкопахотной.

Fig. 5. Results of principal component analysis of the content of water-stable aggregates; P_1, BELg_1, BTg_1 – top soil horizons, P_2, BTg_2 – middle soil horizons, P_3, BELg_3, BTg_3 – soil horizons in the hollow.

Наиболее однородной по агрегатному составу является агрозем языковатый, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны, они близки по содержанию микроагрегатов и агрономически ценных агрегатов. Также эта почва отличается высокой водоустойчивостью. Гумусированный горизонт агросерой типичной глубокопахотной отличается от агрозема меньшим диаметром агрегатов. Пахотный горизонт агросерой глееватой отличается большим количеством глыб >10 мм и мелких агрегатов <0.25 мм, а водоустойчивость агрегатов несколько ниже, чем у почв выше по склону.

Прочность почвенных агрегатов, как способность оказывать сопротивление внешнему механическому воздействию, показывает особенности межчастичного взаимодействия в агрегатах. Прочность агрегатов изменяется при увлажнении и иссушении. Рассмотрены два крайних случая: воздушно-сухие агрегаты (4–7%) и капиллярно-насыщенные (24–27%). В первом случае агрегаты являются упруго-хрупкими телами с конденсационными контактами между частицами. Между частицами капиллярно-насыщенных агрегатов находятся пленки воды, и контакты между частицами имеют коагуляционный характер. Прочность агрегатов зависит от содержания влаги, гранулометрического состава и содержания органического вещества (Хайдапова, 2007). Большое содержание мелкодисперсных фракций обеспечивает рост числа межчастичных контактов, особенно в воздушно-сухих агрегатах. Органическое вещество способствует формированию большего числа микроагрегатов, что приводит к уменьшению плотности агрегатов. В срединных горизонтах с малым содержанием органического вещества происходит непосредственное взаимодействие почвенных частиц. Это приводит к формированию агрегатов с низкой пористостью и высокой прочностью (Пестонова, 2007).

Результаты анализа прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов агросерых почв, а также их корреляции с содержанием ила, физической глины и гумуса представлены в таблице 7.

Таблица 7. Прочностные характеристики агрегатов, гранулометрический состав, содержание органического вещества и корреляции между ними

Таблица 7. Strength characteristics of aggregates, particle size distribution, content of organic matter and correlations between them

Почва	Горизонт	C _{орг} %	Гранулометрич. состав (седиментометрия)		Воздушно-сухие		Капиллярно-насыщенные	
			<0.001мм	<0.01мм	W%	Pm, кг/см ²	W%	Pm, кг/см ²
Агросерая типичная глубокопахотная	P (0–42 см)	3.57	10.60	31.34	4.71	13.48	28.09	0.45
	BEL (42–60 см)	0.51	16.99	44.66	3.75	23.93	24.37	0.31
	BT (60–85 см)	0.85	33.53	50.53	4.69	27.50	21.43	0.81
Агрозем языковатый	P (0–30 см)	2.04	18.54	18.08	3.95	24.61	27.59	0.35
	BTy (30–85 см)	0.68	29.21	44.56	7.14	29.15	24.44	0.68
Агросерая глееватая мелкопахотная	P (0–20 см)	2.55	13.06	33.14	4.17	18.40	29.41	0.28
	BELg (20–38 см)	2.21	14.72	38.37	4.00	19.11	26.89	0.60
	BTg (38–75 см)	0.34	30.34	48.71	7.14	21.86	24.51	0.52
Корреляции								
Возд.-сух.	Pm, кг/см ²	-0.80	0.78	0.38	0.33			
Кап. нас.	Pm, кг/см ²	-0.34	0.71	0.59	0.44	0.47	-0.71	

Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет разброс от 13.48 кг/см² в пахотном горизонте агросерой типичной глубокопахотной, до 29.15 кг/см² в горизонте ВТу агрозема языковатого. Прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв в соответствии с увеличением количества илистых частиц, между которыми формируются прочные конденсационные межчастичные связи при отсутствии пленок органического вещества. Чем больше содержание илистой фракции, тем прочнее агрегаты как в воздушно-сухом, так и в капиллярно-насыщенном состоянии. Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет прямую зависимость с содержанием илистой фракции (коэффициент корреляции 0.78) и обратную – с содержанием гумуса (коэффициент корреляции -0.80). Прочность горизонтов ВТ выше, чем горизонтов Р, так как в горизонтах ВТ выше содержание илистой фракции и значительно меньше гумуса.

При капиллярном насыщении значительно снижается прочность агрегатов. Значения снижаются с десятков до десятых долей килограмма на квадратный сантиметр. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов обратно зависит от влажности (-0.71). Органическое вещество аккумулирует большое количество воды, вследствие чего влажность пахотных горизонтов выше, чем у ВТ горизонтов. Пленки воды расклинивают микроагрегаты и частицы, и в результате прочность капиллярно-насыщенных агрегатов гумусированных горизонтов в два-три раза ниже, чем у нижележащих горизонтов. Меньшую прочность при капиллярном насыщении агрегатов BEL агросерой типичной, чем агрегатов горизонта Р, можно объяснить процессом оподзоливания. Однако прочность агрегатов BELg агросерой глееватой в три раза выше, чем в горизонте Р, что, вероятно, может быть обусловлено повышенным содержанием гумуса и образованием железо-органических соединений, которые увеличивают прочность агрегатов.

Таким образом, на механическую прочность агрегатов в значительной степени влияет их увлажненность. Капиллярно-насыщенные агрегаты на два порядка менее прочные, чем воздушно-сухие агрегаты. Прочность агрегатов как в сухом, так и в увлажненном состоянии зависит от содержания илистых частиц. Для сухих агрегатов важным фактором является содержание гу-

муса. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов зависит от влажности агрегатов, которая в свою очередь тоже связана с содержанием гумуса. Прочность насыщенных агрегатов пахотных горизонтов уменьшается вниз по склону.

ВЫВОДЫ

В агрегатной структуре пахотных горизонтов обнаружены зависимости от положения в рельефе: вниз по склону уменьшается содержание агрономически ценных агрегатов, увеличивается средневзвешенный диаметр агрегатов, уменьшается водоустойчивость агрегатов и механическая прочность агрегатов при капиллярном насыщении. Однако распределение и размер микроагрегатов, а также прочность агрегатов в воздушно-сухом состоянии отражает сложный генезис ландшафта и сохраняет влияние палеорельефа с западинами и повышениями.

Гранулометрический состав исследованных почв методом седиментометрии типичен для почв Владимирского Ополья. Преобладает фракция крупной пыли. Содержание физической глины при определении методом лазерной дифрактометрии больше, чем в седиментрическом анализе, а содержание илистой фракции – меньше.

СВД микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополья близки к черноземам Курской области. Содержание микроагрегатов в исследованных пахотных горизонтах почв немного ниже, чем в пахотных серых лесных почвах Тульской области, и значительно ниже, чем в пахотных горизонтах черноземов.

Почвы Владимирского Ополья обладают отличным структурным состоянием и высокими водоустойчивостью и механической прочностью агрегатов. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной почвы, также он обладает высокой водоустойчивостью и имеет самое большое содержание агрономически ценных агрегатов. Наиболее однородной по агрегатному составу почвой является агрозем, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны, эти горизонты имеют близкое содержание агрономически ценных агрегатов и микроагрегатов. Также данная почва отличается высокой водоустойчивостью. Пахотный гори-

зонт в агросерой глееватой почве содержит меньше агрономически ценных агрегатов, а его водопрочность неудовлетворительная. Механическая прочность агрегатов зависит от увлаженности. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов на два порядка ниже, чем у воздушно-сухих агрегатов. Прочность агрегатов как в сухом, так и в увлажненном состоянии зависит от содержания илистых частиц и гумуса. Прочность агрегатов горизонтов ВТ выше, чем в горизонтах Р и ВЕL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Л.А Гугалинская, Овчинникова А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС, 2010. 160 с.
2. Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского Ополя // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 80–86.
3. Величко А.А., Морозова Т.Д., Бердников В.В., Губонина З.П., Халчева Т.А., Маркова А.К. Эволюция природы в перигляциальной зоне Европы в четвертичное время // Геоморфология и палеогеография. Матлы VI съезда Географ. о-ва СССР. М.: Ин-т географии АН СССР, 1975. С. 41–44.
4. Винокуров И.Ю., Окорков В.В., Чернов О.С. Влияние рельефа на содержание гумуса, элементов питания и водопрочных агрегатов в серых лесных почвах Владимирского Ополя // Успехи современного естествознания. 2019. № 1. С. 30–38.
5. Зинченко С.И. Влияние приемов основной обработки на структуру серой лесной почвы в агроэкосистемах при возделывании озимой ржи // Владимирский земледелец. 2019. № 3. С. 4–7.
6. Зинченко С.И., Щукин И.М. Оценка антропогенного влияния на структуру почвенного покрова агроэкосистем Верхневолжья // Агрофизика. 2020. № 1. С. 16–23.
7. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. № 3. Вып. 4. С. 24–68.
8. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 84 с.
9. Овчинников А.Ю., Алифанов В.М., Худяков О.И. Влияние палеокриогенеза на формирование серых лесных почв Центральной России // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1170–1181.

10. *Окорков В.В.* Гранулометрический состав почв и его роль в устойчивости к водной эрозии // *Владимирский Земледелец*. 2010. № 3. С. 17–19.
11. *Пестонова Е.А.* Механическая прочность почвенной структуры взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 060103. М., 2007. 28 с.
12. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. *Е.В. Шеина*. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
13. Теории и методы физики почв. Коллективная монография под общей редакцией *Шеина Е.В.* и *Карпачевского Л.О.* М.: Гриф и К. 2007. 616 с.
14. *Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л.* Ополья Центральной России и их почвы. М.: Наука, 1971. 239 с.
15. *Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А.* Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // *Почвоведение*. 2019. № 3. С. 335–347. DOI: [10.1134/S0032180X19030031](https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031).
16. *Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В.* Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического рассева // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 96. С. 149–177. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177).
17. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Бутылкина М.А., Шейн Е.В., Дембовецкий А.В.* Практикум по физике твердой фазы почв. М.: “Буки Веди”, 2022. 132 с.
18. *Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А.* Прочность структурных связей в почвенных пастах и агрегатах в зависимости от влажности // *Почвоведение*. 2007. № 11. С. 1330–1335.
19. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Интерпретация данных агрегатного состава Типичных черноземов разного вида использования Методами кластерного анализа и главных компонент // *Почвоведение*. 2016. № 9. С. 1093–1100.
20. *Шейн Е.В., Кириченко А.В., Бутылкина М.А., Бугева Ю.Н.* Закономерности распределения почвенно-генетических и физических свойств комплекса серых лесных почв Владимирского ополья // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2002. № 4. С. 17–24.
21. *Шейн Е.В., Кирюшин В.И., Корчагин А.А., Мазиров М.А., Дембовецкий А.В., Ильин Л.И.* Оценка агрономической однородности и

совместимости почвенного покрова Владимирского Ополя // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1208–1215.

22. Юдина А.В., Милановский Е.Ю. Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 3–20. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-3-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-3-20).

23. Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлев Ю.А., Филиппов Н.В., Ковда И.В., Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371.

24. Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S. Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability // Geoderma. 2022. Vol. 415. P. 115–177.

REFERENCES

1. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Ovchinnikova A.Yu., *Paleokriogenez i raznoobrazie pochv tsentra Vostochno-Evropeiskoi ravniny* (Paleocryogenesis and diversity of soils in the center of the East European Plain), Moscow: GEOS, 2010, 160 p.
2. Arkhangel'skaya T.A., Prokhorov M.V., Mazirov M.A., Godovaya dinamika temperatury pakhotnykh pochv paleokriogennykh kompleksov Vladimirsogo Opol'ya (Annual temperature dynamics of arable soils of Vladimir Opolye paleocryogenic complexes), *Kriosfera Zemli*, 2008, Vol. XII, No. 3, pp. 80–86.
3. Velichko A.A., Morozova T.D., Berdnikov V.V., Gubonina Z.P., Khalcheva T.A., Markova A.K., *Evolutsiya prirody v periglyatsial'noi zone Evropy v chetvertichnoe vremya, Geomorfologiya i paleogeografiya* (Evolution of nature in the periglacial zone of Europe in the Quaternary), Matly VI S'ezda Geograf. o-va SSSR, Moscow: In-t geografii AN SSSR, 1975, pp. 41–44.
4. Vinokurov I.Yu., Okorkov V.V., Chernov O.S., Vliyanie re'efa na sodержanie gumusa, elementov pitaniya i vodoprochnykh agregatov v serykh lesnykh pochvakh Vladimirsogo Opo'ya (Relief impact on content of humus, nutrients and water stable aggregates in gray forest soils of Vladimir Opolye), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, No. 1, pp. 30–38.
5. Zinchenko S.I., Vliyanie priemov osnovnoi obrabotki na strukturu seroi lesnoi pochvy v agroekosistemakh pri vozdeleyvanii ozimoi rzhii (The influence of primary tillage techniques on the structure of gray forest soil in

agroecosystems during winter rye cultivation), *Vladimirskii zemledelets*, 2019, No. 3, pp. 4–7.

6. Zinchenko S.I., Shchukin I.M., Otsenka antropogennogo vliyaniya na strukturu pochvennogo pokrova agroekosistem Verkhnevolzh'ya (Assessment of anthropogenic impact on the structure of soil cover of upper volga region agroecosystems), *Agrofizika*, 2020, No. 1, pp. 16–23.

7. Makeev A.O., Poverkhnostnye paleopochvy lessovykh vodorazdelov Russkoi ravniny, (Surface paleosols of loess areas in the center of russian plain), *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu*, 2006, Vol. 4, No. 3, pp. 2–468.

8. Meshalkina Yu.L., Samsonova V.P., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical statistics in soil science.), Moscow: Izd-vo MGU, 200, 84 p.

9. Ovchinnikov A.Yu., Alifanov V.M., Khudyakov O.I., Vliyanie paleokriogeneza na formirovanie serykh lesnykh pochv Tsentral'noi Rossii (The impact of paleocryogenesis on the formation of gray forest soils in central Russia), *Pochvovedenie*, 2020, No. 10, pp. 1170–1181.

10. Okorkov V.V., Granulometricheskii sostav pochv i ego rol' v ustoichivosti k vodnoi erozii (Particle size distribution of soils and its role in resistance to water erosion), *Vladimirskii Zemledelets*, 2010, No. 3, pp. 17–19.

11. Pestonova E.A., *Mekhanicheskaya prochnost' pochvennoi struktury vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoistvami i osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristikoi: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Mechanical strength of soil structure relationship with physical properties and main hydrophysical characteristics, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 2007, 28 p.

12. Shein. E.V. (Ed.), *Polevye i laboratornye metody issledovaniya fizicheskikh svoistv i rezhimov pochv: Metodicheskoe rukovodstvo* (Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 200 p.

13. Shein E.V., Karpachevskii L.O. (Eds), *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and practices of soils physics), Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.

14. Tyuryukanov A.N., Bystritskaya T.L., *Opol'ya Tsentral'noi Rossii i ikh pochvy* (Opoles of central Russia and their soils), Moscow: Nauka, 1971, 239 p.

15. Filippova O.I., Kholodov V.A., Safronova N.A., Yudina A.V., Kulikova N.A., Mikroagregatnyi, granulometricheskii i agregatnyi sostav gumusovykh gorizontov zonal'nogo ryada pochv evropeiskoi rossii (Particle-Size, Microaggregate-Size, and Aggregate-Size Distributions in Humus Horizons of the Zonal Sequence of Soils in European Russia), *Pochvovedenie*, 2019, No 3, pp. 335–347, DOI: [10.1134/S1064229319030037](https://doi.org/10.1134/S1064229319030037).

16. Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Holub A.P., Yudina A.V., Dry sieving

analysis of soil by vibratory sieve shaker: modification and optimization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 96, pp. 149–177, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177).

17. Khaidapova D.D., Milanovskii E.Yu., Tyugai Z.N., Butylkina M.A., Shein E.V., Dembovetskii A.V., *Praktikum po fizike tverdoi fazy pochv* (Practical course on solid phase physics of soil), Moscow: Buki Vedi, 2022, 132 p.

18. Khaidapova D.D., Pestonova E.A., Prochnost' strukturnykh svyazei v pochvennykh pastakh i agregatakh v zavisimosti ot vlazhnosti (Strength of structural bonds in soil pastes and aggregates depending on moisture content), *Pochvovedenie*, 2007, No. 11, pp. 1330–1335.

19. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Lazarev V.I., Frid A.S., Interpretatsiya dannykh agregatnogo sostava Tipichnykh chernozemov raznogo vida ispol'zovaniya Metodami klasternogo analiza i glavnykh component (Interpretation of data on the aggregate composition of typical chernozems of different types of use using cluster analysis and principal component methods), *Pochvovedenie*, 2016, No. 9, pp. 1093–1100.

20. Shein E.V., Kirichenko A.V., Butylkina M.A., Bueva Ju.N., Zakonomernosti raspredeleniya pochvenno-geneticheskikh i fizicheskikh svoystv kompleksa seryh lesnykh pochv Vladimirskego opol'ya (Patterns of distribution of soil-genetic and physical properties of the gray forest soil complex of Vladimir Opolye), *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2002, No. 4, pp. 17–24.

21. Shein E.V., Kiryushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I., Otsenka agronomicheskoi odnorodnosti i sovmestimosti pochvennogo pokrova Vladimirskego Opol'ya (Evaluation of agronomic homogeneity and compatibility of soil cover of Vladimir Opolye), *Pochvovedenie*, 2017, No. 10, pp. 1208–1215.

22. Yudina A.V., Milanovskiy Ye.Yu., The microaggregate analysis of soils by the method of laser diffraction: the specificities of sample preparation and result interpretation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 89, pp. 3–20, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-3-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-3-20).

23. Yudina A.V., Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Churilina N.A., Aleksandrova M.S., Golovlev Yu.A., Filippov N.V., Kovda I.V., Dymov A.A., Milanovskii E.Yu., Puti sozdaniya klassifikatsii pochv po granulometricheskomu sostavu na osnove metoda lazernoi difraktsii, *Pochvovedenie*, 2020, No. 11, pp. 1353–1371.

24. Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S., Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability, *Geoderma*, 2022, Vol. 415, pp. 115–177.

УДК 631.372:528.9

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-136-163



Ссылки для цитирования:

Адылин И.П., Comparetti A., Greco C., Лапик В.П., Лапик П.В., Orlando S. Определение давления тракторов на почву и картографирование ее уплотнения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 136-163. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-136-163

Cite this article as:

Adylin I.P., Comparetti A., Greco C., Lapik V.P., Lapik P.V., Orlando S., Computing the pressure of agricultural tractors on soil and mapping its compaction, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 136-163, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-136-163

Computing the pressure of agricultural tractors on soil and mapping its compaction

© 2024 I. P. Adylin^{1*}, A. Comparetti^{2**}, C. Greco^{2***},
V. P. Lapik^{1****}, P. V. Lapik^{1*****}, S. Orlando^{2*****}

¹*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Bryansk State Agrarian University”,
2a Sovetskaya Str., 243365 Kokino village, Vygonichsky district,
Bryansk region, Russian Federation,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, e-mail: vanro1989@mail.ru,
^{****}e-mail: v.p.lapick@mail.ru,
^{*****}e-mail: pasha_lapik@mail.ru.

²*University of Palermo, Department of Agricultural,
Food and Forest Sciences,*

Build. 4 Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy,
^{**}<https://orcid.org/0000-0002-6083-5515>,
e-mail: antonio.comparetti@unipa.it,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-9799-2055>, e-mail: carlo.greco@unipa.it,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0001-9403-4735>, e-mail: santo.orlando@unipa.it.

Received 10.10.2023, Revised 31.01.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: Manufacturers of agricultural machines, when designing, pay a little attention to its impact on soil, thus producing models with high compression loads on the soil or with a small contact area between the tyres/tracks and the soil surface. Therefore, the aim of this study is to evaluate the negative impact of both wheeled and tracked agricultural tractors on the soil, in terms of soil

compaction, and its causes (i. e. design features of tractor tyres/tracks), during the last six decades (i. e. from 1961 to 2021). Soil compaction is caused by the pressure applied by agricultural machines on the soil through the contact area of their tyres/tracks with the soil surface. So, the main indicator of the negative impact on the soil by the tractors manufactured during the last 60 years, i. e. the average pressure applied by the tyres or tracks of tractors manufactured in EU and in the post-Soviet countries from 1961 to 2021 to the soil, was computed. A general decrease of the average pressure of the tyres/tracks on the soil can be observed in 1980s and 1990s, followed by its general increase since 2000, above all for the tractors having power higher than 140 kW. Thus, there is an urgent need to assess spatial and temporal changes in soil vulnerability to compaction, that depends on weather conditions and soil properties, as well as agricultural management practices, and can only be fully assessed by means of a combination of traditional techniques (i. e. use of soil cone penetrometer followed by 2D mapping using GIS or 3D mapping through geostatistics) and mechanical approaches (i. e. computation of agricultural machine parameters – soil contact area). The results show that tractor manufacturers did not take care of reducing soil compaction during the considered period.

Keywords: soil degradation; soil compaction; tractors; tyres; tracks; spatial variability.

Определение давления тракторов на почву и картографирование ее уплотнения

© 2024 г. И. П. Адылин^{1*}, А. Comparetti^{2**}, С. Greco^{2***},
В. П. Лапик^{1****}, П. В. Лапик^{1*****}, S. Orlando^{2*****}

¹ФГБОУВО «Брянский государственный аграрный университет»,
Россия, Брянская обл., Выгоничский р-н, 243365, с. Кокино,

ул. Советская 2а,

* <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, e-mail: vanro1989@mail.ru,

**** e-mail: v.p.lapick@mail.ru,

***** e-mail: pasha_lapik@mail.ru.

²Университет Палермо, факультет сельскохозяйственных, пищевых и
лесных наук, Италия

90128, Палермо, Виале Деле Сциензе, корпус 4,

** <https://orcid.org/0000-0002-6083-5515>,

e-mail: antonio.comparetti@unipa.it,

*** <https://orcid.org/0000-0002-9799-2055>, e-mail: carlo.greco@unipa.it,

***** <https://orcid.org/0000-0001-9403-4735>, e-mail: santo.orlando@unipa.it.

*Поступила в редакцию 10.10.2023, после доработки 31.01.2024,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Производители сельскохозяйственной техники при проектировании уделяют мало внимания ее воздействию на почву, поэтому выпускают модели с высокой компрессионной нагрузкой на почву или с малой площадью контакта шин/гусениц с поверхностью почвы. Поэтому целью данного исследования является оценка негативного воздействия колесных и гусеничных тракторов на почву с точки зрения ее переуплотнения и его причин (т. е. конструктивных особенностей тракторных шин/гусениц) за последние 60 лет (с 1961 по 2021 гг.). Уплотнение почвы происходит из-за давления, оказываемого сельскохозяйственными машинами на почву через пятно контакта шин/гусениц с поверхностью почвы. Для этого был проанализирован основной показатель негативного воздействия на почву тракторов, произведенных за последние 60 лет, а именно – среднее давление, оказываемое на почву шинами или гусеницами тракторов, произведенных в странах ЕС и на постсоветском пространстве с 1961 по 2021 гг. Общее снижение среднего давления шин/гусениц на почву наблюдается в 1980-х и 1990-х годах, а с 2000 г. отмечается его общее увеличение, прежде всего для тракторов мощностью более 140 кВт. Таким образом, существует острая необходимость в оценке пространственно-временных изменений уязвимости почвы к переуплотнению, которая зависит от погодных условий и свойств почвы, а также от агротехнических приемов, и может быть в полной мере оценена только с помощью комбинации традиционных методов (т. е. использования конусного пенетрометра с последующим 2D-картографированием в ГИС или 3D-картографированием с помощью геостатистики) и механических подходов (т. е. расчета параметров сельскохозяйственных машин – площади контакта с почвой). Результаты показывают, что производители тракторов не позаботились о снижении уплотнения почвы в рассматриваемый период.

Ключевые слова: деградация почвы; уплотнение почвы; тракторы; колеса; гусеницы; пространственная изменчивость.

INTRODUCTION

Setting the goals and objectives of the study

At present, the production of foodstuff, i. e. agricultural products in the sector of crop production, can be carried out in different ways:

- traditional method, implying the use of soil as a fertile layer, i. e. a carrier of nutrients for plants;
- hydroponics method, involving the use of a nutrients-water solution;
- aggregation method, involving the use of a solid substrate where the plant roots are located and a nutrients-water solution periodically enters;
- aeroponics method, involving the use of nutrients supplied to plant roots in the form of an aerosol;
- others.

Despite the modern variety of ways to grow plants, the traditional method is still the main one.

Soil fertility is a limited condition, which makes humanity to think about soil health as means to achieve food security.

One of the extremely negative impacts on the soil, affecting its fertility, is its compaction.

Thus, the purpose of this article is to analyse the negative impact of agricultural tractor tyres/tracks on the soil in the context of time, as well as to determine ways to control and reduce this impact.

In order to achieve this goal, it is necessary to carry out the following tasks:

- 1) assessment of the applicability of wheeled and tracked tractors in agricultural production;
- 2) determination of indicators of the negative impact of tractor tyres/tracks on the soil;
- 3) determination of trends in the development of mechanical engineering applied to agricultural sector, by taking into account the environmental friendliness of the manufactured machines;
- 4) proposal of a protocol for monitoring and analysing the negative impact of agricultural tractor tyres/tracks on the soil.

Pressure of agricultural machines on soil

Currently, the potential serious consequences of the impact of agricultural machines on the soil are increasingly known. As the soil is and will be the main commodity for food production, the issues of prevention, conservation and restoration of the “health” of agricultural

soils are extremely paramount. In fact, the “health” of a soil can be defined as a porosity of at least 10%, constituted by microporosity (consisting of pores having diameter lower than 8 μm , that should contain only water, under the optimal hydrological soil conditions) and macroporosity (consisting of pores having diameter higher than 8 μm , that should contain only air, under the optimal hydrological soil conditions), while soil compaction is the reduction of its porosity to values lower than 10%, mainly caused by the traffic of agricultural machines (Soane, Bonne, 1986; Lapik et al., 2012; Lapik, Adylin, 2013; Shah et al., 2017; Peregoodov, Novak, 2018). In fact, soil compaction is the decay of soil structure caused by the pressure applied to it, so that porosity and permeability decrease, while bulk density and cone penetrometer resistance increase (Comparetti et al., 2019).

About 30% of soils in Europe are at risk (or susceptible) to compaction (Panagos et al., 2012).

The index of soil compaction is soil cone penetrometer resistance or resistance to cut or strength, that is the resistance opposed by the soil to the cut of a slice of 1 dm^2 and is expressed as dN dm^{-2} or MPa. Therefore, it is the resistance to penetration in the soil by the working parts of an agricultural implement or machine and depends on the soil texture and water content: its value is lower for sandy soils and higher for clay soils, however, with reference to the optimum condition for tillage (i. e. a soil water content, expressed as percentage, slightly lower than the plastic limit, at which adhesion, external friction, cohesion and internal friction are minimum).

In order to analyse the current situation on these issues, it is needed to know the following parameters: pressure on the soil; causes of this pressure; design technical specifications of agricultural machines; pressure of agricultural machines on the soil over time; selection of tyres or tracks, aimed at minimising this pressure on the soil.

If the pressure of agricultural machines on soils is considered, together with the requirements of the various crop operations, the following negative results can be distinguished: soil compaction; disturbance of soil structure; change of the balances of soil water, air, macro- and microelements; destruction of vegetation cover and plants roots.

Studies have shown that root penetration decreases linearly with soil cone penetrometer resistance, so that the roots of most plant spe-

cies are inhibited at 1.5 MPa, while the roots of many plant species stop to grow at values higher than 2.5 MPa (Kees, 2005; Raper et al., 2005).

All the above results are associated with the excessive pressure of the tyres/tracks of agricultural machines on the soil.

In the Russian Federation, the maximum allowed pressure of the tyres/tracks of agricultural machines on the soils (having a water content equal to 90% of the field capacity) is 80 kPa, according to the regulatory document, i. e. GOST R 58655-2019 “Mobile agricultural machines. Norms for determining the impact of tyres/tracks on the soil” (GOST R 58655-2019). Instead, in other developed countries, the above threshold is 60 kPa (https://ooo-kompaniya-mir-shin.promportal.su/firm_news/395/shirokoprofilnie-shini-sverhnizkogo-davleniya-neobhodimost-dlya-otechestvennih-kolesnih-traktorov). The above difference can be explained either by different environmental policies or parameters (i. e. soil and climate ones). Moreover, some scientists reported an average pressure of agricultural machines on the soil of 15 kPa as the harmless threshold (Skuratovich, 2006). Thus, in order to achieve the ideal conditions for preventing the soil compaction caused by the traffic of agricultural machines, it is needed to highly reduce the pressure on the contact area between the tyre/track and the soil.

Technological reasons for the high pressure on the soil are incorrect methods of soil tillage and crop harvest. Thus, soil compaction highly increases with the increasing number of passes of the tyres/tracks along a trajectory (Skuratovich, 2006). In fact, the research of some scientists of Higher Institute of Agronomic Sciences “Schott-Mariem” showed, in sandy-clay soils of Tunisia, a decrease of water content by 36% and an increase of density by 70% along the tyre trajectories.

Other causes of the high pressure on the soil can be design flaws and technical specifications of agricultural machines, as well as incorrect methods of carrying out crop operations.

Therefore, the technical specifications of agricultural machines should include their operational mass. In fact, nowadays the tractor mass is higher and higher, as heavy and powerful tractors (there is a ratio mass/engine power and, therefore, weight/engine power) can de-

velop higher draft force and minimise wheel slip, as well as the working capacity and, therefore, the mass of self-propelled agricultural machines (e. g. combine and grape harvesters) is increasingly higher. The higher weight of both tractors and agricultural machines causes a higher pressure on the soil.

Wheeled and tracked agricultural machines

The comparison between wheeled and tracked agricultural machines was carried out for many years.

The wheeled tractors, compared to the tracked ones, have, as disadvantages, higher slip and, therefore, destruction of the vegetation cover, plant roots and soil structure, as well as higher pressure on the soil itself, due to the smaller contact area.

Instead, the tracked tractors are worse than the wheeled ones in row fields (e. g. potato ones), cannot move on asphalt roads (although in recent years there was a trend to use elastic support materials of the tracks) and have a lower manoeuvrability, so that they are much less spread (Lapik, 2019).

Therefore, in the description of the design technical specifications of agricultural machines, it is firstly needed to take into account their tyres or tracks.

The tractor tyres are nowadays more common rather than the tracks, because the former have a higher versatility and manoeuvrability rather than the latter, as well as they fit to a wide range of crop operations (e. g. soil tillage and transportations) and have an easier maintenance.

Instead, the tracks of agricultural machines are much more massive and less manoeuvrable rather than the wheels. The tracks are less common, because they cannot be used for carrying out crop operations in row fields. Tracked tractors are often used for soil tillage, sowing and after harvest, as they can develop a higher draft force, by comparing machines having equal weight used on soils having the same adherence coefficient (Elaoud, Chehaibi, 2011). At the same time, tracked tractors have a much higher contact area rather than wheeled ones, even if the latter are equipped with twinned or triple tyres. This allows to use tracked tractors on wet soils, e. g. rice fields with flood irrigation.

All over the world, tracked agricultural machines can be distinguished according to two features: segmentation of tracks; type of tracks.

Segmentation refers to the absence or presence of division of the track into its parts, so that it is possible to distinguish monosegmental and polysegmental tracks, respectively.

According to the type of tracks, it is possible to distinguish metal and elastic ones. Elastic tracks, in its turn, are divided into pneumatic and rubber-reinforced ones.

The classification shown in Figure 1 allows distinguishing metal, rubber-reinforced and one-piece pneumatic gas-filled tracks, as well as pneumatic and non-pneumatic ones.

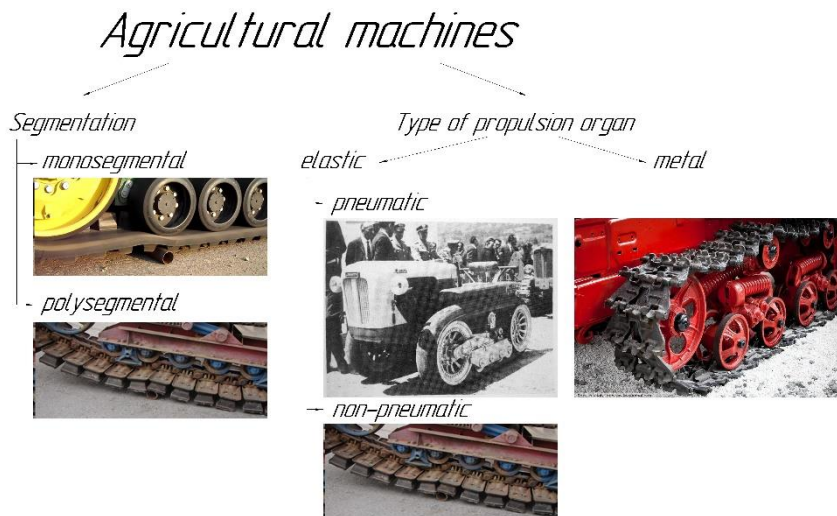


Fig. 1. Classification of tracks of tractors and agricultural machines.

Options for reducing the pressure of tyres/tracks on soil

In order to minimise the pressure on the soil, the tyres of wheeled agricultural machines are already modernised (https://ooo-kompaniya-mir-shin.promportal.su/firm_news/395/shirokoprofilnie-shini-sverhnizkogo-davleniya-neobhodimost-dlya-otchestvennih-

[kolesnih-traktorov](#)). In fact, upon further development, new tyres were manufactured, i. e. wide section and low-pressure ones, having a much higher contact area with the soil. Moreover, in some modern tractors the driver can quickly set up the inflation pressure directly from his seat. Furthermore, when the tyres are twinned or triple, both the compression effect between neighbouring wheels and the rolling resistance coefficient are lower. Figure 2 shows the different options aimed at reducing the pressure of the tyres on the soil.

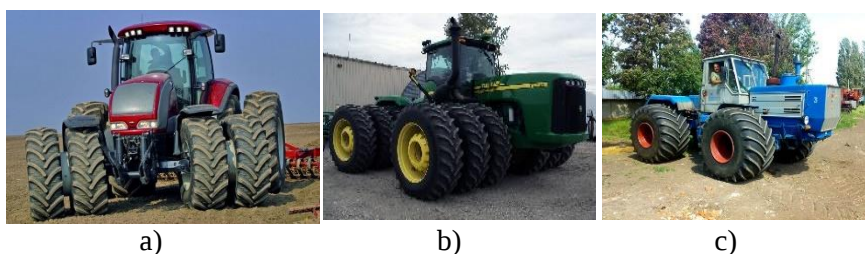


Fig. 2. Options for reducing the pressure of the tyres on the soil: **a)** twinned tyres; **b)** triple tyres; **c)** wide section and low-pressure tyres.

Another solution to reduce soil compaction is on-land ploughing (instead of in-furrow one), as its impact is shallower, it optimises the soil structure, by immediate loosening the soil, and it allows using a tracked tractor or a tractor equipped with twinned tyres or wide section and low-pressure ones.

However, these solutions increase the price of the tractor, so that only a few farmers can afford this supplementary cost.

According to the classification of the tracks of agricultural machines (Fig. 1), it is possible to notice that the use of metal tracks cannot preserve the surface (e. g. asphalt and concrete roads). Thus, it is necessary to mount elastic support devices. Lapik (Lapik, 2015) revealed that rubber-reinforced tracks (that are monosegmental and elastic, according to the above-mentioned classification) are the most applicable on arable lands characterized by optimal condition for tillage during summer (Lapik, 2015; <https://agrovesti.net/lib/tech/machinery-and-equipment/sravnenie-kolesnykh-i-gusenichnykh-traktorov.html>).

The use of such support devices on wet soils allows avoiding the situations when tractor gets stuck in the soil, but it destroys the vegetation cover along the trajectory of the tracks. Lapik revealed that tracked tractors having rubber-reinforced metal tracks can completely destroy the plant roots, so that no plant growth along the trajectory of the tracks was observed for 30 days after their pass (Lapik, 2015).

Moreover, as the not utilised agricultural area is huge in some countries, above all in the Russian Federation, the development of crop production on flood plains and soils with low bearing capacity is quite relevant (Smolsky et al., 2019; Silaev et al., 2021; Chekin et al., 2021). In order to overcome this problem, it is needed to use Rubber Cord Tracks (RCT), i. e. polysegmental elastic pneumatic tracks (Lapik, 2015; Silaev et al., 2021; Lapik, Adylin, 2011; Adylin, Lapik, 2013; Adylin, 2016) (Fig. 3), when they ensure a sufficient level of reliability.

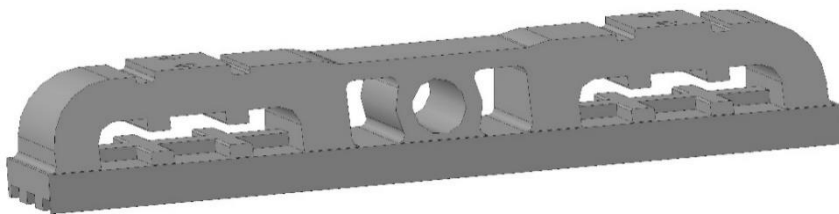


Fig. 3. Rubber Cord Tracks (RCT) for agricultural machines (Lapik, 2019).

Knowledge gaps and hypothesis on the pressure of agricultural machines on soil

Some analyses of the average pressure on the soil of the agricultural tractors manufactured both in the periods 1970–2010 and 1979–2014 were carried out, so that reports on the approach of agricultural tractor manufacturers to the issue of soil compaction were presented (Comparetti, 2019; Comparetti et al., 2010; Orlando, 2021). The analysis of the pressure on the soil of 783 wheeled tractors, manufactured from 1979 to 2014, showed the increased pressure on the soil, especially it concerns tractors having an engine power higher than 100 kW.

Therefore, manufacturers of agricultural machines pay a little at-

tention when designing, and produce models applying high loads on the soil or having a low contact area between the tyres/tracks and the soil surface.

In order to assess the negative impact of wheeled and tracked tractors on the soil and to face the problem of declining soil fertility caused by agricultural tractors, it is proposed to study soil compaction and the causes of this phenomenon over the past six decades (i. e. from 1961 to 2021). The novelty of this study also lies in the calculation of the average pressure exerted on the soil by a sample of tractors manufactured in EU, in USA and in post-Soviet states. Finally, this study aims at deducing, for the first time, a worldwide trend in the design of wheeled and tracked agricultural machines, in terms of their pressure on the soil that can cause soil compaction (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/natural-susceptibility-soil-compaction-europe>).

MATERIALS AND METHODS

Soil compaction is caused by the pressure applied by agricultural machines on the soil, through the contact area of their tyres/tracks with the soil surface.

In order to compute the above pressure, the static load on the soil through a tyre or track was retrieved from the OECD test reports.

The contact area of agricultural tyres can be measured by means of the special equipment, for example, that was built up at Palermo University, in collaboration with Milan University (Febo et al., 1997).

Thus, the main indicator of the negative impact of the wheeled and tracked agricultural tractors on the soil is the average pressure applied by their tyres or tracks on the soil. Therefore, it was possible to compute the average pressure on the soil of the wheeled and tracked agricultural tractors, including some transport vehicles and some wheeled tractors equipped with twinned wheels, manufactured in EU, in the USA and in post-Soviet states during the last six decades, i. e. from 1961 to 2021.

The most widely used criterion for computing the pressure of agricultural machines on the soil is based on the following Equations (1) and (2), which allow calculating the average pressure on the soil (GOST R 58656-2019):

$$q_w = \frac{m \cdot g}{10^3 \cdot F_w} \quad (1)$$

$$q_t = \frac{m \cdot g}{10^3 \cdot F_t} \quad (2)$$

where:

q_w – average pressure of the tyre on the soil, kPa;

q_t – average pressure of the track on the soil, kPa;

m – mass, determining a static load on the soil through a tyre or track, kg;

$g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ (gravity acceleration);

F_w – contact area of the tyre with the soil, m^2 ;

F_t – contact area of the track with the soil, m^2 .

Another commonly used criterion for computing the pressure of agricultural machines on the soil is based on the following Equations (3) and (4), allowing to calculate the maximum pressure on the soil itself (GOST R 58656-2019):

$$q_{max w} = q_w \cdot K_2 \quad (3)$$

$$q_{max t} = \xi \cdot K_4 \cdot q_t \quad (4)$$

where:

$q_{max w}$ – maximum pressure of the tyre on the soil, kPa;

q_w – average pressure of the tyre on the soil, kPa;

$K_2 = 1.5$ (coefficient of longitudinal unevenness of pressure distribution on the contact area between the tyre and the soil);

$q_{max t}$ – maximum pressure of the track on the soil, kPa;

ξ – average coefficient of unevenness of stress distribution on the contact area between the track and the soil;

K_4 – coefficient depending on the tractor weight;

q_t – average pressure of the track on the soil, kPa.

In addition to these criteria, which determine the pressure on the soil, a criterion that shows the stresses in the soil at different depths is often used: it is recommended to determine stresses in the soil at a

depth of 0.5 m, since this “has the greatest impact on the development of plants” (GOST 25954-2019). Thus, the stresses in the soil at a depth of 0.5 m for each tyre/track are determined by the following equation (5):

$$\sigma_h = 0,637 \cdot \bar{q} \cdot \left[\arctg \frac{a \cdot b}{h\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} + \frac{h \cdot a \cdot b(a^2 + b^2 + 2h^2)}{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} \right] \quad (5)$$

where:

σ_h – stresses in the soil at a depth of 0.5 m, kPa;

h – depth of the support base on which the tyre/track moves, m;

$a = 0.5$ contact area length, m;

$b = 0.5$ contact area width, m.

For a single tyre, the parameters "a" and "b" are determined by the below equations (6) and (7), respectively:

$$a = \frac{F_{\text{кп}}}{2b_k} \quad (6)$$

where:

$F_{\text{кп}}$ – reduced contact area of the tyre with the soil (according to GOST 26953), m².

$$b = \frac{b_k}{2} \quad (7)$$

where:

b_k – tyre contact footprint width (according to GOST 26953), m.

A more universal criterion for computing the pressure of a tyre/track on the soil is based on an indicator taking into account the design technical specifications of the tyre/track itself, the effect of stress accumulation on the soil and the number of passes along a trajectory, according to the following Equation (8) (Ksenevich et al., 1985):

$$U = \omega b q_{\text{max}_v} (1 + \chi \ln N), \text{ кН/м} \quad (8)$$

where:

U – pressure of a tyre/track on the soil;

ω – coefficient depending on the size and shape of the contact area between the tyre/track and the soil;

(for tyre: $\omega = 1.25$;

for track if $L/b < 7$ $\omega = (0.92 + 0.3 L/b)^{2/3}$;

for track if $L/b > 7$ $\omega = 2.15$)

where:

L – length of the contact area between the track and the soil;

b – track width;

q_{max_v} – maximum pressure of the tyre/track at a constant speed;

χ – intensity coefficient of accumulation of irreversible deformation of the soil under repeated loads;

N – number of consecutive passes of the tractor along a trajectory.

The above formulas are different options for computing the pressure of tractor tyres/tracks on the soil.

As the above pressure is the ratio between the tractor weight and its contact area with the soil, the tractor load on the front and rear axles and its contact area with the soil were retrieved from manufacturers of agricultural machines or previous analyses.

In this study, among the above equations, the formulas 1 and 2 were applied to the above data for computing the pressure of wheeled and tracked agricultural tractors, respectively, on the soil.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the analysis on both the wheeled and tracked agricultural tractors manufactured in the EU, in the USA and in post-Soviet states during the last six decades show a high variability of the average pressure applied by them on the soil.

The average pressure on the soil of agricultural tractors having different engine power during the last six decades is shown in Figure 4.

The graph shown in Figure 4 relies on a database from the Uni-

versity of Palermo and open sources, including data from agricultural tractor manufacturers; 832 tractors of various manufacturers, engine power and manufacture years, both currently commercialised and not marketed anymore, were analysed.

The above tractor manufacturers also include Massey Ferguson, John Deere, Versatile, Hesston, Kubota, Case-IH, Deutz-Allis, Agco-Allis, MTZ (Minsk Tractor Plant), New Holland, Kirovsky Zavod, Challenger, Steiger and Chelyabinsk Tractor Plant.

Of the 832 available tractors, 802 are wheeled and only 30 are tracked. Thus, there is a clear majority of wheeled tractors over tracked ones, i. e. 96.4 vs. 3.6%.

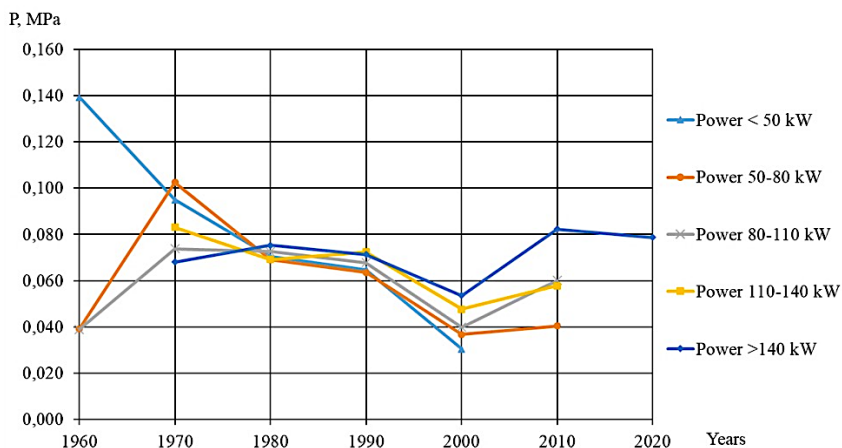


Fig. 4. Average pressure on the soil of agricultural tractors having different engine power over time.

Figure 4 shows a higher difference in the average pressure on the soil of tractors having different engine power during the decades 1960s, 1970s, 2000s and 2010s, rather than during the decades 1980s and 1990s. The significant differences between different power classes of tractors that are observed in 1960s and 1970s can be explained by the birth of agricultural machinery industry and the lack of strict legal frameworks for manufacturers.

Moreover, a general decrease of the average pressure of the tyres/tracks on the soil can be observed in 1980s and 1990s, i. e. 15.6% and 19.6, respectively, with reference to 1970s. This can be explained by the trend of manufacturers to adapt the contact area between the tyres/tracks and the soil to the loads on the two axles (front and rear), in order to obtain a similar pressure on the soil for all power classes of the agricultural tractors manufactured from 1980 to 2000. In the Russian Federation, the above decrease can be explained by strict state regulations for tractor manufacturers. In the decade 2000s, a different average pressure on the soil according to the tractor engine power can be observed. In fact, the lowest pressure is found for tractors having a power lower than 50 kW, while the maximum value is recorded for tractors having a power higher than 140 kW. Since 2000, a general increase of the average pressure of tractors on the soil occurred, i. e. 44.4% in 2010 with reference to 2000, above all for those having a power higher than 140 kW. This trend can be explained by the increased intensification of agriculture: tractors, having higher mass and, therefore, weight and power (as a consequence of the ratio mass/power and, therefore, weight/power), as well as able to develop higher draft force, were used.

According to the available data, the average pressure of wheeled tractors is 0.064 MPa, which is almost 22% higher than that of tracked tractors (0.050 MPa).

In order to assess the approach of agricultural tractor manufacturers towards the problem of pressure on the soil, causing its compaction, average data were computed for all engine power classes from 1961 to 2021 (Fig. 5).

The obtained polynomial trend line of the 5th degree having a sufficient probability (higher than 86%) shows that a decrease of the soil compaction caused by tractor pressure is not expected.

Furthermore, one model of tractor was selected for each of the periods 1980–1989 (1985), 1990–1999 (1995) and 2000–2009 (2005), in order to show, in Table 1, the different average ground pressures in the various options obtained with and without the cast iron ballast suggested by the manufacturer, with single and twinned tyres having the inflation pressure also suggested by the manufacturer.

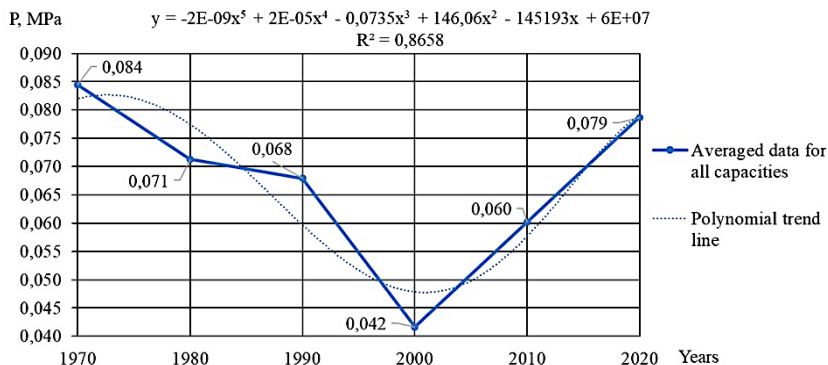


Fig. 5. Average pressure of tractors on the soil for all engine power classes from 1961 to 2021.

The results of this study suggest that the manufacturers of tractors and self-propelled agricultural machines must reverse the current trend, in order to reduce the loads on the two axles or increase the contact area, also by using tyres having wider section and lower pressure. In this way it will be possible to minimise soil compaction, that is one of the factors of soil degradation, able to reduce crop yield.

Another solution to the problem of soil compaction is Controlled Traffic Farming (CTF), implying that tractors and agricultural machines used for crop operations (e. g. sprayers) must follow the same trajectories (tramlines) (Raghavan et al., 1990, Gasso, 2013).

The efficacy of three methods for mitigating compaction damage to soil “health” was recently compared to a direct drill control. Among these methods, two improved the soil structure and mechanically reduced compaction “in situ”, while the third, that was a biological method, reduced the impact of compaction on plant growth and nutrient adsorption. Earthworm abundance, that is a key indicator of soil “health”, was significantly reduced in the mechanical mitigation treatments. This study highlighted the importance of understanding the compaction mitigation techniques, even if they differ in their efficacy and impact on soil “health” (Bussell et al., 2021).

Table 1. Average pressure exerted on the soil by three models of tractor, one for each of the periods 1980–1989 (1985), 1990–1999 (1995) and 2000–2009 (2005), in the various options obtained with and without the cast iron ballast suggested by the manufacturer, with single and twinned tyres having the inflation pressure also suggested by the one

Parameter			Manufacturer (Year)		
			HESSTON (1985)	AGCO- ALLIS (1995)	AGCO (2005)
Model			70-66DT-12 SP	9435-PPS 32 SP	DT220A
Type			MFWD	MFWD	MFWD
Power		kW	46.77	101.19	170.40
Mass without ballast		kg	3031	7118	9302
Mass with ballast		kg	3943	7975	13216
Front	Mass without ballast	kg	1132	2549	3581
Front	Mass with ballast	kg	1547	2556	5207
Front	N. tyres	per axle	2	2	2
Front	Tyre size		12.4-24	14.9-30	480/70R34
Rear	Mass without ballast	kg	1898	4569	5721
Rear	Mass with ballast	kg	2396	5420	8009
Rear	N. tyres	per axle	2	4	4
Rear	Tyre size		18.4-30	18.4-42	520/85R46
Front	Contact area without ballast	cm ²	2115	3122	5148
Front	Contact area with ballast	cm ²	2632	3128	4992
Front	Pressure without ballast	kPa	52.50	80.09	68.24
Front	Pressure with ballast	kPa	57.66	80.15	102.32
Rear	Contact area without ballast	cm ²	3198	10037	15651
Rear	Contact area with ballast	cm ²	3764	11312	22545
Rear	Pressure without ballast	kPa	58.23	44.66	35.86
Rear	Pressure with ballast	kPa	62.44	47.00	34.85
Average pressure without ballast		kPa	55.36	62.37	52.05
Average pressure with ballast		kPa	60.05	63.58	68.58

The degree of soil compaction in a field can be significantly spatially variable, depending on the intensity and distribution of the traffic

of agricultural machines and/or the action of tillage implements (Mouazen et al., 2001).

Therefore, a further solution to the above problem is the geo-referenced measurement of soil cone penetrometer resistance (index of soil compaction), according to the principles of precision agriculture, in order to produce soil compaction maps (Carrara et al., 2005; Carrara et al., 2007; Comparetti et al., 2011; Comparetti et al., 2013). Thus, in a soil compaction map it is possible to delineate different Management Zones (MZs) (Alesso et al., 2019), where different tillage methods can be planned (Mzuku et al., 2005). As another option, a soil compaction map can be logged in the on-board PC of a tractor, linked with a tillage implement, in order to perform spatially variable depth soil tillage (Adamchuk et al., 2003; Whattoff et al., 2017).

Mapping soil compaction is paramount for delineating: compacted topsoil vulnerable to erosion and surface runoff excess; areas with compacted subsoil, e. g. plough pan, susceptible to generate subsurface runoff; vulnerable areas, e. g. chalk areas, peaty areas or wetlands and areas with drains that may be broken by the passage of heavy agricultural machines (Alaoui et al., 2018).

At plot or field scale, three methods can be used for mapping soil compaction: direct measurement of soil cone penetration resistance, by means of a “static” soil cone penetrometer, driven into the ground at a constant penetration speed (Vaz et al., 2011), or a “dynamic” penetrometer, driven into the ground by repeated hammering (Beckett et al., 2018), possibly together with Electrical Conductivity (EC), geo-referenced data of which can be scaled up by using a GIS software (Fig. 7) (Carrara et al., 2003) or geostatistical approaches (Fig. 8) (Carrara et al., 2007); computation of the stress normal to the field plane, based on the total load of agricultural machine and contact area machine-soil or soil parameters and total load of agricultural machine; computation of the pre-consolidation stress, which can be determined based on the stress-strain relationship of soil obtained during laboratory compression, evaluated from pedo-transfer functions (based on information about pedological, mechanical and hydraulic conductivity obtained from available databases) (Alaoui, Diserens, 2018).

At larger scales, indirect relationships are used to predict the risk of soil compaction, based on measured values of soil cone penetrome-

ter resistance, soil water content or organic matter, combined with a cartographic Depth-To-Water index (DTW) derived from a Light Detection And Ranging (LiDAR) sensor or a Digital Elevation Model (DEM). In fact, spatial variability may be taken into account through geostatistical methods, if data are abundant and uncertainty information can be extracted from the knowledge of the statistical distribution in the case of sparse data (Alaoui, Diserens, 2018). Campbell et al. (2013) combined soil cone penetrometer resistance measurements with within-plot measured values of soil water content, density, texture, organic matter content, soil depth, elevation, slope and a cartographic DTW, by means of multiple regression analysis. By relating the soil cone penetrometer resistance values to the DEM-derived elevation, slope and DTW variables derived from a LiDAR-generated bare ground DEM, Campbell et al. (2013) produced soil cone penetrometer resistance maps.

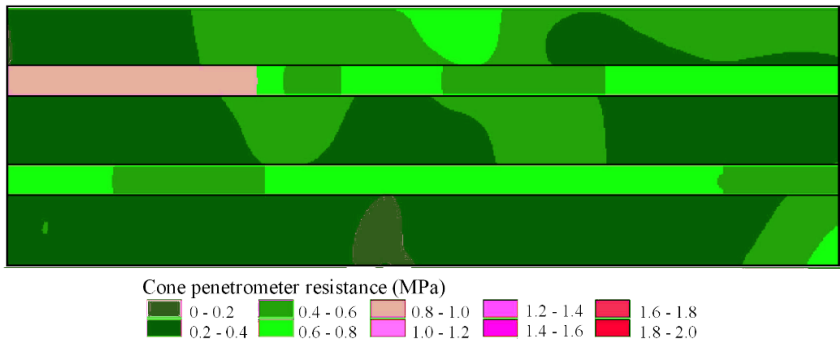


Fig. 7. 2D soil compaction map (3×15 m section parallel to the field plane) of a plot in 6–10 cm depth layer, after four passes of a tractor (the two strips are the tracks of tractor wheels).

A system for the geo-referenced measurement of soil compaction was tested during the crop season 2002–2003, in the farm of inland Sicily (Italy), located at Alia (Palermo). Three plots, that had been ploughed at 0.35 m depth and harrowed at 0.10 m depth, were selected

with sandy-silty soil (clay 8%, silt 33.7% and sand 58.3%) and water content of 4.9% (Carrara et al., 2003).

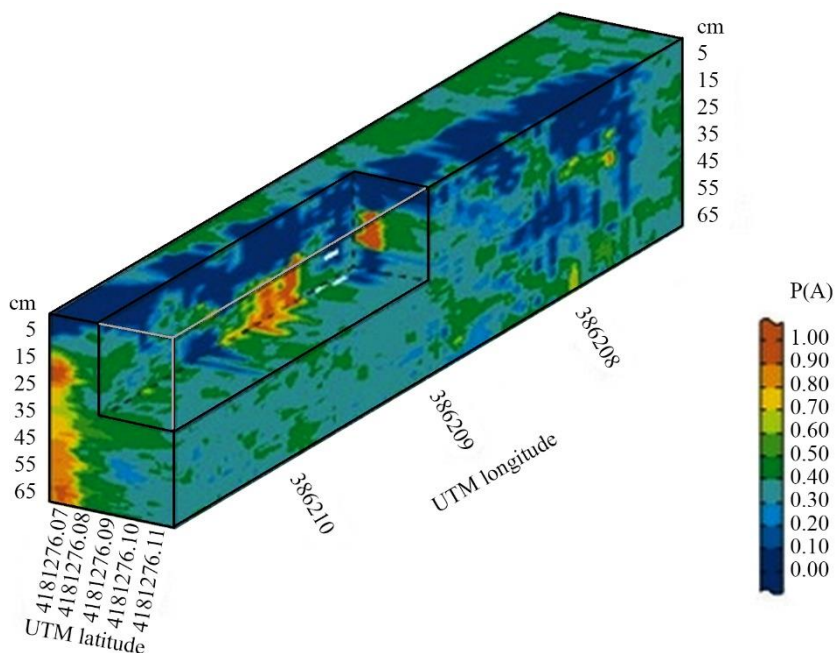


Fig. 8. 3D map showing the probability $P(A)$ of exceeding the threshold of soil cone penetrometer resistance that is critical for plant root growth (2.5 MPa), after five passes of a tractor. The probability is expressed as percentage (e. g. 1.00 = 100%), while the soil depth is expressed in cm, as well as the point positions are shown as UTM geodetic coordinates, i. e. longitude and latitude.

In July, 2003, measurement tests were carried out in a field located at Alia (Palermo, Italy), where a three-year crop rotation: durum-wheat–durum-wheat–tomato was practiced. The soil is a Vertic Xerochrept (USDA, 1998), having a sandy-silt texture (clay 8%, silt 33.7% and sand 58.3%) and a water content of 4.9%. Before the tests the soil

was ploughed at 0.35 m depth and harrowed at 0.10 m depth (Carrara M. et al., 2007).

Among the above methods, 3D mapping based on TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction) model is a new mapping methodology for helping practitioners, advisers and policy-makers to mitigate soil compaction (Alaoui, Diserens, 2018). In fact, Diserens et al. (2010) proposed a 3D map of compaction damage risk at 30 cm depth for a 4.5 ha plot. Geo-referenced wheel load data, acquired by means of a sensor-tyre (Cemagref patent n. 05-11455) by ploughing (furrow wheel) and soil cone penetrometer resistance values were recorded. Therefore, TASC model, combined with geo-referenced load data recorded during farming and soil parameters collected immediately prior to driving make this mapping method suitable for precision agriculture and land protection (Alaoui, Diserens, 2018).

Spatial distribution of land use is also often obtained using air- or space-borne Remote Sensing (RS) data, that provide regular spatially- and temporally-explicit data across large areas, when compared to field-based assessments (Hansen et al., 2013).

As subsoil compaction can persist over decades, indicating a long memory effect (above all, in the case of afforestation), the knowledge of previous land uses, that is owned by a range of stakeholders, must be taken into account for mapping areas subjected to soil damage (Alaoui, Diserens, 2018). Thus, in order to map soil compaction, RS cannot provide the dynamics of flow processes as related to land use effect on soil structure and the memory effect (Alaoui et al., 2018). For this purpose, mapping soil compaction should include information on both short- and long-term changes in the soil conditions, preferably also for different soil layers.

Thus, there is an urgent need to assess spatial and temporal changes in soil vulnerability to compaction, that depends on weather and soil conditions, as well as agricultural management practices. Soil compaction can only be fully assessed by means of a combination of traditional techniques (i. e. use of soil cone penetrometer followed by 2D mapping through GIS or 3D mapping through geostatistics) and mechanical approaches (i. e. computation of agricultural machine – soil contact area) (Alaoui, Diserens, 2018).

CONCLUSIONS

In agreement with a priori established aims, the conclusions of the work are the following:

1) wheeled tractors are more used in agricultural production, rather than tracked ones, i. e. 96 vs. 4% (according to the available data); this is justified by the higher versatility of wheeled tractors, with reference to tracked ones;

2) the most common indicator of the impact of tractor tyres/tracks on the soil is their average pressure on the soil; the average pressure of wheeled tractors resulted in 0.064 MPa, while that of tracked ones was 0.050 MPa, i. e. almost 22% lower than the former;

3) through the assessment by means of the trend line obtained from the analysis of the soil impact indicator for a high number of tractors, the environmental issue, consisting in the development of more environmentally friendly tyres/tracks for agricultural tractors, is not a priority for manufacturers, as indicated by the upward curve, after 2000, of the graph “Average pressure of tractors on the soil for all engine power classes from 1961 to 2021”;

4) it was possible to propose the automatic collection of soil compaction data by means of a soil cone penetrometer mounted on a tractor, to be performed during a crop operation (soil tillage), as the most innovative method for monitoring soil health;

5) it was possible to propose the subsequent processing of the above data, by using geostatistics software, as the most effective soil health analysis method, including planning of mitigation strategies for minimising soil compaction.

REFERENCES

1. Adamchuk V.I., Sotnikov A.V., Speichinger J.D., Kocher M.F., *Instrumentation System for Variable Depth Tillage*, ASAE Annual International Meeting, Paper Number 031078, Las Vegas, Nevada, 2003, pp. 1–10.
2. Adylin I.P., *Increasing the permeability and reducing the technogenic impact of tracked vehicles with elastic tracks by reducing the unevenness of the distribution of pressure on the soil: Cand. techn. nauk thesis*, 05.20.01, Bryansk, 2016, 150 p.
3. Adylin I.P., Lapik V.P., Application of rubber-cord tracks in caterpillar

propulsion, *Technics in agriculture*, 2013, No. 1, p. 27.

4. Adylin I.P., Lapik V.P., Kuznetsov A.E., Malashenko Yu. A., Lapik P.V., Elastic track of the vehicle track: pat. 196941 Russian Federation: IPC B62D 55/24: Patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Agrarian University”, Application No. 2019131658; declared 7.10.2019; publ. 23.3.2020, Byul. No. 9.

5. Alaoui A., Diserens E., Mapping soil compaction – A review, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, No. 5, pp. 60–66, DOI: [10.1016/j.cosh.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.cosh.2018.05.003).

6. Alaoui A., Rogger M., Peth S., Blöschl G., Does soil compaction increase floods? A review, *J Hydrol.*, 2018, No. 557, pp. 631–642, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2017.12.052](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052).

7. Alesso C.A., Masola M.J., Carrizo M.A., Cipriotti P.A., Imhoff del S., Spatial variability of short-term effect of tillage on soil penetration resistance, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, No. 65(6), pp. 822–832, DOI: [10.1080/03650340.2018.1532076](https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1532076).

8. Beckett C.T.S., Bewsher S., Guzzomi A.L., Lehane B.M., Fourie A.B., Riethmuller G., Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils, *Soil Tillage Res.*, 2018, No. 175, pp. 150–157, DOI: [10.1016/j.still.2017.09.009](https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.009).

9. Bussell J., Crotty F., Stoate C., Comparison of Compaction Alleviation Methods on Soil Health and Greenhouse Gas Emissions, *Land*, 2021, No. 10, pp. 1–10, DOI: [10.3390/land10121397](https://doi.org/10.3390/land10121397).

10. Campbell D.M.H., White B., Arp P.A., Modeling and mapping soil resistance to penetration and rutting using LiDAR-derived digital elevation data, *J Soil Conserv.*, 2013, No. 68, pp. 460–473, DOI: [10.2489/jswc.68.6.460](https://doi.org/10.2489/jswc.68.6.460).

11. Carrara M., Castrignanò A., Comparetti A., Febo P., Orlando S., *Multivariate geostatistics for assessing and predicting soil compaction*, *Proc. of the 5th European Conf. on Precision Agriculture (5ECPA)*, Sweden, Uppsala, 2005, pp. 723–730.

12. Carrara M., Comparetti A., Fabio P., Morello G., Orlando S., Mapping soil compaction measuring cone penetrometer resistance. *Vol. Precision Agriculture, 4th European Conf. on Precision Agriculture (ECPA)*, Berlin, Germany, 2003.

13. Carrara M., Castrignanò A., Comparetti A., Febo P., Orlando S., Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics, *Geoderma*, 2007, No. 142(3-4), pp. 294–307, DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.08.020](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.020).

14. Chekin G.V., Silaev A.L., Smolsky E.V., Distribution of Cu, Ni, Zn, Mn, Cr, Cd, Pb, Co, Mo, As in alluvial soils of floodplain landscapes of the Sozh

river basin, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 109, pp. 165–185, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-109-165-185](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-165-185).

15. Comparetti A., Febo P., Orlando S., Survey of the Mean Pressure Exerted by a Wide Range of Tractors on the Soil, *Work safety and risk prevention in agro-food and forest systems: Intern. Conf.*, Italy, Ragusa Ibla Campus, 2010, pp. 1–5.

16. Comparetti A., Febo P., Orlando S.A., System for the Real-Time Geo-Referenced Measurement of Soil Parameters, *Rural Development in Global Changes*, Vol. 5, Book 1, 5th International Scientific Conference “Rural Development 2011”, Akademija, Kaunas district, Lithuania, 2011, pp. 319–323.

17. Comparetti A., Febo P., Orlando S., A system for the real-time geo-referenced measurement of soil parameters, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, No. 19(6), pp. 1253–1257.

18. Comparetti A., Febo P., Greco C., Orlando S., Have tractor manufacturers bore in mind soil compaction over the last 40 years? *Proc. of the 9th Intern. Scien. Conf. Rural Development 2019: “Research and Innovation for Bioeconomy”*, Akademija, Kaunas district., Lithuania, 2019, pp. 112–118.

19. Comparison of wheeled and tracked tractors, *Agrovestnik*, URL: <https://agrovesti.net/lib/tech/machinery-and-equipment/sravnienie-kolesnykh-i-gusenichnykh-traktorov.html> (accessed on 6, October ,2023).

20. Diserens E., Chanet M., Marionneau A., *Machine weight and soil compaction: TASC V2.0.xls – a practical tool for decision-making in farming*, AgEng, Clermont-Ferrand, 2010, No. 239, pp. 10.

21. Elaoud A., Chehaibi S., Soil compaction due to tractor traffic, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2011, No. 11(5), pp. 539–545, DOI: [10.1007/s11668-011-9479-3](https://doi.org/10.1007/s11668-011-9479-3).

22. European Commission, Joint Research Centre, European Soil Data Centre (ESDAC). Natural susceptibility to soil compaction in Europe. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/natural-susceptibility-soil-compaction-europe> (accessed on 6, October, 2023).

23. Febo P., Pessina D., Pipitone F., Un impianto per la misura dell’area di contatto dei pneumatici agricoli: prime prove comparative, *An equipment for measuring the contact area of agricultural tyres: first comparative tests: VI Convegno Nazionale di Ingegneria Agraria*, Italy, Ancona, 1997.

24. Gasso V., Sørensen C.A.G., Oudshoorn F.W., Green O., Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts, *European Journal of Agronomy*, 2013, No. 48, pp. 66–73, DOI: [10.1016/j.eja.2013.02.002](https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.002).

25. GOST R 58656-2019. Mobile agricultural machinery. Methods for determining the impact of propulsion on the soil. Electronic fund of legal and normative-technical documents. 2021. National Standard of Russian

- Federation. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169433> (accessed on 6, October, 2023).
26. GOST R 58655-2019. Mobile agricultural machinery. Norms for determining the impact of propulsion on the soil. Electronic fund of legal and normative-technical documents. National Standard of the Russian Federation. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/72298/> (accessed on 6, October, 2023).
27. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov, A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 2013, No. 342, pp. 850–853, DOI: [10.1126/science.1244693](https://doi.org/10.1126/science.1244693).
28. Kees G., *Hand-held electronic cone penetrometers for measuring soil strength*, Technical Report 0524-2837-MTDC, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Missoula Technology and Development Center. Missoula, 2005.
29. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I., *Running system – soil – harvest*, Moscow: Agropromizdat, 1985, 304 p.
30. Lapik V.P., *Mechanical and technological bases of interaction of caterpillar propulsion machines with waterlogged floodplain soil: Dr. Techn. Sci. thesis*, Bryansk, 2015, 327 p.
31. Lapik V.P., Adylin I.P., Reduction of negative impact on waterlogged soils of caterpillar propulsion machines by application of rubber-cord tracks, *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 2011, No. 1, pp. 28–31.
32. Lapik V.P., Adylin I.P., Investigation of the impact of modern MTU on the soils of the Bryansk region, *Design, use and reliability of agricultural machinery*, 2013, No. 1(12), pp. 58–62.
33. Lapik V.P., Adylin I.P., Kuznetsov A.E., Malashenko Yu. A., Vladimirovich L.P., Elastic track of a vehicle caterpillar: a patent for a utility model 196941 Russian Federation, IPC B62D 55/24: Patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Agrarian University”, Application No. 2019131658 dated 7.10.2019; publ. 23.20, Byul. No. 9.
34. Lapik V.P., Frantsuzov V.S., Adylin I.P., The effect of MTU on soil compaction, *Agro-consultant*, 2012, No. 1, pp. 18–21.
35. Lapik V.P., Frantsuzov V.S., Adylin I.P., Investigation of soil compaction MTU, *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 2012, No. 1, pp. 35–37.
36. LLC Company Mir Shin. Wide-profile ultra-low pressure tires are a necessity for domestic wheeled tractors, URL: https://ooo-kompaniya-mir-shin.promportal.su/firm_news/395/shirokoprofilnie-shini-sverhnizkogo-davleniya-neobhodimost-dlya-otchestvennykh-kolesnykh-tractorov (accessed on

6, October, 2023).

37. Mouazen A.M., Ramon H., De Baerdemaeker J., *On-line detection of soil compaction distribution based on finite element modelling procedure*, *Proc. of the 3rd European Conference of Precision Agriculture* (G. Grenier, S. Blackmore, Eds.), Vol. 1, France, Agro Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001, pp. 455–460.

38. Mzuku M., Khosla R., Reich R., Inman D., Smith F., MacDonald L., *Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones*, *Soil Sci. Soil Fertility & Plant Nutrition*, 2005, No. 69, pp. 1572–1579, DOI: [10.2136/sssaj2005.0062](https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0062).

39. Orlando S., Comparetti A., Fabio P., Greco C., *The influence of tractors on soil compaction in the last four decades: Intern. Conf.*, Italy, Ragusa, 2021.

40. Panagos P., Barcelo S., Bouraoui F., Bosco C., Dewitte O., Gardi C., Erhard M., Hervas De Diego F., Hiederer R., Jeffery S., Lükewille A., Marmo L., Montanarella L., Olazabal C., Petersen J., Penizek V., Strassburger T., Toth G., Van Den Eeckhaut M., Van Liedekerke M., Verheijen F., Viestova E., *The State of Soil in Europe: A contribution of the JRC to the European Environment Agency's Environment State and: Outlook Report – SOER 2010 EUR 25186 EN*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

41. Peregoodov N.E., Novak M.A., *Practical applications analysis and economic efficiency of the method on assessment of the sealing action from the tracked mover on the soil layer*, *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, No. 7(2), 13, Special Issue, pp. 319–321, DOI: [10.14419/ijet.v7i2.13.13069](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.13069).

42. Raghavan G.S.V., Alvo P., McKyes E., *Soil compaction in agriculture: a view toward managing the problem*, *Adv. Soil Sci.*, 1990, No. 11, pp. 1–35.

43. Raper R.L., Schwab E.B., Dabney S.M., *Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the South-eastern United States*, *Soil Tillage Res.*, 2005, No. 84, pp. 7–17, DOI: [10.1016/j.still.2004.08.010](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.010).

44. Shah A.N., Tanveer M., Shahzad B., Yang G., Fahad S., Ali S., Bukhari M.A., Tung S.A., Hafeez A., Souliyanonh B., *Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview*, *Environ Sci Pollut Res.*, 2017, Vol. 24, pp. 10056–10067, DOI: [10.1007/s11356-017-8421-y](https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y).

45. Silaev A.L., Smolsky E.V., Chekin G.V., Simonov V.Yu., Novikov A., *Possibility of using technogenically polluted floodplain landscapes*, *Revista de la Universidad del Zulia*, 2021, No. 12(32), pp. 102–113.

46. Soane B.D., Bonne F.R., *The effects of tillage and traffic on soil structure*, *Soil Tillage Res.*, 1986, No. 8, pp. 303–306.

47. Skuratovich A., *TRIZ-pros: Effective solutions in agriculture, Don't push the guys! Don't push!* Moscow, 2006, pp. 87–101.

48. Smolsky E.V., Silaev A.L., Dyachenko V.V., Nechaev M.M., Mameeva V.E., Green forage in radioactive flood meadows, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, The proceedings of the conference AgroCON-2019, article ID 012083.
49. Vaz C.M.P., Manieri J.M., de Maria I.C., Tuller M., Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content, *Geoderma*, 2011, No. 166, pp. 92–101, DOI: [10.1016/j.geoderma.2011.07.016](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016).
50. Whattoff D., Mouazen A., Wayne T., A multi sensor data fusion approach for creating variable depth tillage zones, *Advances in Animal Biosciences*, 2017, No. 8(2), pp. 461–465, DOI: [10.1017/S2040470017000413](https://doi.org/10.1017/S2040470017000413).

УДК 631.45

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184



Ссылки для цитирования:

Тагивердиев С.С., Плахов Г.А., Сальник Н.В., Безуглова О.С., Горбов С.Н. Закономерности распределения цинка, меди и свинца в различных размерных фракциях агрегатов городских почв Ростова-на-Дону // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 164-184. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184

Cite this article as:

Tagiverdiev S.S., Plakhov G.A., Salnik N.V., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Regularity of zinc, copper, and lead distribution in different size fractions of Rostov-on-Don urban soil aggregates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 164-184, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента для молодых ученых-кандидатов наук МК-3257.2022.1.4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008.

Acknowledgments:

The research was carried out with the financial support of the Presidential Grant for Young PhD Scientists MK-3257.2022.1.4.

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment in scientific activity No. FENW-2023-0008.

Закономерности распределения цинка, меди и свинца в различных размерных фракциях агрегатов городских почв Ростова-на-Дону

© 2024 г. С. С. Тагивердиев^{*}, Г. А. Плахов, Н. В. Сальник^{**},
О. С. Безуглова^{***}, С. Н. Горбов^{****}

*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского
Южного федерального университета, Россия,
344090, Ростов-на-Дону, пр-кт Стачки, 194/1,*

^{}<https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>, e-mail: 2s-t@mail.ru,*

*^{***}<https://orcid.org/0000-0001-7840-365X>,*

***<https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>,
****<https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>.

*Поступила в редакцию 05.10.2023, после доработки 20.10.2023,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Статья посвящена исследованию содержания цинка, меди и свинца в почвах Ростова-на-Дону. Пробы почв были отобраны из полнопрофильных разрезов, расположенных в разных районах города и пригородов Ростова-на-Дону. Группа антропогенно-измененных почв включала урбостратоземы и реплантоземы (Urbic Technosol), а также урбистратифицированные черноземы (Calcic Chernozems (Technic)). Естественные почвы рекреационных территорий представлены черноземами миграционно-сегрегационными (Calcic Chernozems). Содержание металлов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (1 н вытяжка азотной кислоты) и рентгенофлуоресцентного анализа. Для выделения размерных фракций (<0.25; 1–2; 3–5; 5–7; >10 мм) структуры почв применяли метод Саввинова (сухое просеивание). Изучение взаимосвязей проводили с помощью критерия Вилкоксона для связанных выборок. Цель работы – оценить содержание тяжелых металлов в разных размерных фракциях агрегатов и способность структурных фракций к аккумуляции цинка, меди и свинца. Структурные агрегаты различной размерности различаются по способности к накоплению цинка, меди и свинца. Цинк, включая его подвижные соединения, преимущественно накапливается в микроагрегатах. Содержание валовой меди и особенно свинца приурочено к более крупным агрегатам. В то же время подвижные соединения меди концентрируются в микроагрегатах и во фракции размерностью более 10 мм. Подвижные соединения свинца распределяются по фракциям разной размерности довольно равномерно во всех изученных почвах.

Ключевые слова: тяжелые металлы; почвенные агрегаты; урбостратоземы; черноземы; городские почвы; антропогенное загрязнение.

Regularity of zinc, copper, and lead distribution in different size fractions of Rostov-on-Don urban soil aggregates

© 2024 S. S. Tagiverdiev*, G. A. Plakhov, N. V. Salnik**,
O. S. Bezuglova***, S. N. Gorbov****

Academy of Biology and Biotechnology
D.I. Ivanovsky Southern Federal University,
194/1 Stachki Avenue, Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>, e-mail: 2s-t@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7840-365X>,
<https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>,
<https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>.

Received 05.10.2023, Revised 20.10.2023, Accepted 21.08.2024

Abstract: The article is devoted to the study of zinc, copper, and lead content in the soils of Rostov-on-Don. Soil samples were collected from full-profile sections located in different districts of the city and suburbs of Rostov-on-Don. The group of anthropogenically disturbed soils included Urbic Technosol urbanstratozems and replantozems, as well as urbanized chernozems Calcic Chernozems (Technic). Natural soils of recreational areas are represented by migration-segregation chernozems Calcic Chernozems (Pachic). The study was carried out using atomic absorption spectrometry and X-ray fluorescence analysis to determine metal content. Soil structure was determined by the Savvinov method (dry sieving) (<0.25; 1–2; 3–5; 5–7; >10 mm). Statistical analysis of the Wilcoxon criterion for related samples was performed to identify relationships. The main objective of the study was to assess the heavy metal content in different size fractions of aggregates and the ability of structural fractions to accumulate zinc, copper, and lead. Structural aggregates of different sizes differ in their ability to accumulate zinc, copper and lead. Zinc, including its mobile compounds, is predominantly accumulated in microaggregates. The content of gross copper and especially lead is confined to larger aggregates. At the same time, mobile copper compounds are concentrated in microaggregates and in fractions larger than 10 mm. Mobile lead compounds are distributed in fractions of different sizes quite uniformly in all studied soils.

Keywords: heavy metals; soil aggregates; urban stratozems; chernozems; urban soils; anthropogenic pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Стабильность городской среды опосредованно связана с устойчивостью почвенного покрова, который выполняет ряд экологических функций, обеспечивая рост и развитие зеленых насаждений, сорбируя соединения различных поллютантов, препятствуя таким образом загрязнению сопредельных сред, а также поддерживает условия для микробиологической активности и жизнедея-

тельности почвенных животных (Hong et al., 2022). А так как города исторически в основном являются центрами производственной деятельности, в почвенный покров вместе с побочными продуктами антропогенной деятельности проникают поллютанты различного генезиса. Такие элементы, как Zn, Pb, Cu, находясь в первом классе экологической опасности, являются наиболее распространенными компонентами-маркерами антропогенного воздействия (Горбов, Безуглова, 2020). Таким образом, изучение закономерностей изменения содержания и профильного перемещения цинка, свинца и меди дает возможность отслеживать изменения экологического состояния городских почв, а также оценивать степень антропогенной трансформации естественных почв (Горбов и др., 2015; Безуглова и др. 2012).

Важным почвенным свойством особенно в условиях городской среды является состояние структурных агрегатов. Структура определяет фильтрационные свойства грунтов, и, как следствие, опосредованно влияет на миграцию элементов в почвенном профиле (Холодов и др., 2019; Тагивердиев и др., 2021; Luan et al., 2022; Peng et al., 2022). Структура почвы участвует в формировании водно-воздушного, температурного режимов, плотности сложения (Chen et al., 2014; Dvornikov et al., 2021). Имеются работы, указывающие на то, что структурное состояние почв влияет на эмиссию углерода и азота (Yazdanpanah et al., 2016). Так, например, установлено, что с уменьшением диаметра агрегатов сокращается эмиссия молекулярного азота и возрастает доля промежуточных продуктов денитрификации (Степанов, 2000). Однако структурное состояние урбопочв мало изучается с точки зрения фактора, влияющего на депонирование и миграцию химических элементов и, в частности, тяжелых металлов. Чаще данный показатель рассматривается как показатель деградации физических свойств (Zheng et al., 2022), на которые помимо естественных процессов структурообразования накладывают отпечаток антропогенные воздействия.

Установлено, что деградация структуры в почвах городов происходит за счет привнесения не склонных к агрегации субстратов, таких как, например, песок, гравий, обломки стекла, керамики. Негативно влияет на структуру почвы и механическое разру-

шение, уплотнение, сведение естественных растительных ассоциаций и сниженный привнос растительного опада, замена микробиологических сообществ на патогенные (Chen et al., 2014; Dvornikov et al., 2021). Структурное состояние почв тесно связано с органическим веществом, которое действует как “клей”, способствующий сцеплению частиц в агрегаты. И, как следствие, трансформация органического вещества под воздействием антропогенных процессов приводит к изменению процессов формирования и стабилизации почвенных агрегатов. Несмотря на выполняемые функции, роль структуры в экологических процессах городской экосистемы/среды недооценивается. А значит и изучение влияния структуры агрегатов на распределение и накопление тяжелых металлов в профиле городских почв является перспективным направлением в урбопочвоведении.

Целью нашего исследования являлось определение способности к депонированию цинка, меди и свинца агрегатами различных размерных фракций черноземов миграционно-сегрегационных под естественными травянистыми фитоценозами и урбостратоземов на черноземах. А также оценка содержания тяжелых металлов в разных размерных фракциях агрегатов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в Ростовской агломерации. Почвообразующими породами на данной территории чаще всего выступают четвертичные отложения, представленные лёссовидными глинами и суглинками (Безуглова, Хырхырова, 2008).

Были исследованы черноземы миграционно-сегрегационные (Шишов и др., 2004) под естественными травянистыми фитоценозами и урбостратоземы на черноземах. Профили данных почв имеют вид AU-BCA-C и UR-[AU]-[BCA]-[C] соответственно (Прокофьева и др., 2014). Где AU – это темногумусовые горизонты; BCA – аккумулятивно-карбонатные, а C – почвообразующая порода, их погребенными аналогами являются горизонты [AU], [BCA], [C]. Почвообразующую породу в данном исследовании не изучали. Всего было заложено 8 разрезов, изучено 42 почвенных горизонта, отобрано 210 образцов с учетом деления на фракции.

Отобранные в полевых условиях образцы сушили до воздушно-сухого состояния, затем рассеивали в колонке сит по методу Саввинова (сухое просеивание) (Вадюнина, Корчагина, 1986). Отдельные фракции агрегатов (<0.25 ; 1–2; 3–5; 5–7; <10 мм) отбирали для дальнейшего определения в них содержания цинка, меди и свинца. Выбор фракций обоснован структурным состоянием изучаемых черноземов и его трансформацией в результате урбопедогенеза. Так, в предыдущих работах было показано, что в черноземах преобладают фракции 2–1, 5–3 и >10 мм, а в результате антропогенного воздействия максимумы смещаются в сторону содержания фракций размерностью <0.25 ; 7–5 мм (Тагивердиев и др., 2021).

После пробоподготовки в образцах почв определяли цинк, медь, свинец методом рентгенфлуоресцентной спектрометрии на приборе МАКС-GVM (ГОСТ 33850-2016).

Подвижные формы цинка, меди и свинца определяли в азотно-кислых вытяжках (1н HNO_3) атомно-абсорбционным методом на приборе МГА-915.

Статистический анализ включал в себя расчет и оценку критерия Вилкоксона для связанных выборок, среди различных размерных фракций агрегатов для выявления достоверных различий в содержании цинка, меди и свинца. Данный критерий позволяет сравнивать разные горизонты. Благодаря этому можно получить общие закономерности в распределении изучаемых показателей, как по профилю, так и между черноземами и урбостратоземами.

Оценка содержания тяжелых металлов производилась в соответствии с нормативом СанПин 1.2.3685-21, который определяет предельно допустимые концентрации ПДК и ориентировочно допустимые концентрации ОДК в почвах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего необходимо отметить, что медианы и средне-статистические значения валового содержания всех трех элементов практически совпадают, что свидетельствует о подчинении этих рядов закону нормального распределения (рис. 1А), в то время как в урбостратоземах наблюдается иная картина (рис. 1Б).

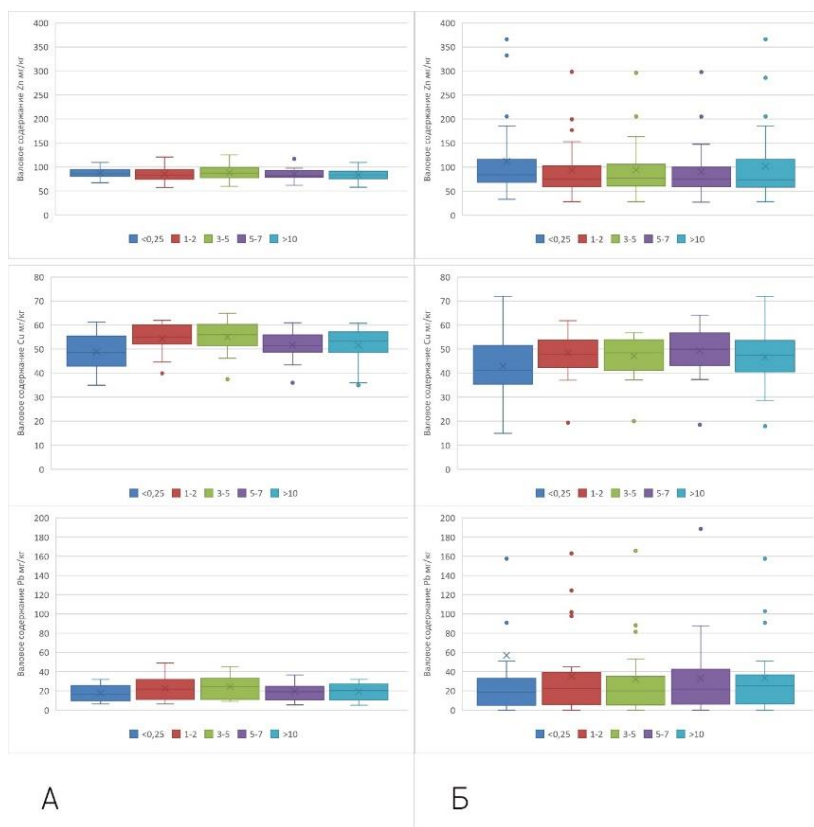


Рис. 1. Валовое содержание цинка, меди и свинца в различных фракциях агрегатов: **А** – выборка черноземов; **Б** – выборка урбостратоземов.

Fig. 1. Total content of zinc, copper and lead in different fractions of aggregates: **A** – sample of chernozems; **B** – sample of urban stratozems.

Если для меди значения этих двух статистических показателей также совпадают, то по цинку и свинцу наблюдается превышение средних значений над медианой, положительная асимметрия свидетельствует об антропогенном характере накоплений, причем более заметная разница фиксируется и для цинка, и для свинца в микроагрегатах и в глыбистых отдельностях.

Медианы валового содержания цинка в черноземах (рис. 1А) всех агрегатных фракций выше таковых в урбостратозе-

мах (рис. 1Б). При этом более высокие средние значения наблюдаются в выборках урбостратоземов, что связано с наличием нескольких горизонтов, содержание цинка в которых, по разным агрегатным фракциям, находится в диапазоне 200–366 мг/кг. Высокий размах в выборках урбостратоземов также обусловлен антропогенным воздействием: высокая неоднородность свойств – характерная черта урбостратоземов (Прокофьева и др., 2014). Экстремумы, как минимальные, так и максимальные, во всех агрегатных фракциях также выше в урбостратоземах.

Медианы и средние значения валового содержания меди выше в черноземах относительно урбостратоземов. Минимумы ниже в выборках урбостратоземов, максимумы выше для этих же почв в агрегатных фракциях <0.25; 5–7; >10 мм. Нужно отметить, что имеется тренд на уменьшение валового содержания меди в ходе урбопедогенеза в Ростове-на-Дону. Причиной, возможно, является привнос песка (Тагивердиев, 2020), который приводит к разбавлению естественной концентрации. С другой стороны, более высокое содержание меди в черноземах может быть обусловлено обработкой древесных насаждений медьсодержащими фунгицидами, так как часть разрезов была заложена в искусственных древесных насаждениях – лесополосах, питомниках сосны и лиственных деревьев.

Для свинца средние значения выше в урбостратоземах, в целом, как и медианы, кроме фракции 3–5 мм. Минимумы содержания свинца во всех фракциях урбостратоземов составляют 0 мг/кг, чего не наблюдается в черноземах. Максимумы выше в урбостратоземах за исключением фракции 1–2 мм. В выборках урбостратоземов отмечается большое количество выбросов, среди которых имеется даже точка с содержанием свинца до 715 мг/кг (не отображена на графике). В целом распределение валового свинца в агрегатных фракциях этого горизонта представляется очень интересным, его содержание составляет 715, 124, 90, 75, 46 мг/кг, возрастающая с увеличением размера фракции.

Отмечается отсутствие превышений ОДК во всех выборках черноземов по всем элементам. Среди урбостратоземов превышение ОДК имеется в одном горизонте по цинку, где загрязнение фиксируется во всех агрегатных фракциях. Загрязнение по свинцу

наблюдается в двух горизонтах, один из которых загрязнен по всем агрегатным фракциям, другой – только во фракциях <0.25 и >10 мм.

Содержание подвижных форм изученных элементов по агрегатным фракциям представлено на рисунке 2.

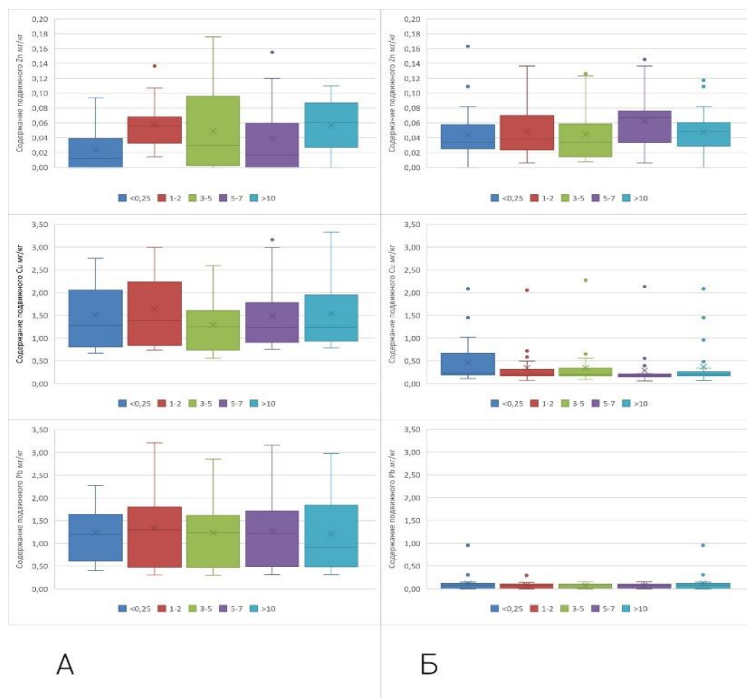


Рис. 2. Содержание подвижных соединений цинка, меди и свинца в различных фракциях агрегатов: **А** – выборка черноземов; **Б** – выборка урбостратоземов.

Fig. 2. Content of mobile compounds of zinc, copper, and lead in different fractions of aggregates: **A** – sample of chernozems; **B** – sample of urban stratozems.

Содержание подвижного цинка в выборках черноземов и урбостратоземов сопоставимо. Содержание подвижной меди значительно меньше в выборках урбостратоземов. Такая же законо-

мерность прослеживается и для свинца. Однако в случае меди это обосновано привнесом в почвы песчаных частиц, а в случае свинца добавляется фактор связывания металла в неподвижные соединения. Содержания подвижных форм цинка и свинца не превышают ПДК. Содержание подвижной меди превышено в трех образцах из черноземов во фракциях размером 5–7 и >10 мм.

Чтобы изучить депонирование валовых форм цинка, меди и свинца провели анализ критерия Вилкоксона для связанных выборок в черноземах и урбостратоземах (табл. 1).

Таблица 1. Критерий Вилкоксона для связанных выборок между различными размерными фракциями агрегатов по валовому содержанию Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ наличие достоверных различий; - отсутствие достоверных различий)

Table 1. Wilcoxon criterion for related samples between different size fractions of aggregates by gross content of Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ presence of reliable differences; - absence of reliable differences)

Пара сравнения	Черноземы			Урбостратоземы		
	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb
<0.25 мм / 1–2 мм	-	+	+	+	+	+
<0.25 мм / 3–5 мм	-	+	+	+	+	-
<0.25 мм / 5–7 мм	-	-	+	+	+	-
<0.25 мм / >10 мм	+	-	+	+	+	+
1–2 мм / 3–5 мм	+	-	-	+	-	+
1–2 мм / 5–7 мм	-	+	+	+	-	-
1–2 мм / >10 мм	+	+	+	+	+	+
3–5 мм / 5–7 мм	+	+	+	+	+	-
3–5 мм / >10 мм	+	+	+	+	-	+
5–7 мм / >10 мм	+	+	+	+	+	+

Распределение цинка в размерных фракциях агрегатов черноземов можно представить в виде ряда: (>10) < 5–7 ≤ 1–2 ≤ (<0.25) ≤ 3–5 мм (табл. 1). Минимальные значения приходятся на

крупные фракции <10 и 5–7 мм, мелкие фракции более однородны в отношении содержания цинка. Однако уже в урбостратоземах содержание цинка приобретает строгую закономерность, фракции агрегатов выстраиваются в убывающий по этому показателю ряд: (>10) < 5–7 < 1–2 < 3–5 < (<0.25) мм. Следует отметить, что указанные ряды в черноземах и урбостратоземах в целом можно считать одинаковыми. Таким образом отмечается максимальное концентрирование цинка во фракциях <0.25 и 3–5 мм как в черноземах, так и в урбостратоземах. Обусловлено это тем, что в этих фракциях концентрируется органическое вещество (Тагивердиев и др., 2022), а цинк образует с гумусовыми кислотами комплексно-гетерополярные соединения и адсорбционные комплексы (Baue et al., 2022). Из таблицы 1 и рисунка 1 также следует, что с усилением загрязнения цинком все пары сравнений показывают достоверные различия, т. е. закономерность усиливается, что также обусловлено связыванием загрязняющих веществ органическим веществом. К агрегатам размером менее 0.25 мм приурочено и максимальное содержание неорганического углерода, представленного в почвах региона карбонатами. Цинк, как известно, образует труднорастворимые соединения с карбонатами.

Урбопедогенез изученных почв сопровождается небольшим снижением валового содержания меди. Валовое количество меди распределяется по фракциям агрегатов в черноземах, составляя возрастающий ряд: (<0.25) ≤ 5–7 < (>10) < 1–2 ≤ 3–5 мм, в урбостратоземах ряд имеет похожий вид: <0.25 < (>10) < 1–2 ≤ 3–5 ≤ 5–7 мм (табл. 1). Пылеватые агрегаты (<0.25 мм) характеризуются наименьшим содержанием этого металла. Максимумы характерны для фракций 1–2; 3–5 мм в черноземах и 3–5, 5–7 мм – в урбостратоземах. Похожие данные получены в работе Wang и др. (2016), где отмечено наибольшее концентрирование меди в агрегатах размерностью 1–2 мм.

Похожая ситуация и со свинцом. Распределение валового содержания свинца в размерных фракциях агрегатов черноземов имеет вид: (<0.25) < 5–7 < (>10) < 3–5 ≤ 1–2 мм; для урбостратоземов: (<0,25) < 3–5 ≤ 5–7 < 1–2 < (>10) мм (табл. 1). Как и с медью, минимальное содержание свинца приходится на фракцию

<0.25 мм. Максимумы в черноземах приурочены к фракции 1–2, 3–5 мм, а в урбостратоземах – к фракции >10 мм.

Вероятно, существует механизм, при котором свинец по достижении некоторой критической концентрации начинает замещать поглощенный Ca^{2+} (Понизовский, Мироненко, 2001), что в сумме с трансформацией микробиологических сообществ (Мосина и др. 2012) приводит к деградации структуры. Это подтверждается данными рисунка 1, где показано, что среднее содержание свинца во фракции <0.25 мм для урбостратоземов самое высокое среди остальных фракций и составляет 57 мг/кг. Иными словами, есть единичные случаи критических концентраций, которые разрушают агрегаты до фракции <0.25 мм. Учитывая, что выборка с содержанием свинца в указанной фракции неоднородна и имеются горизонты как с высоким, так и с низким содержанием Pb, целостность закономерностей, при которых в одних фракциях содержание элемента больше, нарушается и анализ связанных выборок Вилкоксона в урбостратоземах показывает отсутствие достоверных различий в парах сравнений <0.25 и 3–5 мм; <0.25 и 5–7 мм. Также в урбостратоземах высокую сорбцию свинца во фракции >10 мм можно связать с тем, что свинец мигрирует преимущественно в твердом состоянии в виде достаточно крупных частиц (Понизовский, Мироненко, 2001; Kelly et al., 1996; Li et al., 2001; Chen et al., 2005; Duzgoren-Aydin et al., 2006; Крестьянникова и др., 2015), которые способны задерживаться только в макропорах, присущих более крупным агрегатам.

Подвижные формы цинка, меди и свинца статистически анализировали сообразно валовому содержанию (табл. 2). Фракции агрегатов по содержанию подвижных форм цинка в черноземах можно выстроить в ряд: $(<0,25) \leq 5-7 \leq 3-5 \leq 1-2 < (>10)$ мм, а для урбостратоземов ряд несколько иной: $(<0,25) \leq 3-5 \leq 1-2 \leq (>10) \leq 5-7$ мм. Минимальные значения подвижного цинка приходятся на фракции <0.25 мм, при этом валовое содержание цинка в этой фракции наибольшее, что говорит о высокой роли данной структурной фракции в локализации и связывании цинка, нейтрализующей его токсическое действие. Однако высокое содержание данной фракции в почвах уменьшает противозерозионную стойкость почвы (Шеин, 2005), что объективно может способствовать

опосредованному загрязнению сопредельных сред. Напротив, наибольшее содержание подвижных форм цинка приурочено к фракции >10 мм, в которой валовое количество этого металла минимальное.

Таблица 2. Критерий Вилкоксона для связанных выборок между различными структурными фракциями по содержанию подвижных форм Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ наличие достоверных различий; - отсутствие достоверных различий)

Table 2. Wilcoxon criterion for connected samples between different structural fractions by the content of mobile forms of Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ presence of reliable differences; - absence of reliable differences)

Пара сравнения	Черноземы			Урбостратоземы		
	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb
<0.25 мм / 1–2 мм	+	+	-	-	+	+
<0.25 мм / 3–5 мм	-	+	-	-	+	-
<0.25 мм / 5–7 мм	+	-	-	+	+	+
<0.25 мм / >10 мм	+	-	-	+	+	-
1–2 мм / 3–5 мм	-	+	+	-	-	-
1–2 мм / 5–7 мм	-	-	-	+	+	-
1–2 мм / >10 мм	+	-	-	-	-	-
3–5 мм / 5–7 мм	-	+	-	+	+	-
3–5 мм / >10 мм	+	+	-	+	-	-
5–7 мм / >10 мм	+	+	-	+	-	-

Структурные фракции по содержанию подвижных форм меди в черноземах можно выстроить в ряд: 5–7 < 3–5 < (<0.25) ≤ (>10) ≤ 1–2 мм; для урбостратоземов: 5–7 < 1–2 ≤ 3–5 ≤ (>10) < (<0.25) мм. Фракция 5–7 мм характеризуется минимальным содержанием меди и в урбостратоземах, и в черноземах. В целом содержание подвижной меди ниже в урбостратоземах, чем в черноземах.

Структурные фракции по содержанию подвижных форм свинца в черноземах можно выстроить в ряд: $(>10) < (<0.25) < 5-7 \leq 3-5 \leq 1-2$ мм; для урбостратоземов: $5-7 < 1-2 \leq (>10) < (<0.25) < 3-5$ мм. Свинец – единственный из изученных металлов имеет различные фракции с минимальным его содержанием для подвижной формы в черноземах и урбостратоземах. Распределение подвижного свинца по фракциям довольно однородное как в черноземах, так и в урбостратоземах. Медианы и большинство средних значений из выборок в урбостратоземах отличаются лишь в 0.001 и 0.0001 долях, при этом анализ Вилкоксона свидетельствует о достоверной значимости этих различий. В целом содержание подвижных форм свинца гораздо выше в черноземах, чем в урбостратоземах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурные агрегаты различной размерности различаются по способности к накоплению цинка, меди и свинца. Если цинк, включая его подвижные соединения, преимущественно накапливается в микроагрегатах, то валовое количество меди и особенно свинца приурочено к более крупным агрегатам. В то же время подвижные соединения меди сосредотачиваются в микроагрегатах и во фракции размерностью более 10 мм. Подвижные соединения свинца распределяются по фракциям разной размерности довольно равномерно во всех изученных почвах.

Отмеченные закономерности обусловлены разной способностью изученных металлов образовывать соединения с гумусовыми веществами, а также различиями в свойствах соединений металлов, поступающих из материнской породы и имеющих антропогенное происхождение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглова О.С., Горбов С.Н., Морозов И.В., Невидомская Д.Г. Урбопочвоведение. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. 264 с.
2. Безуглова О.С., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1153–1159.

3. *Безуглова О.С., Хырхырова М.М.* Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2008. 352 с.
4. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
5. *Горбов С.Н., Безуглова О.С.* Тяжелые металлы и радионуклиды в почвах Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2020. 124 с. DOI: [10.18522/801273349](https://doi.org/10.18522/801273349).
6. *Горбов С.Н., Безуглова О.С., Вардуни Т.В., Горовцов А.В., Тагивердиев С.С., Гильдебрант Ю.А.* Генотоксичность и загрязнение тяжелыми металлами естественных и антропогенно-измененных почв Ростова-на-Дону // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1519–1529.
7. ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, 2017.
8. *Крестьянникова Е.В., Козлова В.В., Ларина Н.С., Ларин С.И.* Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5(2). С. 679–684.
9. *Мосина Л.В., Довлетярова Э.А., Ефремова С.Ю., Норвосурэн Ж.* Экологическая опасность загрязнения почвы тяжелыми металлами (на примере свинца) // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2012. № 29. С. 383–386.
10. *Понизовский А.А., МIRONENKO Е.В.* Механизмы поглощения свинца(п) почвами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 418–429.
11. *Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е.* Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164. DOI: [10.7868/S0032180X14100104](https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104).
12. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021
13. *Степанов А.Л.* Микробная трансформация закиси азота в почвах: Дис. ... докт. биол. наук: 03.00.27, 03.00.07. М., 2000. 265 с.
14. *Тагивердиев С.С.* Влияние урбопедогенеза на морфологические и физические свойства почв Ростовской агломерации: Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. Ростов-на-Дону, 2020. 206 с.
15. *Тагивердиев С.С., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В.* О локализации углерода в структурных фракциях черноземов и

урбостратоземов // Живые и биокосные системы. 2022. № 42. DOI: [10.18522/2308-9709-2022-42-6](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-6).

16. Тагивердиев С.С., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Скрипников П.Н., Козырев Д.А. Особенности агрегатного состава в связи с соотношением углерода органического вещества и карбонатов в почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1–7. DOI: [10.31857/S0032180X21090124](https://doi.org/10.31857/S0032180X21090124).

17. Тагивердиев С.С., Скрипников П.Н., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Козырев Д.А. Содержание и распределение органического и неорганического углерода в городских почвах Ростовской агломерации // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 4(208). С. 118–129. DOI: [10.18522/1026-2237-2020-4-118-129](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-118-129).

18. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. DOI: [10.1134/S0032180X19020060](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060).

19. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

21. Bauer T.V., Pinski D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N. Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. No. 2. P. 335–347. DOI: [10.1007/s10653-020-00773-2](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2).

22. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J. Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil // FEMS Microbiology Ecology. 2014. No. 87(1). P. 164–181. DOI: [10.1111/1574-6941.12212](https://doi.org/10.1111/1574-6941.12212).

23. Chen T.B., Zheng Y., Lei M., Huang Z., Wu H., Chen H., Fan K., Yu K., Wu X., Tian Q. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China // Chemosphere. 2005. No. 60. P. 542e551. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2004.12.072](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072).

24. Duzgoren-Aydin N.S., Wong C.S.C., Aydin A., Song Z., You M., Li X.D. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China // Environmental Geochemistry and Health. 2006. No. 28. P. 375–391. DOI: [10.1007/s10653-005-9036-7](https://doi.org/10.1007/s10653-005-9036-7).

25. *Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D.* Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // *Geoderma*. 2021. No. 399. P. 115039. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115039](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039).
26. *Hong E.Y., Wan Z., Kim Y., Yu J.* Submerged zone and vegetation drive distribution of heavy metal fractions and microbial community structure: Insights into stormwater biofiltration system // *Science of the Total Environment*. 2022. No. 853. P. 158367. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158367](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158367).
27. *Kelly J., Thornton I., Simpson P.R.* Urban Geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain // *Applied Geochemistry*. 1996. No. 11. P. 363e370. DOI: [10.1016/0883-2927\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00084-4).
28. *Li X.D., Poon C.S., Liu P.S.* Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong // *Applied Geochemistry*. 2001. No. 16. P. 1361e1368. DOI: [10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2).
29. *Luan H., Zhang X., Liu Y., Huang S., Chen J., Guo T., Liu Y., Guo S., Qi G.* The microbial-driven C dynamics within soil aggregates in walnut orchards of different ages based on microbial biomarkers analysis // *Catena*. 2022. No. 211. P. 105999. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105999](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105999).
30. *Peng J., Wu X., Ni S., Wang J., Song Y., Cai C.* Investigating intra-aggregate microstructure characteristics and influencing factors of six soil types along a climatic gradient // *Catena*. 2022. No. 210. P. 105867. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105867](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105867).
31. *Wang Q.Y., Hu B., Yu H.W.* Adsorption behaviors of fungicide-derived copper onto various size fractions of aggregates from orchard soil // *Environ Sci Pollut Res Int*. 2016. No. 23. P. 24983–24990. DOI: [10.1007/s11356-016-7743-5](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7743-5).
32. *Yazdanpanah N., Mahmoodabadi M., Cerdà A.* The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands // *Geoderma*. 2016. No. 266. P. 58–65. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.11.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.032).
33. *Zheng Y., Li S., Zhou W., Fan Z., Du T., Qu B., Sun X.* Soil erodibility after the removal of wood chip mulch: A wind tunnel experiment // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2022. No. 77(5). P. 493–500. DOI: [10.2489/JSWC.2022.00125](https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.00125).

REFERENCES

1. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Morozov I.V., Nevidomskaya D.G., *Urbopochvovedenie* (Urban soil science), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2012, 264 p.
2. Bezuglova O.S., Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N., Fizicheskie kharakteristiki gorodskikh pochv Rostovskoi aglomeratsii (Physical characteristics of urban soils of Rostov agglomeration), *Pochvovedenie*, 2018, No. 9, pp. 1153–1159.
3. Bezuglova O.S., Khyrkyrova M.M., *Pochvy Rostovskoi oblasti* (Soils of the Rostov region), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2008, 352 p.
4. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of research of physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
5. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., *Tyazhelye metally i radionuklidy v pochvakh Rostovskoi aglomeratsii* (Heavy metals and radionuclides in soils of Rostov agglomeration), Rostov-na-Donu – Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2020, 124 p., DOI: [10.18522/801273349](https://doi.org/10.18522/801273349).
6. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Varduni T.V., Gorovtsov A.V., Tagiverdiev S.S., Gil'debrant Yu.A., Genotoksichnost' i zagryaznenie tyazhelymi metallami estestvennykh i antropogenno-izmenennykh pochv Rostova-na-donu (Genotoxicity and heavy metal pollution of natural and anthropogenically modified soils of Rostov-on-Don), *Pochvovedenie*, 2015, No. 12, pp. 1519–1529.
7. GOST 33850-2016. Soils. Determination of chemical composition by X-Ray fluorescence spectrometry, 2017
8. Krest'yannikova E.V., Kozlova V.V., Larina N.S., Larin S.I., Khimiko-ekologicheskaya otsenka zagryazneniya svintsom atmosfery goroda Tyumeni (Chemical and ecological assessment of lead pollution of the Tyumen city atmosphere), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, Vol. 17, No. 5(2), pp. 679–684.
9. Mosina L.V., Dovletyarova E.A., Efremova S.Yu., Norvosuren Zh., Ekologicheskaya opasnost' zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami (na primere svintsa) (Ecological Hazard of Soil Pollution by Heavy Metals (Lead as an Example)), *Izvestiya PGPU im. V.G. Belinskogo*, 2012, No. 29, pp. 383–386.
10. Ponizovskii A.A., Mironenko E.V., Mekhanizmy pogloshcheniya svintsa(p) pochvami (Mechanisms of lead(p) absorption by soils), *Pochvovedenie*, 2001, No. 4, pp. 418–429.
11. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N.,

Sivtseva N.E., Vvedenie pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskikh territorii v klassifikatsiyu pochv Rossii (Addition of soils and soil-like formations of urban areas into the classification of soils in Russia), *Pochvovedenie*, 2014, No. 10, pp. 1155–1164, DOI: [10.7868/S0032180X14100104](https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104).

12. SanPin 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of habitat factors for humans, 2021.

13. Stepanov A.L., *Mikrobnaya transformatsiya zakisi azota v pochvakh: Dis. ... dokt. biol. nauk* (Microbial transformation of nitrous oxide in soils: Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2000, 265 p.

14. Tagiverdiev S.S., *Vliyanie urbopedogeneza na morfologicheskie i fizicheskie svoystva pochv Rostovskoi aglomeratsii: Dis. ... kand. biol. nauk* (Influence of urban pedogenesis on morphological and physical properties of soils of the Rostov agglomeration: Candidate of Biol. Sci. thesis), Rostov-na-Donu, 2020, 206 p.

15. Tagiverdiev S.S., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Sal'nik N.V., O lokalizatsii ugleroda v strukturnykh fraktsiyakh chernozemov i urbostratozemov (About localisation of carbon in structural fractions of chernozems and urban stratozems), *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2022, No. 42, DOI: [10.18522/2308-9709-2022-42-6](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-6).

16. Tagiverdiev S.S., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Skripnikov P.N., Kozyrev D.A., Osobennosti agregatnogo sostava v svyazi s sootnosheniem ugleroda organicheskogo veshchestva i karbonatov v pochvakh Rostovskoi aglomeratsii (Features of aggregate composition in connection with the ratio of carbon of organic matter and carbonates in soils of Rostov agglomeration), *Pochvovedenie*, 2021, No. 9, pp. 1–7, DOI: [10.31857/S0032180X21090124](https://doi.org/10.31857/S0032180X21090124).

17. Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Kozyrev D.A., Soderzhanie i raspredelenie organicheskogo i neorganicheskogo ugleroda v gorodskikh pochvakh Rostovskoi aglomeratsii (Content and distribution of organic and inorganic carbon in urban soils of Rostov agglomeration), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki*, 2020, No. 4(208), pp. 118–129, DOI: [10.18522/1026-2237-2020-4-118-129](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-118-129).

18. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Yu.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aidiev A.Ya., Lazarev V.I., Frid A.S., Izmenenie sootnosheniya fraktsii agregatov v gumusovykh gorizontakh chernozemov v razlichnykh usloviyakh zemlepol'zovaniya (Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems under different land use conditions), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 184–193, DOI: [10.1134/S0032180X19020060](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060).

19. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics course), Moscow: Izd-vo

MGU, 2005, 432 p.

20. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.

21. Bauer T.V., Pinskii D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N., Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils, *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, Vol. 44, No. 2, pp. 335–347, DOI: [10.1007/s10653-020-00773-2](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2).

22. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J., Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil, *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, No. 87(1), pp. 164–181, DOI: [10.1111/1574-6941.12212](https://doi.org/10.1111/1574-6941.12212).

23. Chen T.B., Zheng Y., Lei M., Huang Z., Wu H., Chen H., Fan K., Yu K., Wu X., Tian Q., *Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China*, *Chemosphere*, 2005, No. 60, pp. 542e551, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2004.12.072](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072).

24. Duzgoren-Aydin N.S., Wong C.S.C., Aydin A., Song Z., You M., Li X.D., Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China, *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, No. 28, pp. 375–391, DOI: [10.1007/s10653-005-9036-7](https://doi.org/10.1007/s10653-005-9036-7).

25. Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D., Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing, *Geoderma*, 2021, No. 399, pp. 115039, DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115039](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039).

26. Hong E.Y., Wan Z., Kim Y., Yu J., Submerged zone and vegetation drive distribution of heavy metal fractions and microbial community structure: Insights into stormwater biofiltration system, *Science of the Total Environment*, 2022, No. 853, pp. 158367, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158367](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158367).

27. Kelly J., Thornton I., Simpson P.R., Urban Geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain, *Applied Geochemistry*, 1996, No. 11, pp. 363e370, DOI: [10.1016/0883-2927\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00084-4).

28. Li X.D., Poon C.S., Liu P.S., Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong, *Applied Geochemistry*, 2001, No. 16, pp. 1361e1368, DOI: [10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2).

29. Luan H., Zhang X., Liu Y., Huang S., Chen J., Guo T., Liu Y., Guo S.,

- Qi G., The microbial-driven C dynamics within soil aggregates in walnut orchards of different ages based on microbial biomarkers analysis, *Catena*, 2022, No. 211, pp. 105999, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105999](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105999).
30. Peng J., Wu X., Ni S., Wang J., Song Y., Cai C., Investigating intra-aggregate microstructure characteristics and influencing factors of six soil types along a climatic gradient, *Catena*, 2022, No. 210, pp. 105867, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105867](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105867).
31. Wang Q.Y., Hu B., Yu H.W., Adsorption behaviors of fungicide-derived copper onto various size fractions of aggregates from orchard soil, *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, No. 23, pp. 24983–24990, DOI: [10.1007/s11356-016-7743-5](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7743-5).
32. Yazdanpanah N., Mahmoodabadi M., Cerdà A., The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands, *Geoderma*, 2016, No. 266, pp. 58–65, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.11.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.032).
33. Zheng Y., Li S., Zhou W., Fan Z., Du T., Qu B., Sun X., Soil erodibility after the removal of wood chip mulch: A wind tunnel experiment, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, No. 77(5), pp. 493–500, DOI: [10.2489/JSWC.2022.00125](https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.00125).

УДК 504.054;504.064.2.001.18

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230



Ссылки для цитирования:

Жаксылыков Н.Б., Кошелева Н.Е., Завгородняя Ю.А. Оценка загрязнения почв г. Улан-Удэ полициклическими ароматическими углеводородами // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 185-230. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230

Cite this article as:

Zhaxylykov N.B., Kosheleva N.E., Zavgorodnyaya Yu.A., Assessment of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulan-Ude, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 185-230, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230

Благодарность:

Полевые работы выполнены по договору № 8/Д-2021 с ФГБУ УралНИИ “Экология”, анализ и интерпретация данных – при поддержке РФФ (проект № 19-77-3004-П).

Acknowledgments:

Field work was carried out under contract No. 8/D-2021 with FGBU Ural Research Institute “Ecology”, data analysis and interpretation were supported by Russian Scientific Foundation (project No. 19-77-3004-П).

Оценка загрязнения почв г. Улан-Удэ полициклическими ароматическими углеводородами

**© 2024 г. Н. Б. Жаксылыков*, Н.Е. Кошелева,
Ю. А. Завгородняя**

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

**<https://orcid.org/0009-0008-4486-9812>, e-mail: niyaz.zh@mail.ru.*

*Поступила в редакцию 14.03.2024, после доработки 20.05.2024,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Впервые изучено загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) почвенного покрова г. Улан-Удэ, столицы Республики Бурятия. Содержание 16 индивидуальных полиаренов проанализировано в образцах верхнего горизонта фоновых каштановых и городских почв, отобранных в ходе почвенно-

геохимической съемки в июле–августе 2022 г. Средняя концентрация суммы ПАУ в почвенном покрове Улан-Удэ составила 735 нг/г, что превышает концентрацию в фоновых почвах (87 нг/г) более чем в 8 раз. По убыванию суммы ПАУ функциональные зоны образуют ряд: железнодорожная транспортная > автотранспортная > промышленная > одноэтажная селитебная > многоэтажная селитебная > рекреационная. При этом сумма ПАУ в железнодорожной транспортной зоне выше, чем в других функциональных зонах в 2.6–5.2 раза, что указывает на то, что железнодорожный транспорт является самым мощным источником ПАУ в городе. Загрязнение полиаренами почв во всех функциональных зонах определяется преимущественно средне- (46%) и высокомолекулярными (41%) соединениями. Среди низкомолекулярных ПАУ лидирует фенантрен (9% от суммы ПАУ), но более интенсивно аккумулируются среднемолекулярные флуорантен (18%) и пирен (13%), среди высокомолекулярных соединений доминируют бензо(ghi)перилен (12%), бензо(b)флуорантен (10%), индено(1,2,3-cd)пирен (8%) и бенз(a)пирен (6%). Концентрация суммы 16 ПАУ в почвенном покрове города варьирует в пределах 17–9 540 нг/г. Самые высокие уровни загрязнения (3 226–9 540 нг/г) зафиксированы в 9 точках опробования (4% территории города), которые формируют наиболее контрастные локальные аномалии ПАУ. На более чем половине территории Улан-Удэ сумма ПАУ не превышает 500 нг/г. Расчет индикаторных соотношений индивидуальных ПАУ позволил определить доминирующие типы источников, к которым относятся железнодорожный транспорт и сжигание угля. Экологическая опасность загрязнения почв ПАУ в Улан-Удэ на 64% обусловлена бенз(a)пиреном и в меньшей степени – бензо(b)флуорантеном (9.6%), индено(1,2,3-cd)пиреном (7.2%), дибензо(ah)антраценом (6.5%) и бенз(a)антраценом (6.1%).

Ключевые слова: ПАУ; техногенные аномалии; промышленные выбросы; загрязнение от транспорта; экологическая опасность; индикаторные соотношения.

Assessment of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulan-Ude

© 2024 N. B. Zhaxylykov*, N. E. Kosheleva,
Yu. A. Zavgorodnyaya

*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
<https://orcid.org/0009-0008-4486-9812>, e-mail: niyaz.zh@mail.ru.

Received 14.03.2024, Revised 20.05.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: For the first time, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of the soil cover of Ulan-Ude, the capital of the Republic of Buryatia, was studied. The content of 16 individual polyarenes was analyzed in the upper horizon of background chestnut and urban soils, sampled during soil and geochemical survey in July–August 2022. The average concentration of total PAHs in the soil cover of Ulan-Ude was 735 ng/g, which was 8 times as much as the concentration in the background soils (87 ng/g). The PAH amount in the soil of various functional zones decrease in the following order: railway transport > motor traffic > industrial > one-story residential > multi-story residential > recreational. At the same time, the amount of PAHs in the railway transport zone was 2.6–5.2 times higher than in other functional zones, which indicates that railway transport is the most powerful source of PAHs in the city. Contamination of soils with polyarenes in all functional zones is determined primarily by medium- (46%) and high-molecular-weight (41%) compounds. Among PAHs with low molecular weight, phenanthrene prevailed (9% of the total PAHs), but medium-molecular-weight fluoranthene (18%) and pyrene (13%) showed higher share; high-molecular-weight compounds dominated by benzo(ghi)perylene (12%), benzo(b)fluoranthene (10%), indeno(1,2,3-cd)pyrene (8%) and benzo(a)pyrene (6%). The total amount of 16 PAHs in the soil cover of the city varied within the range of 17–9 540 ng/g. The highest levels of pollution (3 226–9 540 ng/g) were recorded at 9 sampling points (4% of the city), which form the most contrasting local PAH anomalies. In more than half of the territory of Ulan-Ude, the total amount of PAHs did not exceed 500 ng/g. The indicator ratios of individual PAHs made it possible to determine the dominant types of sources, which include railway transport and coal combustion. The contribution to the environmental hazard of soil contamination with PAHs in Ulan-Ude was mainly made by benzo(a)pyrene (64%) and, to a lesser extent, by benzo(b)fluoranthene (9.6%), indeno(1,2,3-cd)pyrene (7.2%), dibenzo(ah)anthracene (6.5%) and benzo(a)anthracene (6.1%).

Keywords: PAHs; anthropogenic anomalies; industrial emissions; transport pollution; environmental hazard; indicator ratios.

ВВЕДЕНИЕ

Города являются своеобразными островами загрязнения, где

под воздействием различных техногенных источников формируются геохимические аномалии в депонирующих средах, создающие риски для общественного здоровья. Среди депонирующих сред главным аккумулятором загрязняющих веществ является почвенный покров из-за своей способности индигировать многолетнее загрязнение (Касимов, 2013). В Улан-Удэ, крупном административном и промышленном центре Республики Бурятия, почвенный покров испытывал на протяжении многих десятилетий значительную техногенную нагрузку, которая обусловлена функционированием объектов промышленности и теплоэнергетики, автотранспорта, очистных сооружений и золоотвалов городских ТЭЦ. Город также является крупным железнодорожным узлом, через который проходит участок Транссибирской магистрали.

Объекты промышленности, теплоэнергетики и транспорт выступают потенциальными источниками различных загрязняющих веществ, в том числе полициклических ароматических углеводородов (ПАУ, полиаренов), которые являются одними из наиболее экологически значимых загрязнителей городских ландшафтов, что обусловлено их высокой мутагенной и канцерогенной активностью и опасностью для здоровья человека (Ровинский и др., 1988; Alegebeleye et al., 2017; Корунов и др., 2020). Это органические соединения бензольного ряда с конденсированными бензольными кольцами, количество которых варьирует от 2 до 7 (Геохимия..., 1996).

ПАУ имеют как природное, так и антропогенное происхождение. Особенностью данной группы соединений является их встречаемость в почвах самых разных ландшафтов (Cui et al., 2022). Вне зависимости от специализации города в нем, как правило, функционируют предприятия топливно-энергетического комплекса и транспорт, поставляющие полиарены в окружающую среду. Образование ПАУ на урбанизированных территориях обусловлено процессом пиролиза органических веществ, сжиганием угля, нефти и древесины в промышленности и энергетике, топлива – в двигателях автомобилей. В Улан-Удэ к этим источникам ПАУ добавляется обширная зона малоэтажной жилой застройки, где для отопления в индивидуальных котлах и печах сжигают уголь и древесину. Кроме того, значительным естественным источником

полиаренов в Улан-Удэ являются лесные пожары. Горение сосновых лесов, произрастающих в данном регионе, продуцирует большее количество полиаренов, чем горение лиственных пород и травянистой растительности (Цибарт, Геннадиев, 2011).

Полиарены в зависимости от количества бензольных колец можно разделить на низко-, средне- и высокомолекулярные. К низкомолекулярным ПАУ относятся соединения, состоящие из 2–3 колец, к среднемолекулярным – 4-ядерные, к высокомолекулярным – от 5 колец и выше. Низкомолекулярные соединения ПАУ наименее устойчивы, они подвержены фотохимической и биологической деструкции и способны переходить в газовую фазу (Цибарт, Геннадиев, 2013). Более сложные соединения полиаренов отличаются высокой устойчивостью и представляют бóльшую экологическую опасность. Среди них наиболее токсичен бенз(а)пирен (БаП) – соединение с 5 бензольными кольцами, имеющее наивысшую канцерогенную опасность (Ровинский и др., 1988; Майстренко, Ключев, 2004). Однако в почвах Улан-Удэ содержание ПАУ никогда ранее не определялось.

Цель работы – оценить уровни загрязнения ПАУ почвенного покрова в г. Улан-Удэ. Для этого решались следующие задачи: 1) определить содержание и пространственное распределение 16 индивидуальных ПАУ в почвах города; 2) установить уровни загрязнения и состав ПАУ в разных функциональных зонах Улан-Удэ с выявлением основных источников загрязнения почв; 3) оценить экологическую опасность загрязнения ПАУ почвенного покрова в Улан-Удэ. Актуальность данного исследования обусловлена тем, что город Улан-Удэ расположен в нижнем течении р. Селенги, впадающей в оз. Байкал. Озеро является уникальным объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Для его сохранения необходим контроль потенциальной опасности источников загрязнения речных, а затем и озерных вод. В основу работы положены результаты почвенно-геохимической съемки на территории г. Улан-Удэ в июле и августе 2022 г.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Материалы и методы исследования. Почвенно-геохимической съемке Улан-Удэ предшествовал анализ космиче-

ских снимков территории и городского генплана. Эти материалы использовались в качестве основы при составлении карты функционального зонирования территории города в ПК ArcGIS 10.3. Выделены промышленная, селитебная с одноэтажной и многоэтажной застройкой, авто- и железнодорожная транспортная и рекреационная зоны. На основе функционального зонирования Улан-Удэ была заложена сеть опробования городских почв (рис. 1).

Летом 2022 г. в пределах города и его окрестностей проведено опробование верхнего (0–10 см) горизонта почв по близкой к регулярной сетке с шагом 700–1 000 м согласно европейской методике (Demetriades, Birke, 2015). Пробы почв отбирались в разных функциональных зонах в 3–5 повторностях, из которых составлялась одна смешанная проба. Всего получено 220 проб городских почв, в качестве фона отобрано 12 проб почв за пределами и на окраинах Улан-Удэ.

Содержание ПАУ в почвах определялось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1260 (Agilent Technologies) с флуориметрическим детектором и колонкой Zorbax Extend-C18 в Центре коллективного пользования “Хроматографический анализ объектов окружающей среды” Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова.

Физико-химические свойства почв анализировали общепринятыми методами в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ (Кречетов, Дианова, 2009). Удельную электропроводность водной вытяжки (ЕС) измеряли кондуктометром SevenEasy S30 (MettlerToledo, Швейцария), актуальную кислотность – рН-метром (Эксперт-рН, Россия), гранулометрический состав почв – на лазерном гранулометре Analysette 22 comfort (Fritsch, Германия), содержание органического вещества – методом Тюрина с титриметрическим окончанием.

Основные статистические показатели (среднее, min-max, коэффициент вариации C_v) рассчитывались в ПК Statistica 10. Степень контрастности техногенных аномалий ПАУ в городских почвах определяли по коэффициенту концентрации $K_c = C_i/C_f$, где C_i и C_f – содержание полиарена в городских и фоновых почвах

соответственно.

Среди изученных ПАУ БаП и дибензо(ah)антрацен являются наиболее экологически опасными соединениями, что обусловлено их чрезвычайно высокой токсичностью и канцерогенной активностью (Ровинский и др., 1988; Alegbeleye et al., 2017). В РФ гигиенический норматив ПАУ в почвах установлен только для БаП (СанПиН..., 2021). В связи с этим для определения экологической опасности загрязнения городских почв всеми рассматриваемыми ПАУ использовались коэффициенты токсической эквивалентности *TEF* (Nisbet, LaGoy, 1992), характеризующие токсичность индивидуальных структур ПАУ по сравнению с БаП (табл. 1). Экологическая опасность всех изученных ПАУ в городских почвах определялась путем суммирования их содержаний, умноженных на коэффициенты *TEF*, и последующего сравнения суммы токсических эквивалентов с ПДК для БаП путем расчета коэффициента экологической опасности $Ko = \sum TEF / \text{ПДК}$, где ПДК – норматив для БаП, равный 20 нг/г.

Таблица 1. Факторы токсической эквивалентности (*TEF*) для некоторых ПАУ (Nisbet, LaGoy, 1992)

Table 1. Toxicity Equivalence Factors (*TEFs*) for some PAHs (Nisbet, LaGoy, 1992)

ПАУ (количество бензольных колец)	<i>TEF</i>
Бенз(а)пирен (5), дибензо(ah)антрацен (5)	1
Бенз(а)антрацен (4), бензо(b)флуорантен (5), бензо(k)флуорантен (5), индено(1,2,3-cd)пирен (6)	0.1
Антрацен (3), хризен (4), бензо(ghi)перилен (6)	0.01
Нафталин (2), аценафтен (2), флуорен (3), фенантрен (3), аценафтилен (3), флуорантен (4), пирен (4)	0.001

Соотношения различных ПАУ позволяют установить источники их поступления. Соотношения антрацен/антрацен + фенантрен и фенантрен/антрацен разделяют пирогенные и петрогенные источники ПАУ, бензо(k)флуорантен/бензо(b)флуорантен определяет наличие источников ПАУ в зависимости от их удаленности. Соотношения бенз(а)антрацен/бенз(а)антрацен + хризен и флуо-

рантен/флуорантен + пирен указывают на пиролиз углей при образовании ПАУ (Yunker et al., 2002; Sakari, 2012; Tobiszewski, Namieśnik, 2012; Mętrak et al., 2015; Хаустов, Редина, 2017; Шашков, Сидельников, 2022).

Отношение 3-ядерных фенантрена и антрацена позволяет разделять пирогенные и петрогенные ПАУ. Данное соотношение является очень информативным при выявлении образованных в результате пиролиза полиаренов при различных технологиях сжигания и видов топлива (Yunker et al., 2002; Хаустов, Редина, 2019), что очень актуально для Улан-Удэ, где одним из главных источников ПАУ являются работающие на каменном угле ТЭЦ. Значение отношения фенантрена к антрацену >10 индицирует петрогенные источники ПАУ, а <10 – указывает на пирогенные источники. Обратное соотношение антрацен/антрацен + фенантрен указывает на преобладание пирогенных источников образования полиаренов при >0.1 , а значение <0.1 – петрогенных. Отношение бенз(к)флуорантена к бенз(б)флуорантену зависит от расстояния до источника: более высокие значения BkF/BbF определяют наличие локального источника ПАУ, более низкие – свидетельствуют об удаленности источника. Соотношения бенз(а)антрацен/бенз(а)антрацен + хризен >0.4 и флуорантен/флуорантен + пирен >0.5 указывают на вклад пиролиза углей в аккумуляцию ПАУ.

Для идентификации видов конкретных хозяйственной деятельности или источников загрязнения в качестве маркеров используются отдельные наборы ПАУ. При сжигании древесины в окружающую среду в основном поступают 4–5-ядерные флуорантен и БаП, а сжигание угля сопровождается выбросами фенантрена, флуорантена, пирена и хризена. Данный набор полиаренов является основным в выбросах при добыче, транспортировке, хранении, коксовании и сжигании углей (Журавлева и др., 2020). Концентрация 3-ядерного фенантрена может на порядок превышать концентрации других ПАУ и достигать в структуре выбросов 50%. При сжигании углей в меньшем количестве образуются высокомолекулярные БаП и бензо(б)флуорантен (Журавлева и др., 2016). В целом содержание индивидуальных ПАУ в углях зависит от типа исходного растительного материала, участвовавшего в углеобразовании, а также от термодинамических условий протекания

данного процесса (Laumann et al., 2011; Журавлева и др., 2020).

Территория исследования. Улан-Удэ расположен в пределах Иволгино-Удинской межгорной впадины, у слияния рек Селенги и Уды. На западе, севере, северо-востоке город ограничен хребтами Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, на юго-востоке и юге – Селенгинским среднегорьем, хребтами Ганзуринский и Цаган-Дабан. Территория Улан-Удэ относится к Селенгино-Витимской геоморфологической провинции глыбово-сводовых и сводово-глыбовых эрозионно-денудационных горных хребтов и котловин забайкальского типа, геоморфологической области Селенгинское среднегорье (География..., 2016).

Самым холодным месяцем в Улан-Удэ является январь со средней температурой воздуха от -19 до -22 °С, самым теплым – июль с температурой $24-25$ °С. Ориентация нескольких горных хребтов Бурятии с юго-запада на северо-восток обуславливает существование орографического барьера, который затрудняет прохождение влажных воздушных масс на территорию, расположенную к югу и востоку от Байкала, что определяет ее засушливость. Положение Улан-Удэ в котловине и межгорных понижениях способствует формированию более засушливых сухостепных условий. Для региона в целом характерно неравномерное распределение осадков в течение года, и их летний максимум, $80-90\%$ годовых осадков, в регионе выпадает в виде дождей (География..., 2016). Среднее годовое количество осадков в Улан-Удэ колеблется в пределах $300-400$ мм.

В Улан-Удэ в течение года преобладают ветры западных и северо-западных румбов. Среднегодовые скорости ветров в городе не превышают $2-3$ м/с, что объясняется расположением Улан-Удэ в межгорных понижениях и залесенностью (География..., 2016).

Территория Улан-Удэ относится к Хамардабано-Южнозабайкальской средне-горнотаежной, лесостепной и горно-котловинно-степной провинции и горно-долинному Удинско-Хилокскому округу дерново-подбуров, подбуров, буроземов грубогумусовых, аллювиальных, черноземов, серогумусовых, светлогумусовых, черноземов квазиглеевых, каштановых и комплекса засоленных почв. Эта почвенная провинция характеризуется

наличием средне- и относительно мощных, преимущественно суглинистых, кислых, нейтральных и слабощелочных, недостаточно и временно избыточно увлажненных, умеренно холодных и умеренно длительно промерзающих почв с растительностью средней и повышенной продуктивности (Кузьмин, 1993; Экологический..., 2015).

Основными почвами исследуемой территории являются дерново-подбуры на склонах горных хребтов, соответствующие условиям южной тайги, их распространение обусловлено проявлением вертикальной поясности, экспозицией склонов. В межгорных понижениях и котловинах сложились сухостепные условия с преобладанием каштановых почв. На пойменных территориях распространены аллювиальные серогумусовые и темногумусовые почвы (Убугунов и др., 2012; Убугунов, 2020).

В г. Улан-Удэ и пригородах распространены в основном урбаноземы и агроземы, а также антропогенные аналоги аллювиальных гумусовых и темногумусовых почв, черноземов, т. е. урбо-, агро- и урбоагропочвы. Встречаются также серые, серогумусовые и каштановые почвы (Белозерцева и др., 2022).

Под влиянием урбанизации в Улан-Удэ наблюдается техногенная трансформация почв. По содержанию физической глины городские почвы (25.5%) уступают фоновым (31.6%), преобладают супесчаные почвы, различия между функциональными зонами незначительны. Максимальным содержанием физической глины (26.7%) отличаются почвы селитебной одноэтажной зоны, меньше всего ее в почвах транспортной железнодорожной зоны (19.8%). Кислотно-щелочная реакция среды в фоновых почвах нейтральная (рН 7.1), в некоторых зонах города отмечено их слабое подщелачивание. При среднегородском значении рН 7.4 различия между функциональными зонами незначительны, слабощелочная реакция (рН 7.6) характерна для почв промышленной зоны, в рекреационной зоне рН (6.9) ниже фоновых значений.

Минерализация водной вытяжки, определяемая по удельной электропроводности ЕС, в почвах Улан-Удэ составляет в среднем 288 мкСм/см, что в 1.5 раза ниже фоновых значений, при существенной вариабельности внутри функциональных зон. Наибольшей электропроводностью (690 мкСм/см) отличается транспорт-

ная железнодорожная зона, что почти в 2 раза выше, чем в селитебной одноэтажной зоне. Минимальная ЕС (38 мкСм/см) зафиксирована в рекреационной зоне, где противогололедные реагенты используются мало. Среднее по городу содержание органического углерода $C_{орг}$ составляет 3.19% при фоновом содержании 4.3% и высокой пространственной изменчивости. Наиболее высокое содержание $C_{орг}$ отмечено в почвах транспортной железнодорожной (5.5%) и промышленной (4%) зон, наименьшее (2.08%) – в селитебной многоэтажной зоне, что связано со слабым озеленением и незначительным использованием удобрений на придворовых территориях.

Растительность на территории города представлена преимущественно ассоциациями соснового леса с рододендровым подлеском. Растительный покров Улан-Удэ и его окрестностей неоднородный, он испытывает высокую антропогенную нагрузку и повышенную степень деградации из-за сочетания неблагоприятных факторов.

Техногенные источники загрязнения. Улан-Удэ вошел в приоритетный список городов с очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (Базаров и др., 2022). В городе функционирует 3 467 промышленных источников загрязнения атмосферы и более чем 20 000 автономных источников теплоснабжения (Общегородской..., 2013). Основными стационарными источниками загрязнения являются ведущие предприятия городской теплоэнергетики ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 и крупные промышленные предприятия: локомотивовогоремонтный, авиационный заводы, завод по производству металлических конструкций “Улан-Удэстальмост” (рис. 1). В меньшей степени загрязнение городской среды связано с предприятиями строительной (кирпичный, бетонный, силикатный заводы) и пищевой (птицефабрики, мясокомбинат, кондитерский завод) промышленности, стекольным, судостроительным заводами (Дамбиев и др., 2016; Григорьева, Коновалов, 2018). Источниками поллютантов служат также золошлакоотвалы ТЭЦ, очистные сооружения города, свалка ТБО. В 2022 г. в атмосферный воздух Улан-Удэ поступило 23.3 тыс. тонн выбросов от стационарных источников загрязнения. Основными поллютантами

являются диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, взвешенные частицы (Гос. доклад..., 2023). Контроль загрязнения воздуха ПАУ по БаП выполнен в 2017–2019 гг. в 142 городах РФ, включая города Байкальского региона – Слюдянку, Байкальск, Листвянку (Корунов и др., 2020), однако Улан-Удэ, на территории которого размещены более мощные источники загрязнения ПАУ, в этот перечень не вошел.

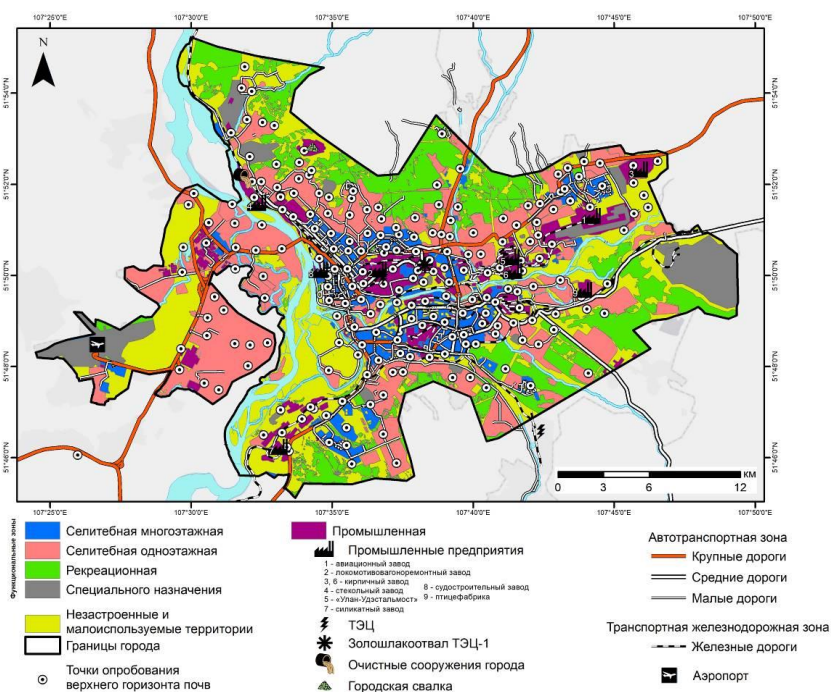


Рис. 1. Карта функционального зонирования территории г. Улан-Удэ с точками отбора почвенных проб и крупными источниками загрязнения.

Fig. 1. Map of land use zones of the city of Ulan-Ude with soil sampling sites and main pollution sources.

Главные объекты теплоэнергетики – Улан-Удэ ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 – работают на тугнуйских каменных углях. Анализ содержания ПАУ в образцах тугнуйского угля и золошлаковых отходов

двух ТЭЦ показал, что сумма 16 рассматриваемых ПАУ в образце угля достигает 19 188 нг/г с высокой долей каждой группы ПАУ. Низко- и высокомолекулярные структуры составляют 30.1 и 29.3% от суммы ПАУ, преобладают среднемолекулярные ПАУ с долей 40.6%. Состав тугуйских углей определяется 2–3-ядерными нафталином (10.6% от суммы ПАУ) и фенантrenom (10.9%), 4-ядерными хризенom (16.4%), флуорантеном (10.9%), пиреном (8.8%), 5–6-ядерными бензо(b)флуорантеном (9.2%) и бензо(ghi)периленом (7.4%).

В золошлаковых отходах двух улан-удэнских ТЭЦ относительно близкое суммарное содержание полиаренов: 68 нг/г – ТЭЦ-1, 72.2 нг/г – ТЭЦ-2. В отходах ТЭЦ-1 на долю низко- и среднемолекулярных структур приходится 40 и 42.1% соответственно, высокоядерных ПАУ значительно меньше – 17.9%. В структуре ПАУ золошлака ТЭЦ-1 доминируют 3-ядерный фенантрен (26.7%) и 4-ядерные флуорантен (16.7%), хризен (11.7%) и пирен (9.5%). В отходах ТЭЦ-2 наблюдается похожая картина: преобладают низко- и среднемолекулярные ПАУ, доли которых 43.1 и 43.2% соответственно, а именно: низкомолекулярный фенантрен (29.4%) и среднемолекулярные флуорантен (15.3%), хризен (10.1%), бенз(a)антрацен (9.8%) и пирен (7.9%).

С промышленным сжиганием нефти связано поступление флуорантена, пирена, хризена. При сжигании бытовых отходов образуются пирен, фенантрен, флуорантен (Хаустов, Редина, 2019).

Улан-Удэ является крупным транспортным узлом, через него проходит участок Транссибирской магистрали и федеральная автотрасса “Байкал”. Таким образом, помимо стационарных источников, поступление поллютантов в городскую среду обусловлено автомобильным и железнодорожным транспортом и объектами их инфраструктуры. Автотранспортный поток в городе на 77% состоит из легковых автомобилей, около 21% связано с движением грузового транспорта, из которых 11% приходится на долю дизельных автомобилей.

Оценка выбросов автотранспорта также была выполнена Санкт-Петербургским институтом прикладной экологии и гигиены (ИПЭГ) в 2012 г., в рамках которой проведены натурные об-

следования интенсивности и состава автотранспортных потоков на основных дорогах Улан-Удэ. По объему выбросов в атмосферу – 23.5 тыс. тонн в год – автотранспорт в Улан-Удэ не уступает стационарным источникам. Наибольшая интенсивность движения в городе (более 5 000 авт./час) зафиксирована на ул. Бабушкина, наименее загруженной является ул. Домостроительная (70 авт./час). На других 15 автодорогах города также установлена высокая интенсивность движения транспорта – 2 000–5 000 авт./час.

Состав автотранспортных выбросов представлен в основном 4–6-ядерными соединениями, если используется бензин, тогда как от сжигания дизельного топлива больше поступают более “легкие” структуры ПАУ (Miguel et al., 1998). Так, при сжигании бензина в двигателях автомобилей в выбросах концентрируются высокомолекулярные бензо(ghi)перилен и индено(1,2,3-cd)-пирен, а от автомобилей на дизельном топливе – аценафтилен, фенантрен, флуорантен и пирен с высокой долей бензо(k)флуорантена и бензо(b)флуорантена. Нафталин преобладает среди низкомолекулярных структур в выбросах автомобилей независимо от вида топлива (Mart et al., 1999; Медведева, 2013). Под влиянием автотранспорта в почвах интенсивно накапливаются 3-ядерные фенантрен и антрацен, 4-ядерные флуорантен и пирен, 5–6-ядерные бензо(b)флуорантен, БаП, бензо(ghi)перилен и индено(1,2,3-cd)-пирен (Morville et al., 2004; Devos et al., 2006; Emoyan et al., 2020).

В городе широко распространены районы с индивидуальной жилой застройкой, которая не подключена к центральной системе тепловодоснабжения. В Улан-Удэ насчитывается около 43 тыс. индивидуальных жилищных строений такого типа. В этих районах города в отопительный сезон используют автономные источники теплоснабжения – котлы и печи, в которых сжигается в основном древесина хвойных пород и в меньшей степени уголь. При сжигании углей в частных домах могут формироваться техногенные аномалии, связанные с накоплением в почвах аценафтилена, антрацена, пирена, хризена, флуорантена, бенз(а)антрацена, БаП (Bojakowska, Sokołowska, 2001; Касимов и др., 2016).

В 2012 г. Санкт-Петербургским институтом прикладной экологии и гигиены (ИПЭГ) была проведена оценка загрязнения атмосферного воздуха автономными источниками теплоснабже-

ния с обследованием 1 015 источников (5% от их общего числа в городе), которые обеспечивают теплом 995 домов в разных районах Улан-Удэ. Установлено, что в 77.7% случаев в качестве автономных источников теплоснабжения используют печи, а в 22.3% случаев котлы, при этом 50% всех котлов являются самодельными. Доля древесины, используемой в качестве топлива в данных отопительных системах, оценивается в 81.9%, преобладают (93% от всей сжигаемой древесины) сосновые дрова. На уголь приходится 17.4%, 77% от которого составляет тугнуйский каменный уголь.

Поступление полиаренов в городские почвы связано и с влиянием лесных пожаров. Установлено, что при горении хвойной растительности образуются в основном низкомолекулярные структуры, такие как нафталин и флуорен, возможно поступление 4-ядерного пирена. В небольшом количестве в разных соотношениях поступают 4–6-ядерные бензо(ghi)перилен, хризен, бенз(а)антрацен; образование средне- и высокомолекулярных ПАУ связано с горением смолистых компонентов древесины (Цибарт, Геннадиев, 2011; Максимова и др., 2013).

Большинство одних и тех же средне- и высокомолекулярных соединений ПАУ могут поступать из различных источников, т. е. похожие наборы поллютантов могут аккумулироваться в почвенном покрове и от выбросов автотранспорта, и от объектов теплоэнергетики, при этом в условиях города происходит их наложение. Это учитывалось при анализе и выявлении основных источников поллютантов в отдельных функциональных зонах, так как их загрязнение формируется под воздействием не только локальных, но и удаленных источников, расположенных в других зонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ПАУ в фоновых и городских почвах. Состав ПАУ в верхнем слое фоновых и городских почв показан на рисунке 2. По сравнению с фоном в структуре загрязнения городских почв наблюдается более равномерное распределение долей индивидуальных ПАУ. В городе заметно выше содержание 2–3-ядерных антрацена (12%), нафталина (9%), флуорена (7%) и 4-ядерного бенз(а)антрацена (7%). В фоновых почвах вариабельность долей

ПАУ значительнее, больше всего накапливаются средне- и высокомолекулярные структуры: флуорантен (16%), бензо(ghi)перилен (13%), пирен (12%), бензо(b)флуорантен (11%). Доля большинства 2–3-ядерных ПАУ не превышает 1%, только у фенантрена она составляет 10%.

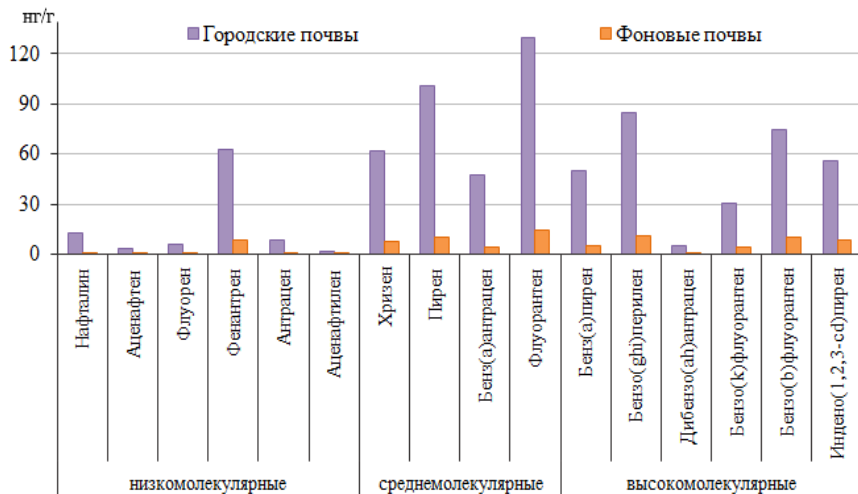


Рис. 2. Содержание индивидуальных полиаренов в почвах Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Fig. 2. PAHs content in urban and background soils of the city of Ulan-Ude.

Среднее содержание суммы всех 16 анализируемых ПАУ в городских почвах 735 нг/г превышает фоновые значения в 8.5 раз. Наибольшей суммой – 2 102 нг/г – характеризуется транспортная железнодорожная зона, что превышает ее величину в других функциональных зонах в 2.6–5.2 раза (табл. 2, рис. 3). По уровню содержания ПАУ в почвах выделяются также автотранспортная (806 нг/г) и промышленная (797 нг/г) зоны.

Соотношение низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ указывает на преобладание последних в почвах функциональных зон Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Таблица 2. Сумма ПАУ, среднее %-ное содержание низко- (Н), средне- (С) и высокомолекулярных (В) ПАУ и соотношение между ними в верхнем горизонте почв по функциональным зонам Улан-Удэ и в фоновых почвах
Table 2. The total content of PAHs, the average percentage of low- (H), medium- (C) and high-molecular-weight (H) PAHs and the ratio between them in the upper soil horizon in the land use zones of Ulan-Ude and in background soils

Функциональные зоны города	Сумма ПАУ, нг/г	Доля Н в сумме ПАУ	Доля С в сумме ПАУ	Доля В в сумме ПАУ	Соотношение Н : С : В
Промышленная (41)	797	16.3%	46.8%	37.0%	1: 2.9: 2.3
Селитебная многоэтажная (56)	487	11.0%	42.1%	46.9%	1: 3.8: 4.2
Селитебная одноэтажная (76)	789	10.8%	46.1%	43.0%	1: 4.3: 4.0
Автотранспортная (22)	806	14.0%	40.1%	45.9%	1: 2.9: 3.3
Транспортная железнодорожная (7)	2102	16.8%	60.9%	22.3%	1: 3.6: 1.3
Рекреационная (18)	405	12.3%	44.3%	43.4%	1: 3.6: 3.5
Город в целом (220)	735	12.8%	46.3%	40.9%	1: 3.6: 3.2
Фон (12*)	87	12.6%	41.9%	45.5%	1: 3.3: 3.6

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Вариабельность данных соотношений среди функциональных зон незначительна, за исключением транспортной железнодорожной зоны, где доля среднемoleкулярных ПАУ увеличивается до 61%, а высокомолекулярных – уменьшается до 22 %.

В фоновых почвах концентрации ПАУ незначительны, их сумма составляет всего 87 нг/г (табл. 3). Так же, как в городских почвах, доминируют средне- и высокомолекулярные соединения, их концентрации составляют 36.4 и 39.6 нг/г соответственно. Среди низкомолекулярных соединений интенсивнее всего накапливается фенантрен (8.6 нг/г), из среднемoleкулярных ПАУ – флуорантен (14.2) и пирен (10.2). Бензо(ghi)перилен (11.4 нг/г), бензо(b)флуорантен (9.9), индено(1,2,3-cd)пирен (8.1) преобладают среди высокоядерных полиаренов.

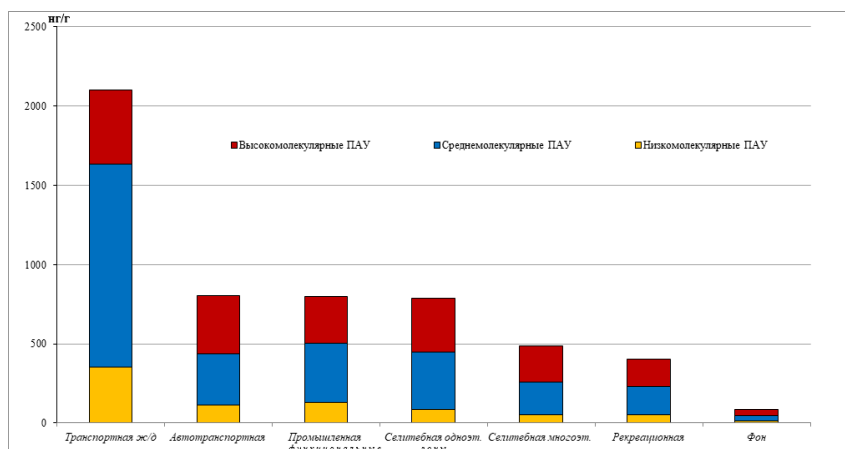


Рис. 3. Содержание низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ в верхнем горизонте почв по функциональным зонам Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Fig. 3. Content of low-, medium- and high-molecular-weight PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude.

Таблица 3. Среднее содержание ПАУ в верхнем (0–10 см) горизонте почв по функциональным зонам г. Улан-Удэ, нг/г

Table 3. Mean content of PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude, ng/g

ПАУ (количество колец)	Фон (12*)	Промышленная (41)	Жилая многоэт. (56)	Жилая одноэт. (76)	Автотранспортная (22)	Транспортная ж/д (7)	Рекреационная (18)	Среднее в городе (220)
Нафталин (2)	0.88	15.4	5.61	14.7	12.1	35.8	6.36	12.5
Аценафтен (2)	0.32	5.06	1.57	2.99	3.13	7.20	1.71	3.08
Флуорен (3)	0.59	10.5	3.29	5.83	6.19	17.2	3.62	6.29
Фенантрен (3)	8.56	86.1	38.7	50.7	82.1	270	33.2	62.7
Антрацен (3)	0.45	10.1	3.63	9.64	7.79	20.4	4.27	8.11
Аценафтилен (3)	0.15	2.41	0.85	1.51	1.58	2.55	0.86	1.50
Сумма низкомолекулярных ПАУ	10.9	130	53.7	85.4	113	353	50	94.2
Хризен (4)	7.44	67.9	40.4	68.3	60.5	179	33.8	62.0
Пирен (4)	10.2	113	57.8	107	95.5	408	50.6	101
Бенз(а)антрацен (4)	4.60	48.1	30.8	56.9	45.2	110	24.5	47.5
Флуорантен (4)	14.2	144	75.8	132	122	583	70.7	130

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

ПАУ (количество колец)	Фон (12*)	Промышленная (41)	Жилая многоэт. (56)	Жилая одноэт. (76)	Автотранспортная (22)	Транспортная ж/д (7)	Рекреационная (18)	Среднее в городе (220)
Сумма среднемолекулярных ПАУ	36.4	373	205	364	323	1280	180	341
Бенз(а)пирен (5)	5.51	47.7	35.9	62.2	53.8	59.9	26.7	50.0
Дибензо(ah)антрацен (5)	0.58	5.89	3.14	5.60	6.71	8.22	2.70	5.06
Бензо(k)флуорантен (5)	4.16	28.9	22.1	35.9	32.3	63.1	18.5	30.7
Бензо(b)флуорантен (5)	9.88	72.6	54.9	81.4	83.4	182	42.8	74.2
Бензо(ghi)перилен (6)	11.4	86.3	66.1	91.9	118	101	51.5	84.7
Индено(1,2,3-cd)пирен (6)	8.10	53.2	45.9	62.6	76.0	54.3	33.6	55.9
Сумма высокомолекулярных ПАУ	39.6	295	228	340	370	469	176	301

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Наибольшими концентрациями низкомолекулярных ПАУ характеризуются почвы транспортной железнодорожной зоны – 353 нг/г, что в 3.75 раза превышает среднюю для города величину. Довольно высокое содержание низкомолекулярных ПАУ в промышленной (130 нг/г) и автотранспортной (113 нг/г) зонах. Во всех функциональных зонах Улан-Удэ наиболее интенсивно аккумулируется 3-ядерный фенантрен, с меньшей интенсивностью – нафталин и антрацен. Железнодорожная зона значительно опережает другие зоны города по накоплению и средне- и высокомолекулярных ПАУ. Содержание среднемoleкулярных ПАУ достигает 1280 нг/г, в основном за счет флуорантена (583 нг/г) и пирена (408 нг/г).

ПАУ являются приоритетными органическими поллютантами, связанными с деятельностью автомобильного и железнодорожного транспорта. Это подтверждают работы по изучению влияния железнодорожного транспорта на загрязнение почв ПАУ в Польше (Wiłkomirski et al., 2018). Их поступление при эксплуатации железнодорожного транспорта связано с (1) мобильными источниками, такие как локомотивы и другие элементы подвижного состава, (2) износом элементов конструкций подвижного состава, (3) испарением нефтепродуктов, использовавшихся для консервации железнодорожных шпал, (4) утечкой топлива и грузов, (5) сжиганием топлива, масел, горюче-смазочных материалов и других нефтепродуктов, используемых при эксплуатации подвижных составов (Wiłkomirski et al., 2011; Wiłkomirski et al., 2018).

Анализ содержания ПАУ в почвах, приуроченных к железнодорожным зонам на северо-востоке Польши, выявил неодинаковую интенсивность аккумуляции полиаренов на участках разного функционального назначения. Так, суммарная концентрация 17 исследованных ПАУ в почвах существенно возрастает от участка очистки подвижного состава (1 867–15 376 нг/г) до максимальной вблизи железнодорожной платформы (10 647–62 289 нг/г). Загрязнение почв под воздействием железных дорог определяется в основном 4- и 5-ядерными структурами ПАУ, в наименьшей степени – 3-ядерными соединениями. Среди 4–6-ядерных ПАУ интенсивно аккумулируются флуорантен, пирен, хризен, бензо(b)флуорантен, бензо(ghi)перилен, БаП (Mętrak et al., 2015).

Изучение экологического состояния двух основных железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы (Белорусский вокзал и Три вокзала) показало повышенное содержание БАП на участках, прилегающих к железнодорожному полотну. Содержание БАП в почвах на объекте “Белорусский вокзал” варьировало от 6.2 до 11 890 нг/г при среднем содержании 570 нг/г. Превышения средней концентрации БАП относительно фоновых почв, расположенных вблизи объекта, достигают почти в 36 раз. На железнодорожном объекте “Три вокзала” содержание БАП находится в пределах 30–3 890 нг/г при средней концентрации 470 нг/г. Среднее содержание БАП в почвах данного объекта превышает фоновые концентрации в 94 раза. По кратности превышения ПДК в почвах этих железнодорожных объектов установлены высокий (Три вокзала) и очень высокий (Белорусский вокзал) уровни загрязнения (Макаров, 2014).

Проведено сравнение полученных для почв Улан-Удэ результатов с данными для почв Байкальска (Иркутская обл.). Источниками ПАУ в обоих городах являются выбросы промышленных предприятий и теплоэнергетики (в Байкальске это целлюлозно-бумажный комбинат и местная ТЭЦ), а также авто- и железнодорожный транспорт. Как и в Улан-Удэ, через Байкальск проходит федеральная автотрасса “Байкал” и участок Транссибирской магистрали. Установлено, что во всех функциональных зонах Байкальска интенсивнее всего аккумулируются флуорантен и бензо(б)флуорантен, они на 61.1 и 29.4% определяют загрязнение почвенного покрова ПАУ в Байкальске (Кошелева и др., 2024). В почвах Улан-Удэ более разнообразный состав загрязнения, несмотря на доминирование 4-ядерных флуорантена и пирена (рис. 2). В почвах Байкальска аккумуляция 4-ядерных полиаренов составляет 62.3% от суммы 16 анализируемых ПАУ, 30.7% приходится на долю высокомолекулярных соединений. Для почв Улан-Удэ также характерно преобладание средне- и высокомолекулярных ПАУ, однако среднемолекулярные полиарены незначительно превышают долю 5–6-ядерных, тогда как в Байкальске превышение составляет более чем в 2 раза.

Соотношения между тремя группами ПАУ в функциональных зонах Байкальска сильно варьируют. В почвах промышлен-

ной и рекреационной зон доля 4-ядерных ПАУ достигает 89 и 90%, в автотранспортной 34%, в железнодорожной транспортной 67%. Автотранспортная зона является единственной с максимальной долей высокомолекулярных ПАУ (56%). Для Улан-Удэ характерны незначительные колебания в соотношении средне- и высокомолекулярных ПАУ, за исключением транспортной железнодорожной зоны, где доля 4-ядерных ПАУ больше 5–6-ядерных в 2.7 раза (табл. 2). В Байкальске загрязнение почв в автотранспортной зоне более чем в 13 раз выше, чем в железнодорожной, что говорит о более значительном влиянии автотранспорта на аккумуляцию ПАУ в почвах. Промышленная зона уступает по сумме ПАУ автотранспортной в 1.8 раза. В Улан-Удэ сумма полиаренов в железнодорожной транспортной зоне, наоборот, превышает автотранспортную и промышленную зоны в 2.6 раза. В целом превышение в содержании ПАУ в почвах Байкальска над фоновыми составляет 5 раз, а в Улан-Удэ оно достигает в 8.5 раза.

Пространственное распределение ПАУ в городских почвах. Сумма всех 16 исследуемых ПАУ в почвенном покрове Улан-Удэ варьирует в диапазоне 17–9 540 нг/г. В 77 пробах верхнего горизонта почв, то есть на 35% территории Улан-Удэ, концентрация суммы ПАУ не превышает 250 нг/г. Около 22% площади города занято почвами с суммарным содержанием полиаренов в пределах 250–500 нг/г, на 26% площади города значение суммы ПАУ колеблется от 500 до 1 000 нг/г, на 10% – от 1 000 до 2 000 нг/г, а на 3% территории Улан-Удэ – от 2 000 до 3 000 нг/г.

Наиболее высокие уровни концентрации суммы ПАУ – 3 226–9 540 нг/г – установлены в 9 точках опробования (4% городской территории). Они образуют девять наиболее контрастных локальных аномалий в почвах города, показанных пунсонами голубого и синего цвета на рисунке 4.

В аномалии 1, которая расположена в железнодорожной функциональной зоне, сумма ПАУ достигает 3 226 нг/г. Эта аномалия располагается вблизи железнодорожных путей, станции Заудинской и промзоны, в 360 м северо-восточнее находится мясокомбинат. Неподалеку складировается строительный мусор и движутся грузовые автомобили по частично грунтовой, частично ас-

фальтированной автодороге. Загрязнение почв в данной аномалии обусловлено преимущественно среднемолекулярными ПАУ, их доля достигает 76%. Интенсивнее всего накапливаются флуорантен и пирен: их вклады в сумму ПАУ равны 34.5 и 26.8% соответственно.

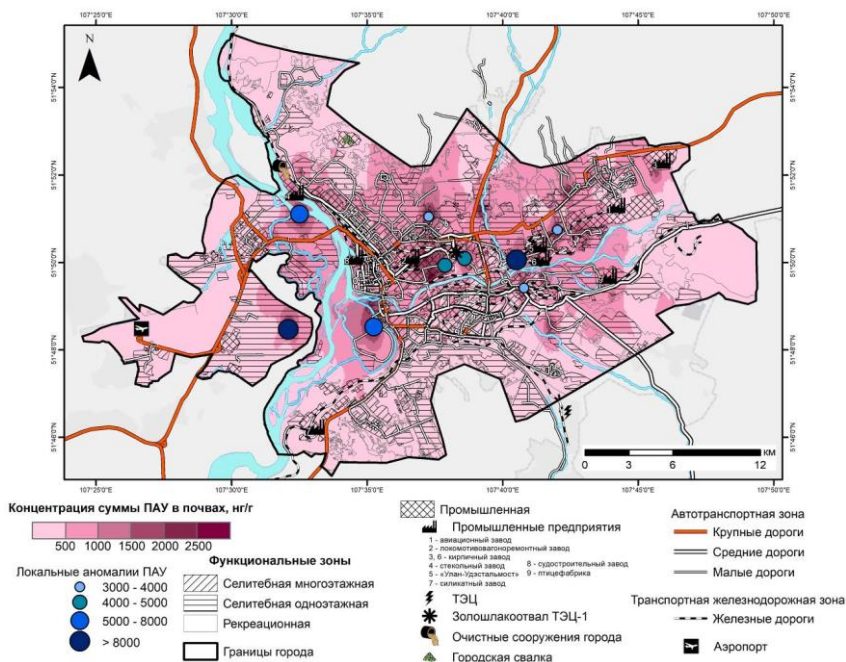


Рис. 4. Распределение суммы ПАУ в верхнем (0–10 см) слое почв г. Улан-Удэ.

Fig. 4. Distribution of total content of PAHs in in the upper horizon of soils of the city of Ulan-Ude.

В локальной аномалии 2 сумма ПАУ составляет 3 887 нг/г. Она расположена в селитебной одноэтажной зоне вблизи гаражного кооператива, севернее промзоны локомотивовогоноремонтного завода. Этот участок занимает среднюю часть склона, т. е. нахо-

дится в трансэлювиальной позиции. На 48% аномалия сформирована среднемолекулярными ПАУ, главным образом флуорантен и пирен, среди высокомолекулярных полиаренов следует отметить бензо(ghi)перилен. Доля флуорантена и пирена составляет 19.1 и 15.6% от общей суммы ПАУ, доля бензо(ghi)перилена – 10.6%.

Локальная аномалия 3, где суммарная концентрация ПАУ достигает 3 974 нг/г, расположена в северо-восточной части Улан-Удэ, в пос. Матросова. Она находится в одноэтажной селитебной зоне, в 500 м от промплощадки авиационного завода и 650–700 м от предприятия “Улан-Удэстальмост”. Загрязнение почв этого участка, вероятно, обусловлено близостью промышленных объектов и продуктами сжигания угля и древесины в котлах и печах частной застройки. В данной аномалии, как и в предыдущей, специфику загрязнения на 48% определяют среднемолекулярные структуры. Интенсивнее всего аккумулируются 4-ядерные флуорантен и пирен, а также 5-ядерный бензо(b)флуорантен, их доли в общей структуре загрязнения составляют 15, 14.5 и 12.5% соответственно.

Локальная аномалия 4 с суммой ПАУ 4 194 нг/г находится в промышленной зоне, приуроченной к золошлакоотвалу ТЭЦ-1 в центральной части города. В ее формировании участвуют в основном средне- и высокомолекулярные полиарены: среди 4-ядерных соединений – флуорантен (38.5%) и пирен (31%), а среди 5–6-ядерных ПАУ – бензо(ghi)перилен (33%). На долю данных поллютантов приходится 17.7, 14.3 и 14.2% от общей суммы ПАУ соответственно.

Пятая аномалия, где сумма ПАУ составляет 4 382 нг/г, расположена на незначительном расстоянии от предыдущей, в центральной части города, вблизи промышленной зоны ТЭЦ-1 и локомотивовогоноремонтного завода. Аномалия находится в автотранспортной зоне, вблизи крупной асфальтированной дороги, к ней примыкает жилая одноэтажная зона. Аномалия на 73% определяется средне- и высокомолекулярными ПАУ. Среди 4-ядерных ПАУ интенсивнее всего аккумулируются флуорантен и пирен, в структуре общего загрязнения их доли составляют 13.4 и 11.2%. Среди высокомолекулярных ПАУ почти одинаковый вклад (13.9–

10.6%) в суммарное загрязнение дают четыре соединения: бензо(ghi)перилен, бензо(b)флуорантен, индено(1,2,3-cd)пирен и БаП.

Шестая локальная аномалия расположена на острове Богородский. Суммарная концентрация ПАУ здесь составляет 5 415 нг/г. Примечательно, что аномалия удалена от промышленных зон, а ближайшая селитьба находится более чем в 1 км юго-западнее. Данная аномалия находится вблизи асфальтированной дороги, по которой движется спецтехника на дизельном топливе, и административных зданий Муниципального унитарного предприятия “Водоканал”. На острове коммунальными службами минимум два раза в год проводятся санитарные рубки и сжигание сухостоя, а также сжигание сухой травы для защиты водозаборных сооружений. Аномалия характеризуется незначительной аккумуляцией низкомолекулярных ПАУ с долей 9% от суммы ПАУ. Среди среднемолекулярных структур доминируют флуорантен и пирен (36.8 и 29.8% от суммы данной группы ПАУ и 16.8 и 13.6% от общей суммы полиаренов). Из 5–6-ядерных соединений интенсивнее всего накапливаются бензо(ghi)перилен (27.8% от суммы данной группы ПАУ), бензо(b)флуорантен (21.5%) и бенз(a)пирен (20.8%), их доли от суммы ПАУ – 12.6, 9.8 и 9.5% соответственно. Перечисленные 4–6-ядерные полиарены определяют на более чем 62% уровень содержания ПАУ в данной аномалии.

Следующие две локальные аномалии 7 и 8 сформировались в почвах левобережья р. Селенги, в пределах селитебной одноэтажной зоны. Аномалия 7, где сумма полиаренов равна 6 785 нг/г, расположена севернее 8-ой, в ней доминируют средне- и высокомолекулярные структуры с концентрациями 3 159 и 3 563 нг/г при доле 2–3-ядерных соединений менее 1%. Среди 4-ядерных полиаренов интенсивно аккумулируются флуорантен и пирен с долями 29.4 и 26.6% от суммы среднемолекулярных ПАУ и 13.7 и 12.4% от всех ПАУ. На бензо(ghi)перилен, бензо(b)флуорантен и БаП приходится 25.9, 22 и 21% от всех 5–6-ядерных ПАУ, в суммарном содержании ПАУ их доля составляет 13.6, 11.5 и 11% соответственно. Перечисленные средне- и высокоядерные ПАУ составляют более чем 62% суммы ПАУ.

В аномалии 8 сумма ПАУ достигает 8 468 нг/г, она так же обусловлена средне- и высокомолекулярными ПАУ, доля низкомолекулярных ПАУ составляет менее 4%. Из 4-ядерных структур преобладают флуорантен и пирен (31.6 и 33.4% от суммы всех среднемолекулярных ПАУ). Среди 5–6-ядерных соединений интенсивно аккумулируются бензо(ghi)перилен (24% от суммы высокомолекулярных ПАУ), бензо(b)флуорантен (23.3%), БаП (20.9%) и индено(1,2,3-cd)пирен (20.2%). В общей сумме ПАУ 15.3% приходится на пирен, 14.5% – на флуорантен, 12.1% – бензо(ghi)перилен, 11.7% – бензо(b)флуорантен, 10.5% – БаП, 10.2% – индено(1,2,3-cd)пирен, что составляет более 74% общей суммы.

Абсолютный максимум суммы ПАУ 9 540 нг/г зафиксирован в локальной аномалии 9 в транспортной железнодорожной зоне. Аномалия примыкает на юге к небольшой промышленной зоне, где размещены малые предприятия по обработке металла, ремонту автомобилей и изготовлению мебели, севернее нее проходит асфальтированная автодорога, а в 350 м к востоку расположен бетонный завод. В этой аномалии интенсивно накапливается 3-ядерный фенантрен (1 461 нг/г), что составляет 77.7% от суммы всех низкомолекулярных ПАУ и 15.3% от суммы всех 16 рассматриваемых ПАУ. Среди среднемолекулярных соединений лидируют флуорантен и пирен (2 612 и 1 701 нг/г), они на 46.5 и 30.3% определяют загрязнение данной группой ПАУ и на 27.4 и 17.8% – загрязнение всеми ПАУ. В группе высокомолекулярных соединений выделяется бензо(b)флуорантен (891 нг/г), что составляет 43.7% от всех 5–6-ядерных ПАУ и 9.3% от суммы ПАУ. Таким образом, флуорантен, пирен, фенантрен и бензо(b)флуорантен на 70% определяют загрязнение этого участка железнодорожной зоны.

Устанавливая источники ПАУ в рассмотренных аномалиях, следует учитывать наложение нескольких видов источников. Аномалии 1 и 9 сформировались в основном под воздействием железнодорожной инфраструктуры, при этом близость автомобильных дорог обусловила поступление полиаренов от легкового и грузового транспорта. Кроме того, вблизи данных аномалий расположены предприятия пищевой и строительной промышленности, выбросы которых также могут содержать ПАУ. В образо-

вании аномалий 3–5 ведущую роль сыграли крупные промышленные предприятия, однако нельзя не отметить влияние одноэтажной жилой зоны, где для генерации тепла и приготовления пищи сжигаются уголь и древесина. Этот источник ПАУ определенно сказывается и на усилении контрастности аномалий 7 и 8.

Анализируя состав всех локальных аномалий ПАУ, следует выделить пару флуорантен–пирен: эти 4-ядерные ПАУ доминируют не только среди среднемолекулярных соединений, но и выступают как приоритетные поллютанты в целом среди всех 16 исследуемых ПАУ. Значительная роль в формировании аномалий принадлежит также высокомолекулярным полиаренам – бензо(ghi)перилену, бензо(b)флуорантену и БаП. Можно отметить и индено(1,2,3-cd)пирен, который в значительных концентрациях присутствует в аномалиях 5 и 8. Данная группа средне- и высокомолекулярных ПАУ образует основное “ядро” аномалий, где их суммарный вклад в загрязнение ПАУ достигает 73–74%.

Индикаторные соотношения ПАУ. Соотношение антрацена A к сумме антрацена и фенантрена P используется для разделения петрогенных и пирогенных источников ПАУ. Для города в целом и для большей части функциональных зон города среднее значение $A/(A+P) > 0.1$, что указывает на преобладание пирогенных источников ПАУ (табл. 4). Однако если рассматривать распределение значений данного соотношения по функциональным зонам, то однозначного вывода о доминировании одного типа источника сделать нельзя. Более половины точек опробования (57.7%) характеризуются значением $A/(A+P) < 0.1$, что говорит о преобладании петрогенных источников ПАУ. Так, в двух транспортных зонах средние значения составляют 0.07 и 0.09, при этом на 100% территории железнодорожной зоны значения $A/(A+P) < 0.1$. Для промышленной и в селитебной одноэтажной зон средние соотношения равны 0.10 и 0.14, а значения $A/(A+P) < 0.1$ наблюдаются на 65.8 и 48.3% территории данных зон соответственно. Это говорит об изменении роли и степени воздействия пирогенных и петрогенных источников в пределах отдельных функциональных зон.

Таблица 4. Индикаторные отношения ПАУ в верхнем горизонте городских почв по функциональным зонам г. Улан-Удэ

Table 4. Indicator ratios of PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude

Индикаторное отношение		Промышленная (41*)	Транспортная авто (22)	Транспортная ж/д (7)	Селитебная многоэт. (56)	Селитебная одноэт. (76)	Рекреационная (18)	Город в целом (220)
Антрацен/ антрацен+фенантрен <i>A/(A+P)</i>	Среднее	0.10	0.09	0.07	0.11	0.14	0.13	0.12
	Мин.	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	Макс.	0.27	0.22	0.09	0.37	0.80	0.44	0.80
Фенантрен/ антрацен <i>P/A</i>	Среднее	11.2	11.9	13.9	10.7	9.68	9.16	10.5
	Мин.	2.72	3.46	10.6	1.72	0.26	1.26	0.26
	Макс.	25.2	24.3	23.4	24.6	24.6	21.3	25.2
Бенз(к)флуорантен/ бенз(б)флуорантен <i>BkF/BbF</i>	Среднее	0.38	0.38	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
	Мин.	0.18	0.28	0.30	0.31	0.21	0.36	0.18
	Макс.	0.56	0.56	0.45	0.56	0.59	0.50	0.59

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Индикаторное отношение		Промышленная (41*)	Транспортная авто (22)	Транспортная ж/д (7)	Селитебная многоэт. (56)	Селитебная одноэт. (76)	Рекреационная (18)	Город в целом (220)
Флуорантен/ флуорантен + пирен <i>FL/(FL+PY)</i>	Среднее	0.57	0.56	0.57	0.57	0.58	0.59	0.58
	Мин.	0.49	0.53	0.52	0.50	0.49	0.49	0.49
	Макс.	0.63	0.60	0.61	0.61	0.66	0.65	0.66
Бенз(а)антрацен/ бенз(а)антрацен + хризен <i>BaA/(BaA+C)</i>	Среднее	0.40	0.39	0.40	0.42	0.40	0.41	0.41
	Мин.	0.29	0.29	0.37	0.28	0.27	0.36	0.27
	Макс.	0.48	0.51	0.45	0.51	0.54	0.50	0.54

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Наиболее высокие значения $A/(A+P)$ выявлены в почвах селитебной одноэтажной зоны (0.8 и 0.7). Первый максимум (0.8) находится на левобережье Селенги, второй – на северо-восточной окраине Улан-Удэ, оба максимума приурочены к жилым кварталам с индивидуальными системами отопления, в которых сжигают древесину и уголь.

Другой вариант отношения 3-ядерных фенантрена и антрацена P/A так же используется для разделения пирогенных и петрогенных источников. Данное соотношение является очень информативным для определения образовавшихся в результате пиролиза полиаренов при различных технологиях сжигания и видах топлива (Yunker et al., 2002; Хаустов, Редина, 2019). Значение $P/A > 10$ индицирует петрогенные ПАУ, а < 10 указывает на пирогенные ПАУ. Среднее значение P/A в почвенном покрове Улан-Удэ 10.5 и в большинстве функциональных зон оно больше 10 (табл. 4), что указывает на незначительное преобладание петрогенных источников, хотя на 50% территории города $P/A < 10$. Рекреационная и селитебная одноэтажная зоны характеризуются наименьшими средними значениями данного соотношения (9.16 и 9.68). Самое высокое значение 13.9 установлено в транспортной железнодорожной зоне.

Рассматривая разброс значений P/A в каждой зоне, можно отметить наличие разных типов источников в каждой зоне. Например, в промышленной зоне минимум $P/A = 2.72$, т. е. близко к 3, что указывает на сжигание древесины и угля. Максимум (25.2) определенно связан с хранением и использованием различных видов нефтепродуктов и топлива при эксплуатации транспортных средств, так как участки железных дорог часто проходят вблизи промышленных предприятий и используются для транспортировки сырья и готовой продукции.

Сопоставление результатов диагностики преобладающего в каждой функциональной зоне типа источников ПАУ показало их совпадение при выраженном отклонении средних значений $A/(A+P)$ и P/A от пороговых и расхождение при приближении к ним. Так, в железнодорожной зоне, согласно обоим показателям, в почвах преобладают петрогенные источники, тогда как в селитебной одноэтажной и рекреационной зонах доминируют пироген-

ные. В других зонах наблюдается значительная пространственная вариабельность значений обоих соотношений, показывающих преобладание то одного, то другого типа источников ПАУ.

Отношение бенз(к)флуорантена к бенз(б)флуорантену BkF/BbF зависит от расстояния до источника: более высокие значения BkF/BbF определяют наличие локального источника ПАУ, более низкие свидетельствуют о его удаленности (Aubin, Farant, 2000). Среднее для города значение $BkF/BbF = 0.40$ при слабом варьировании между функциональными зонами (0.38–0.42). Максимум $BkF/BbF = 0.59$ зафиксирован в селитебной одноэтажной зоне, что объясняется близостью участка опробования к жилым домам с печным отоплением и гаражному кооперативу, откуда поступает загрязнение от автотранспорта. Другой максимум (0.56) обнаружен в промзоне центральной части города, которая примыкает к золошлакоотвалу ТЭЦ-1 и вблизи которой проходит крупная автодорога. В лесном массиве рекреационной зоны выявлен минимум (0.36) в нескольких метрах от автодороги и в 40–60 м от одноэтажной селитьбы. В этой же зоне обнаружено высокое значение $BkF/BbF = 0.50$, на территории сквера в нижней части склона, что может быть связано с выносом ПАУ из вышерасположенных участков.

Также были рассмотрены соотношения флуорантен к сумме флуорантена и пирена $FL/(FL+PY)$ и бенз(а)антрацена к сумме бенз(а)антрацена и хризена $BaA/(BaA+C)$ (Yunker et al., 2002). Значения соотношения $FL/(FL+PY)$ в пределах Улан-Удэ колеблются от 0.49 до 0.66, т. е. почти повсеместно больше 0.5, что говорит о значительном вкладе сжигания углей в накопление ПАУ. Отношение $BaA/(BaA+C)$, которое для города в целом и для функциональных зон близко к 0.4 или превышает его, также характеризует заметное влияние сжигания углей на поступление полиаренов в городские почвы.

Оценка экологической опасности загрязнения городских почв ПАУ. Среди изученных полиаренов выделяется БаП в связи с высоким уровнем его токсичности и канцерогенной активности. Среднее содержание БаП в почвах г. Улан-Удэ составляет 50 нг/г, что превышает фоновую концентрацию в 9 раз (табл. 5). Поступ-

ление БаП в почвы обусловлено преимущественно сжиганием угля на ТЭЦ и индивидуальными системами отопления, а также эмиссией выхлопных газов автотранспорта. Накопление БаП в почвах уменьшается по функциональным зонам в последовательности: одноэтажная селитебная (62.2 нг/г) > железнодорожная транспортная (59.9 нг/г) > автотранспортная (53.8 нг/г) > промышленная (47.7 нг/г) > многоэтажная селитебная (35.9 нг/г) > рекреационная (26.7 нг/г). Центры аномалий БаП в почвах Улан-Удэ совпадают с центрами аномалий суммы 16 анализируемых ПАУ: максимальное (в 162 раза) превышение фона по БаП установлено в аномалии 8 на левобережье р. Селенги, другие наиболее высокие превышения фона (в 136, 93 и 85 раз) соответствуют аномалиям 7, 6 и 5. В других аномалиях Улан-Удэ превышение фона по БаП колеблется от 42 до 58 раз. Кратность превышения ПДК по БаП в почвах варьирует в аномалиях от 11.6 до 44.6, они характерны в основном для одноэтажной селитебной (в среднем в 3.1 раза), железнодорожной транспортной (3 раза), автотранспортной (2.7 раза) и промышленной (2.4 раза) зон. Превышения ПДК по БаП выявлены на 55% территории Улан-Удэ.

Экологическая опасность всех изученных ПАУ в городских почвах определялась путем суммирования их содержаний, умноженных на коэффициенты *TEF* (табл. 1), и последующего сравнения суммы с ПДК для БаП путем расчета коэффициента экологической опасности *Ko*. Средняя величина *Ko* для всего города составляет 3.89, а по функциональным зонам она варьирует от 2.12 до 5.67 (табл. 5). Средняя сумма БаП-эквивалентов превышает ПДК для БаП почти в 4 раза, что указывает на наличие реальной опасности загрязнения ПАУ почвенного покрова Улан-Удэ. По убыванию показателя *Ko* функциональные зоны образуют ряд: железнодорожная транспортная > селитебная одноэтажная > автотранспортная > промышленная > селитебная многоэтажная > рекреационная. Разница между самой загрязненной транспортной железнодорожной зоной и рекреационной зоной с минимальным загрязнением достигает 2.7 раза. Для фоновых почв показатель *Ko* = 0.45, что более чем в 8.5 раза меньше среднего для города значения.

Таблица 5. Показатель экологической опасности *Ko* для BaP и суммы BaП-эквивалентов ПАУ в верхнем горизонте почв г. Улан-Удэ
Table 5. Index of environmental hazard *Ko* for BaP and the sum of BaP equivalents of PAHs in the upper horizon of soils in Ulan-Ude

Статисти- ческий показатель	Функциональные зоны							
	Фоновая (12)	Промыш- ленная (41)	Авто- транс- портная (22)	Транс- портная ж/д (7)	Селитеб- ная мно- гоэтаж- ная (56)	Селитеб- ная одно- этажная (76)	Рекреа- ционная (18)	Среднее в городе (220)
Средний <i>Ko</i> Минимум Максимум <i>Cv</i> , %	BaП, нг/г							
	0.28	2.39	2.69	3.00	1.79	3.11	1.34	2.50
	0.04	0.05	0.02	0.67	0.06	0.02	0.03	0.02
	0.80	15.8	23.3	12.63	9.34	44.6	4.39	44.5
	83.7	153	179	145	94.6	223	97.7	199
Средняя сумма Средний <i>Ko</i> Минимум Максимум <i>Cv</i> , %	Сумма токсических BaП-эквивалентов ПАУ, нг/г							
	8.99	75.9	86.4	114	55.7	93.5	42.4	77.8
	0.45	3.80	4.32	5.67	2.78	4.67	2.12	3.89
	0.07	0.10	0.07	1.06	0.14	0.05	0.05	0.05
	1.31	24.6	33.7	24.9	13.88	63.9	6.85	63.9
	83.2	144	160	154	90.3	214	96.8	188

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

В целом для Улан-Удэ экологическая опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почвенного покрова на 64% определяется БаП, на 9.6% – бензо(б)флуорантеном, на 7.2% – индено(1,2,3-сd)пиреном, на 6.5% – дибензо(аh)антраценом, на 6.1% – бенз(а)-антраценом. В транспортной железнодорожной зоне вклад в сумму токсических эквивалентов наибольший у БаП (52.9%) и бензо(б)флуорантена (16%), а вклады бенз(а)антрацена, дибензо(аh)антрацена и бензо(к)флуорантена составляют 9.68, 7.24 и 5.57% соответственно. В селитебной одноэтажной зоне вклад в сумму токсических эквивалентов на 66.5% обусловлен БаП, на 8.71% – бензо(б)флуорантеном, на 6.7% – индено(1,2,3-сd)пиреном, на 6.1% – бенз(а)антраценом и на 6% – дибензо(аh)антраценом. В автотранспортной зоне БаП и бензо(б)флуорантен обуславливают экологическую опасность ПАУ на 62.3% и 9.65%, а индено(1,2,3-сd)пирен, дибензо(аh)антрацен и бенз(а)антрацен – на 8.8, 7.76 и 5.23% соответственно. В промышленной зоне на 62.9% экологическая опасность ПАУ определяется БаП, на 9.6% бензо(б)флуорантеном, а дибензо(аh)антраценом, индено(1,2,3-сd)пиреном и бенз(а)антраценом на 7.76, 7 и 6.34% соответственно.

Загрязнение ПАУ почвенного покрова города наиболее велико в следующих функциональных зонах: авто- и железнодорожной транспортной, промышленной и селитебной одноэтажной. БаП выступает как наиболее экологически опасный полиарен, он вносит в сумму токсических эквивалентов ПАУ наибольший вклад, меньший вклад у бензо(б)флуорантена, бенз(а)антрацена, дибензо(аh)антрацена и индено(1,2,3-сd)пирена, однако они также являются приоритетными поллютантами почвенного покрова города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В почвенном покрове г. Улан-Удэ содержание 16 исследуемых ПАУ варьирует в диапазоне 17–9 540 нг/г. Средняя сумма 16 ПАУ в городских почвах составляет 735 нг/г, что выше фоновых значений в 8.5 раз. Наиболее интенсивно ПАУ аккумулируются в транспортной железнодорожной зоне (средняя сумма ПАУ 2102 нг/г), что превышает ее величину в других функциональных зонах

в 2.6–5.2 раза. По уровню содержания ПАУ в почвах выделяются также автотранспортная (806 нг/г) и промышленная (797 нг/г) зоны.

Загрязнение городских почв определяется средне- и высокомолекулярными соединениями ПАУ, доля которых составляет 41 и 46% от суммы ПАУ соответственно. Из низкомолекулярных полиаренов максимальный вклад у фенантрена, на долю которого в сумме ПАУ приходится 9%. Флуорантен и пирен (4-ядерные) лидируют не только среди средномолекулярных ПАУ, они составляют значительную долю в общем содержании ПАУ в почвенном покрове города: флуорантен – 18%, пирен – 13%. Среди высокомолекулярных ПАУ наибольшие концентрации у бензо(ghi)перилена, бензо(b)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена и БаП с вкладками в сумму ПАУ 12, 10, 8 и 6% соответственно.

Уровни загрязнения почв города сильно варьируют: на 35% территории Улан-Удэ суммарное содержание ПАУ не превышает 250 нг/г, на более чем 22% площади города находится в диапазоне 250–500 нг/г. На 26% площади города сумма ПАУ в почвах колеблется в диапазоне от 500 до 1 000 нг/г, на 10% – от 1 000 до 2 000 нг/г, а на 3% – от 2 000 до 3 000 нг/г. Наиболее высокие уровни концентрации ПАУ в городских почвах (3 226–9 540 нг/г) обнаружены в девяти наиболее контрастных локальных аномалиях, которые занимают 4% территории Улан-Удэ.

Анализ индикаторных соотношений индивидуальных ПАУ позволил определить преобладающие типы источников поллютантов. Соотношения $A/(A+P)$ и P/A позволили определить соотношение пирогенных и петрогенных источников ПАУ в разных функциональных зонах города и приоритетное влияние петрогенных источников в транспортной железнодорожной зоне. Отношения $FL/(FL+PY)$ и $BaA/(BaA+C)$ выявили значительную роль сжигания тугнуйских каменных углей в накоплении ПАУ в городских почвах, что связано с их использованием в отопительных системах селитебной одноэтажной зоны и на ТЭЦ города.

Экологическая опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почвенного покрова Улан-Удэ максимальна в железнодорожной транспортной зоне, где сумма токсических эквивалентов БаП превышает фон в 12.6 раза. В селитебной одноэтажной, автотранс-

портной и промышленной зонах эти превышения составляют 10.4, 9.6 и 8.4 раза. Это указывает на наличие реальной опасности загрязнения ПАУ почвенного покрова Улан-Удэ. На 64% опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почв Улан-Удэ обусловлена БаП, на 9.6%, 7.2%, 6.5%, 6.1% – бензо(b)флуорантеном, индено(1,2,3-cd)пиреном, дибензо(ah)антраценом и бенз(a)антраценом соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров А.Б., Баранов А.О., Павлов В.Н., Слепенкова Ю.М., Тагаева Т.О. Анализ и прогноз состояния окружающей среды Республики Бурятия в новых условиях // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22. № 2. С. 36–54. DOI: [10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54](https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54).
2. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Сороковой А.А., Лопатина Д.Н. Загрязнение почв урбанизированных территорий Байкальского региона // Почвоведение. 2022. № 1. С. 119–132. DOI: [10.31857/S0032180X22010038](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010038).
3. География Сибири в начале XXI века: В 6 т. / Под ред. В.М. Плюснина; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т географии им. В.Б. Сочавы. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2016. Т. 6. Восточная Сибирь / Отв. ред. Л.М. Корытный, А.К. Тулохонов. 2016. 396 с.
4. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / Под ред. Геннадиева А.Н., Пиковского Ю.И. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 192 с.
5. Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2022 году”. Улан-Удэ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия, 2023. 411 с.
6. Григорьева М.А., Коновалов П.В. Состояние атмосферного воздуха урбанизированных территорий (на примере г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия) // Ecological education and ecological culture of the population: Proc. of the VI International Scientific Conference on February 25-26, 2018. Prague: Vedecko vydavatelske centrum Sociosfera-CZ, 2018. С. 46–49.
7. Дамбиев Ц.Ц., Тыскинеева И.Е., Мадеева Е.В. Анализ загрязнения атмосферного воздуха г. Улан-Удэ объектами теплоэнергетики // Энергетик. 2016. № 3. С. 36–38.
8. Журавлева Е.В., Михайлова Е.С., Журавлева Н.В., Исмагилов З.Р. Полициклические ароматические углеводороды из углей в объектах

- окружающей среды // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 3. С. 328–337. DOI: [10.15372/KhUR2020237](https://doi.org/10.15372/KhUR2020237).
9. Журавлева Н.В., Хабибулина Е.Р., Исмагилов З.Р., Поточкина Р.Р., Созинов С.А. Изучение взаимосвязи строения ископаемых углей и содержания в них полициклических ароматических углеводородов // Химия уст. разв. 2016. Т. 24. №. 3. С. 355–361. DOI: [10.15372/KhUR20160310](https://doi.org/10.15372/KhUR20160310).
10. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
11. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Алексеенко А.В. Загрязнение почв соединениями ПАУ при открытой добыче бурого угля (месторождение Шарынгол, Северная Монголия) // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды IV Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2016. С. 135–142.
12. Корунев А.О., Халиков И.С., Сурнин В.А. Сезонное изменение и территориальное распределение содержания бенз(а)пирена в атмосферном воздухе Российской Федерации // Экологическая химия. 2020. № 29(5). С. 270–282.
13. Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Жаксылыков Н.Б. Эколого-геохимическая оценка состояния почв г. Байкальска по содержанию полициклических ароматических углеводородов // Почвоведение. 2024. № 4. С. 633–652. DOI: [10.31857/S0032180X24040086](https://doi.org/10.31857/S0032180X24040086).
14. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
15. Кузьмин В.А. Почвенное районирование // Атлас Байкала. М.: Омская картографическая фабрика, 1993. 130 с.
16. Майстренко В.Н., Ключев Н.А. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2004. 337 с.
17. Макаров А.О. Оценка экологического состояния почв некоторых железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы: Автореф... дис. канд. биол. наук: 03.02.13. М., 2014. 25 с.
18. Максимова Е.Ю., Цибарт А.С., Абакумов Е.В. Полициклические ароматические углеводороды в почвах, пройденных верховым и низовым пожаром // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 63–68.
19. Медведева А.В. Микробная деградация полициклических ароматических углеводородов // Известия НАН РК. Серия биологическая и медицинская. 2013. № 5. С. 98–101.
20. Общегородской сводный том “Охрана атмосферы и предельно допустимые выбросы (ПДВ) г. Улан-Удэ”. СПб.: Ин-т прикл. экологии и

гигиены, 2013. 473 с.

21. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.

22. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 2021. С. 751–754.

23. *Убугунов Л.Л.* Почвенные ресурсы Республики Бурятия, их агроэкологическое состояние и рациональное использование // Вестник БГСХА им. В.Р. Филиппова. 2020. № 2. С. 35–46. DOI: [10.34655/bgsha.2020.59.2.005](https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.005).

24. *Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Бадмаев Н.Б., Гынинова А.Б., Убугунов В.Л., Балсанова Л.Д.* Почвы Бурятии: разнообразие, систематика и классификация // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2012. № 2. С. 45–52.

25. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67. DOI: [10.7868/S0016752516120049](https://doi.org/10.7868/S0016752516120049).

26. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Индикаторные соотношения концентраций полициклических ароматических углеводородов в объектах сжигания угольного топлива и биомассы // Антропогенная трансформация природной среды. 2019. № 5. С. 64–71.

27. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестник Моск. ун-та. Сер. География. 2011. № 3. С. 13–19.

28. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802. DOI: [10.7868/S0032180X13070125](https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125).

29. *Шашков М.В., Сидельников В.Н.* Определение источников эмиссии полициклических ароматических углеводородов в атмосферном воздухе // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. №. 10. С. 29–35. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-10-29-35](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35).

30. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.

31. *Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Critical Review of Environmental Occurrence and Bioremediation // Environmental Management. 2017. Vol. 60. No. 4. P. 758–783. DOI: [10.1007/s00267-017-0896-2](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2).

32. *Aubin S., Farant J.P.* Benzo(b)fluoranthene, a Potential Alternative to

- Benzo(a)pyrene as an Indicator of Exposure to Airborne PAHs in the Vicinity of Söderberg Aluminum Smelters // J. Air Waste Management Association. 2000. Vol. 50. P. 2093–2101. DOI: [10.1080/10473289.2000.10464236](https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464236).
33. *Bojakowska I., Sokolowska I.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in brown coals from Poland // Geological Quarterly. 2001. Vol. 45. P. 93–98.
34. *Cui Z., Wang Y., Du L., Yu Y.* Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China // Scientific reports. 2022. Vol. 12. No. 1. Art. No: 11301. DOI: [10.1038/s41598-022-15285-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-15285-5).
35. *Demetriades A., Birke M.* Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p. DOI: [10.1016/j.gexplo.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.024).
36. *Devos O., Combet E., Tassel P., Paturel L.* Exhaust emissions of PAHs of passenger cars // Polycyclic Aromatic Compounds. 2006. Vol. 26. P. 69–78. DOI: [10.1080/10406630500519346](https://doi.org/10.1080/10406630500519346).
37. *Emoyan O.O., Onocha E.O., Tesi G.O.* Concentration Assessment and Source Evaluation of 16 Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Selected Vehicle-Parks in Southern Nigeria // Sci. Afr. 2020. No. 7. e00296. DOI: [10.1016/j.sciaf.2020.e00296](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00296).
38. *Laumann S., Micic V., Krüge M. A., Achten C., Hofmann T.* Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159. P. 2690–2697. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.05.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032).
39. *Marr L.C., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Miguel A.H., Hering S.V., Hammond S.K.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions // Environmental Science and Technology. 1999. Vol. 33. P. 3091–3099. DOI: [10.1021/ES981227L](https://doi.org/10.1021/ES981227L).
40. *Metrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Wilkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M.* Does the railway function of railway infrastructure determine qualitative and quantitative composition of contaminants (PAHs, heavy metals) in soil and plant biomass? // Water, Air and Soil Pollution. 2015. Vol. 226. No. 8. P. 253–265. DOI: [10.1007/s11270-015-2516-1](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2516-1).
41. *Miguel A.H., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Hering S.V.* On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles // Environmental Science and Technology. 1998. Vol. 32. No. 4. P. 450–455. DOI: [10.1021/es970566w](https://doi.org/10.1021/es970566w).
42. *Morville S., Scheyer A., Mirabel P., Millet M.* Sampling and analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in urban and rural atmospheres: Spatial and geographical variations of concentrations // Polycyclic Aromatic

Compounds. 2004. Vol. 24. No. 4–5. P. 617–634. DOI: [10.1080/10406630490472059](https://doi.org/10.1080/10406630490472059).

43. Nisbet C., LaGoy P. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 1992. Vol. 16. P. 290–300. DOI: [10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X).

44. Sakari M. Depositional History of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Reconstruction of Petroleum Pollution Record in Peninsular Malaysia / Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention – Environmental and Analytical Update. Edited by Tomasz Puzyn and Aleksandra Mostrag-Szlichtyng, 2012. InTech. 472 p.

45. Tobiszewski M., Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 162. P. 110–119. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025).

46. Wilkomirski B., Jabbarov Z. A., Abdrakhmanov T. A., Vokhidova M. B., Jabborov B. T., Fakhrutdinova M. F., Okolelova A.A., Kholdorov S.M., Abdullayeva Y. D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Natural and Anthropogenically Modified Soils (A Review) // *Biogeosystem Technique*. 2018. No. 5. P. 229–243. DOI: [10.13187/bgt.2018.2.229](https://doi.org/10.13187/bgt.2018.2.229).

47. Wilkomirski B., Sudnik-Wójcikowska B., Galera H., Wierzbicka M, Malawska M. Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution // *Water, Air and Soil Pollution*. 2011. Vol. 218. P. 333–345. DOI: [10.1007/s11270-010-0645-0](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0).

48. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // *Org. Geochem*. 2002. Vol. 33. P. 489–515. DOI: [10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).

REFERENCES

1. Bazarov A.B., Baranov A.O., Pavlov V.N., Slepikova Yu.M., Tagaeva T.O., *Analiz i prognoz sostoyaniya okruzhayushchei sredy Respubliki Buryatiya v novykh usloviyakh* (Analysis and forecast of the environment of the Republic of Buryatia in new conditions), *Mir ekonomiki i upravleniya*, 2022, Vol. 22, No. 2, pp. 36–54, DOI: [10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54](https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54).

2. Belozertseva I.A., Vorob'eva I.B., Sorokovoi A.A., Lopatina D.N., *Zagryaznenie pochv urbanizirovannykh territorii Baikal'skogo regiona* (Soil pollution of urbanised territories of the Baikal region), *Pochvovedenie*, 2022, No. 1, pp. 119–132, DOI: [10.31857/S0032180X22010038](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010038).

3. Plyusnina V.M., L.M. Korytnyi, A.K. Tulokhonov (Eds), *Geografiya Sibiri v nachale XXI veka: V 6 t.*, (Geography of Siberia at the beginning of

the XXI century: In 6 vol.), Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo", Vol. 6, Vostochnaya Sibir', 2016, 396 p.

4. Gennadiyev A.N., Pikovskiy Yu.I. (Eds), *Geokhimiya politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v gornykh porodakh i pochvakh* (Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1996, 192 p.

5. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ohrane okruzhayushchei sredy Respubliki Buryatiya v 2022 godu"* (State Report 'On the State and Protection of the Environment of the Republic of Buryatia in 2022'), Ulan-Ude: Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Respubliki Buryatiya, 2023, 411 p.

6. Grigor'eva M.A., Konovalov P.V., Sostoyanie atmosfernogo vozdukha urbanizirovannykh territorii (na primere g. Ulan-Ude, Respublika Buryatiya, Rossiya) (State of atmospheric air of urbanised territories (by the example of Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia)), *Ecological education and ecological culture of the population: Proc. VI Intern. Sci. Conf.*, Prague: Vedecko vydavatelske centrum Sociosfera-CZ, 2018, pp. 46–49.

7. Dambiev Ts.Ts., Tyskineeva I.E., Madeeva E.V., Analiz zagryazneniya atmosfernogo vozdukha g. Ulan-Ude ob'ektami teploenergetiki (Analysis of atmospheric air pollution in Ulan-Ude city by heat power engineering facilities), *Energetik*, 2016, No. 3, pp. 36–38.

8. Zhuravleva E.V., Mikhailova E.S., Zhuravleva N.V., Ismagilov Z.R., Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody iz uglei v ob'ektakh okruzhayushchei sredy (Polycyclic aromatic hydrocarbons from coal in environmental objects), *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2020, Vol. 28, No. 3, pp. 328–337, DOI: [10.15372/KhUR2020237](https://doi.org/10.15372/KhUR2020237).

9. Zhuravleva N.V., Khabibulina E.R., Ismagilov Z.R., Potokina R.R., Sozinov S.A., Izuchenie vzaimosvyazi stroeniya iskopaemykh uglei i sodержaniya v nikh politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov (Study of the relationship between the structure of fossil coals and the content of polycyclic aromatic hydrocarbons in them), *Khimiya ust. razv.*, 2016, Vol. 24, No. 3, pp. 355–361, DOI: [10.15372/KhUR20160310](https://doi.org/10.15372/KhUR20160310).

10. Kasimov N.S., *Ekogeokhimiya landshaftov* (Ecogeochemistry of landscapes), Moscow: IP Filimonov M.V., 2013, 208 p.

11. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Alekseenko A.V., Zagryaznenie pochv soedineniyami PAU pri otkrytoi dobyche burogo uglya (mestorozhdenie Sharyngol, Severnaya Mongoliya) (Soil contamination by PAH compounds during open-pit mining of brown coal (Sharyngol deposit, Northern Mongolia)), *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov: Proc. IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Ekaterinburg, 2016, pp. 135–142.

12. Korunov A.O., Khalikov I.S., Surnin V.A., Sezonnoe izmenenie i territorial'noe raspredelenie sodержaniya benz(a)pirena v atmosfernom vozdukhе Rossiiskoi Federatsii (Seasonal change and territorial distribution of benz(a)pyrene content in the atmospheric air of the Russian Federation), *Ekologicheskaya khimiya*, 2020, No. 29(5), pp. 270–282.
13. Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Zhaxylykov N.B., Ekologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya pochv g. Baikal'ska po sodержaniyu politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov (Ecological and geochemical assessment of Baikalsk soils on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons), *Pochvovedenie*, 2024, No. 4, pp. 633–652, DOI: [10.31857/S0032180X24040086](https://doi.org/10.31857/S0032180X24040086).
14. Krechetov P.P., Dianova T.M., *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* (Chemistry of soils. Analytical methods of research), Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2009, 148 p.
15. Kuz'min V.A., *Pochvennoe raionirovanie* (Soil zoning), Atlas Baikala, Moscow: Omskaya kartograficheskaya fabrika, 1993, 130 p.
16. Maistrenko V.N., Klyuev N.A., *Ekologo-analiticheskii monitoring stoikikh organicheskikh zagryaznitelei* (Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants), Moscow: BINOM. Lab. znaniy, 2004, 337 p.
17. Makarov A.O., *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya pochv nekotorykh zheleznodorozhnykh ob'ektov TsAO g. Moskvy: avtoref... dis. kand. bio. nauk* (Estimation of the ecological state of soils of some railway objects of the Central Administrative District of Moscow: Cand. Biol. Sci. thesis), 03.02.13, Moscow, 2014, 25 p.
18. Maksimova E.Yu., Tsibart A.S., Abakumov E.V., Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody v pochvakh, proidennykh verkhovym i nizovym pozharom (Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils passed by the upper and lower fire), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, Vol. 15, No. 3, pp. 63–68.
19. Medvedeva A.V., Mikrobnaya degradatsiya politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov (Medvedeva A.V. Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons), *Izvestiya NAN RK, Seriya biologicheskaya i meditsinskaya*, 2013, No. 5, pp. 98–101.
20. *Obshchegorodskoi svodnyi tom "Okhrana atmosfery i predel'no dopustimye vybrosy (PDV) g. Ulan-Ude"* (City-wide consolidated volume 'Atmospheric protection and maximum permissible emissions (MPE) of Ulan-Ude'), Saint Petersburg: In-t prikl. ekologii i gigieny, 2013, 473 p.
21. Rovinskii F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseeva T.A., *Fonovyi monitoring politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov* (Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 224 p.
22. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k

obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya” (“Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of factors of the living environment”), 2021, pp. 751–754.

23. Ubugunov L.L., Pochvennye resursy Respubliki Buryatiya, ikh agroekologicheskoe sostoyanie i ratsional'noe ispol'zovanie (Soil resources of the Republic of Buryatia, their agro-ecological state and rational use), *Vestnik BGSKhA im. V.R. Filippova*, 2020, No. 2, pp. 35–46, DOI: [10.34655/bgsha.2020.59.2.005](https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.005).

24. Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Badmaev N.B., Gyninova A.B., Ubugunov V.L., Balsanova L.D., Pochvy Buryatii: raznoobrazie, sistematika i klassifikatsiya (Soils of Buryatia: diversity, systematics and classification), *Vestnik Buryatskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii im. V.R. Filippova*, 2012, No. 2, pp. 45–52.

25. Khaustov A.P., Redina M.M., Geokhimicheskie markery na osnove sootnoshenii kontsentratsii PAU v nefi i neftezagryaznennykh ob"ektakh (Geochemical markers based on the ratios of PAH concentrations in oil and oil-contaminated objects), *Geokhimiya*, 2017, No. 1, pp. 57–67, DOI: [10.7868/S0016752516120049](https://doi.org/10.7868/S0016752516120049).

26. Khaustov A.P., Redina M.M., Indikatornye sootnosheniya kontsentratsii politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov v ob"ektakh szhiganiya ugol'nogo topliva i biomassy (Indicator ratios of concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal fuel and biomass combustion objects), *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy*, 2019, No. 5, pp. 64–71.

27. Tsibart A.S., Gennadiyev A.N., Assotsiatsii politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov v proidennykh pozhamami pochvakh (Associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils passed by fires), *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. Geografiya*, 2011, No. 3, pp. 13–19.

28. Tsibart A.S., Gennadiyev A.N., Politsiklicheskie aromatcheskie uglevodorody v pochvakh: istochniki, povedenie, indikatsionnoe znachenie (obzor) (Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: sources, behaviour, indicative value (review)), *Pochvovedenie*, 2013, No. 7, pp. 788–802, DOI: [10.7868/S0032180X13070125](https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125).

29. Shashkov M.V., Sidel'nikov V.N., Opredelenie istochnikov emissii politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov v atmosfernom vozdukh (Determination of the emission sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric air), *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2022, Vol. 26, No. 10, pp. 29–35, DOI: [10.18412/1816-0395-2022-10-29-35](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35).

30. *Ekologicheskii atlas basseina ozera Baikal* (Ecological atlas of the Lake Baikal basin), Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2015, 145 p.

31. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Critical Review of Environmental Occurrence and Bioremediation, *Environmental Management*, 2017, Vol. 60, No. 4, pp. 758–783, DOI: [10.1007/s00267-017-0896-2](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2).
32. Aubin S., Farant J.P., Benzo(b)fluoranthene, a Potential Alternative to Benzo(a)pyrene as an Indicator of Exposure to Airborne PAHs in the Vicinity of Söderberg Aluminum Smelters, *J. Air Waste Management Association*, 2000, Vol. 50, pp. 2093–2101, DOI: [10.1080/10473289.2000.10464236](https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464236).
33. Bojakowska I., Sokołowska I., Polycyclic aromatic hydrocarbons in brown coals from Poland, *Geological Quarterly*, 2001, Vol. 45, pp. 93–98.
34. Cui Z., Wang Y., Du L., Yu Y., Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China, *Scientific reports*, 2022, Vol. 12, No. 1, Art. No. 11301, DOI: [10.1038/s41598-022-15285-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-15285-5).
35. Demetriades A., Birke M., *Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting*, Brussels: EuroGeoSurveys, 2015, 162 p., DOI: [10.1016/j.gexplo.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.024).
36. Devos O., Combet E., Tassel P., Paturel L., Exhaust emissions of PAHs of passenger cars, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2006, Vol. 26, pp. 69–78, DOI: [10.1080/10406630500519346](https://doi.org/10.1080/10406630500519346).
37. Emoyan O.O., Onocha E.O., Tesi G.O., Concentration Assessment and Source Evaluation of 16 Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Selected Vehicle-Parks in Southern Nigeria, *Sci. Afr.*, 2020, No. 7, e00296, DOI: [10.1016/j.sciaf.2020.e00296](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00296).
38. Laumann S., Micic V., Krüge M. A., Achten C., Hofmann T., Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin, *Environmental Pollution*, 2011, Vol. 159, pp. 2690–2697, DOI: [10.1016/j.envpol.2011.05.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032).
39. Marr L.C., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Miguel A.H., Hering S.V., Hammond S.K., Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions, *Environmental Science and Technology*, 1999, Vol. 33, pp. 3091–3099, DOI: [10.1021/ES981227L](https://doi.org/10.1021/ES981227L).
40. Mętrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Wiłkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M., Does the railway function of railway infrastructure determine qualitative and quantitative composition of contaminants (PAHs, heavy metals) in soil and plant biomass? *Water, Air and Soil Pollution*, 2015, Vol. 226, No. 8, pp. 253–265, DOI: [10.1007/s11270-015-2516-1](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2516-1).
41. Miguel A.H., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Hering S.V., On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon

- from gasoline and diesel vehicles, *Environmental Science and Technology*, 1998, Vol. 32, No. 4, pp. 450–455, DOI: [10.1021/es970566w](https://doi.org/10.1021/es970566w).
42. Morville S., Scheyer A., Mirabel P., Millet M., Sampling and analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in urban and rural atmospheres: Spatial and geographical variations of concentrations, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2004, Vol. 24, No. 4–5, pp. 617–634, DOI: [10.1080/10406630490472059](https://doi.org/10.1080/10406630490472059).
43. Nisbet C., LaGoy P., Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, Vol. 16, pp. 290–300, DOI: [10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X).
44. Sakari M., *Depositional History of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Reconstruction of Petroleum Pollution Record in Peninsular Malaysia / Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention – Environmental and Analytical Update*, Edited by Tomasz Puzyn and Aleksandra Mostrag-Szlichtyng, 2012, InTech, 472 p.
45. Tobiszewski M., Namieśnik J., PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources, *Environmental Pollution*, 2012, Vol. 162, pp. 110–119, DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025).
46. Wiłkomirski B., Jabbarov Z. A., Abdrakhmanov T. A., Vokhidova M. B., Jabborov B. T., Fakhrutdinova M. F., Okolelova A.A., Kholdorov S.M., Abdullayeva Y. D., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Natural and Anthropogenically Modified Soils (A Review), *Biogeosystem Technique*, 2018, No. 5, pp. 229–243, DOI: [10.13187/bgt.2018.2.229](https://doi.org/10.13187/bgt.2018.2.229).
47. Wiłkomirski B., Sudnik-Wójcikowska B., Galera H., Wierzbička M., Malawska M., Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution, *Water, Air and Soil Pollution*, 2011, Vol. 218, pp. 333–345, DOI: [10.1007/s11270-010-0645-0](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0).
48. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S., PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition, *Org. Geochem.*, 2002, Vol. 33, pp. 489–515, DOI: [10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).

УДК 631.8

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-231-264



Ссылки для цитирования:

Васильева Н.А., Абасов Ш.М., Владимиров А.А., Духанин Ю.А., Перевертин К.А., Гаплаев М.Ш., Баматов И.М. Влияние минерального удобрения пролонгированного действия на интенсивность мобилизации почвенного фосфора и калия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 231-264. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-231-264

Cite this article as:

Vasilyeva N.A., Abasov Sh.M., Vladimirov A.A., Dukhanin Y.A., Perevertin K.A., Gaplaev M.Sh., Bamatov I.M., Effect of slow-release mineral fertilizer on the intensity of phosphorus and potassium mobilization in soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 231-264, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-231-264

Благодарность:

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-16-00092). Авторы выражают благодарность Борисовой О.Л. за помощь в оформлении статьи. Участие соавторов: В.Н.А выполняла анализ данных, написание статьи, А.Ш.М. и Г.М.Ш. – проведение полевого эксперимента, В.А.А. – моделирование, Д.Ю.А. и П.К.А. – помощь в написании статьи, Б.И.М. – руководство проектом и экспериментом.

Acknowledgments:

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-16-00092). The authors would like to thank Borisova O.L. for assistance in the design of the article. Participation of co-authors: V.N.A performed data analysis and article writing, A.S.M. and G.M.S. performed field experiment, V.A.A. performed modelling, D.Y.A. and P.K.A. assisted in article writing, B.I.M. supervised the project and experiment.

**Влияние минерального удобрения
пролонгированного действия на интенсивность
мобилизации почвенного фосфора и калия**

© 2024 г.Н. А. Васильева^{1*}, Ш. М. Абасов^{2**},
А. А. Владимиров^{1,3***}, Ю. А. Духанин¹,

К. А. Перевертин^{4**}, М. Ш. Гаплаев²,
И. М. Баматов^{1*****}**

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

*<https://orcid.org/0000-0002-1942-3738>,

e-mail: nadezda.vasilyeva@gmail.com,

****<https://orcid.org/0000-0002-9098-5012>, e-mail: ibragim-1991@mail.ru.

²Чеченский научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
Россия, 36602, Чеченская республика, пос. Гикаловский, ул. Ленина, 1,

**e-mail: shaarany@mail.ru.

³Объединенный институт ядерных исследований, Россия,

141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри 6,

***<https://orcid.org/0000-0001-8223-393X>,

e-mail: artem.a.vladimirov@gmail.com.

⁴Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33,

****<https://orcid.org/0000-0002-9561-3103>, e-mail: perevertink@mail.ru.

Поступила в редакцию 18.10.2023, после доработки 14.03.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Поиск новых технологий эффективного регулирования урожайности с сохранением (повышением) почвенного плодородия является актуальной задачей. Применение удобрений в формах с пролонгированным действием может одновременно решать обе задачи – экономить удобрения и повышать мобилизацию элементов питания из почвы. В настоящей работе с использованием данных полевого опыта с озимой пшеницей посредством математического моделирования исследовали механизм влияния пролонгированного удобрения на скорость мобилизации элементов в почве. Показано, что в варианте с самым медленно растворяющимся удобрением (оригинальное полимер-модифицированное удобрение азофоска с содержанием поливинилового спирта – 20%) достигалась самая высокая эффективность азофоски (прибавка урожая 1.3 т/га и прирост в почве подвижных форм фосфора 2.5 мг/100 г почвы, калия – 8.8 мг/100 г почвы и нитратного азота – 4.7 мг/100 г почвы). Результаты модели на примере фосфора количественно подтвердили предположение о том, что низкая скорость растворения удобрения усиливает мобилизацию питательных элементов из почвы за счет отсутствия избытка доступных растению форм питательных элементов. Даны оценки добавочной эффективности

модифицированной азофоски за счет содержания полимера. Показано, что новая форма удобрения может быть применена для эффективного снижения количества удобрения на планируемый урожай, одновременно с возможностью выведения почвы на более высокий уровень эффективного плодородия по основным элементам питания.

Ключевые слова: удобрения пролонгированного действия; почвенное плодородие; эффективное применение удобрений.

Effect of slow-release mineral fertilizer on the intensity of phosphorus and potassium mobilization in soil

© 2024 N. A. Vasilyeva^{1*}, Sh. M. Abasov^{2**}, A. A. Vladimirov^{1,3***},
Y. A. Dukhanin¹, K. A. Perevertin^{4****}, M. Sh. Gaplaev²,
I. M. Bamatov^{1*****}

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

<https://orcid.org/0000-0002-1942-3738>,

e-mail: nadezda.vasilyeva@gmail.com,

***** <https://orcid.org/0000-0002-9098-5012>, e-mail: ibragim-1991@mail.ru.

²Chechen Research Institute of Agriculture,

1 Lenin Str., village Gikalovsky 36602, Russian Federation,

e-mail: shaarany@mail.ru.

³Joint Institute for Nuclear Research,

6 Joliot-Curie Str., Dubna 141980, Russian Federation,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

*** <https://orcid.org/0000-0001-8223-393X>,

e-mail: artem.a.vladimirov@gmail.com.

⁴Severtsov Institute of Ecology and Evolution
of the Russian Academy of Sciences,

33 Leninsky Prospekt, Moscow 119071, Russian Federation,

**** <https://orcid.org/0000-0002-9561-3103>, e-mail: perevertink@mail.ru.

Received 18.10.2023, Revised 14.03.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: The search for new technologies for effective regulation of yield and soil fertility is an urgent task. The use of slow-release fertilizers can simultaneously solve both problems – reducing fertilizer rates and increasing the mobilization of soil nutrients. In this paper, the mechanism of slow-release

fertilizer effect on the mobilization rate of soil nutrients was investigated using mathematical modeling on the data of field trials with winter wheat. It is shown that in the plots with the slowest dissolving fertilizer (azofoska with 20% content of polyvinyl alcohol), the highest efficiency of azofoska was achieved (an increase in yield of 1.3 t/ha and an increase in mobile forms of phosphorus in the soil of 2.5 mg/100 g soil, potassium – 8.8 mg/100 g soil and nitrate nitrogen – 4.7 mg/100 g soil). The results of phosphorus modeling quantitatively confirmed the assumption that the low rate of dissolution of fertilizer enhances the mobilization of nutrients from soil due to the absence of an excess of plant available nutrients. We provide estimates of the polymer added efficiency for a series of polymer-modified fertilizer. It is shown that this form of fertilizer can be applied to effectively reduce the amount of fertilizer required for the planned harvest, simultaneously with the possibility of bringing the soil to a higher level of effective fertility in major nutrient elements.

Keywords: slow-release fertilizers; soil fertility; effective application of fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

В интенсивном земледелии потенциальные запасы плодородия почв перестают быть основным источником минерального питания, эта функция “все в большей мере перекладывается на удобрение”. При этом высокие дозы удобрений, с одной стороны, опасны в экологическом плане, особенно на почвах с малой поглощающей емкостью, с другой стороны, экономически затратны, при этом могут ухудшать качество продукции и снижать микробную активность почв. В свою очередь, снижение количества вносимых традиционных удобрений будет ограничивать урожайность. Направленное регулирование блока эффективного плодородия почв базируется прежде всего на решении задач оптимизации режима минерального питания растений за счет усовершенствования технологии применения удобрений (Кирюшин, 1987). Известно, что новые формы удобрений, такие как удобрения пролонгированного действия (УПД), позволяют повысить эффективность их применения, т. е. плановый урожай обеспечивается меньшим количеством удобрения, сопровождается снижением непроизводительных потерь за счет медленного высвобождения питательных элементов (Баматов и др., 2022; Капцынель, Казан-

цева, 1990; Козел, 2019; Кореньков, 1973; Минеев, 2004; Пироговская, 2000; Aarnio et al., 2003; Boyandin et al., 2017; Kontárová et al., 2022; Sofyane et al., 2021; Talboys et al., 2016).

Механизм эффективности применения УПД лежит не только в потенциальном отсутствии непроизводительных потерь, по сравнению с быстрорастворяющимися традиционными минеральными удобрениями, но также в их влиянии на почвенный процесс мобилизации элементов питания, т. е. на пополнение резервуара непосредственно доступных растению элементов в почве из других валовых форм. Более того, известно, что применение УПД настолько может усиливать мобилизацию почвенных запасов, например, фосфора и калия, и их переход в доступные растению формы, что обладает положительным последствием в виде итогового повышения уровня эффективного плодородия почв по этим элементам питания (Aarnio et al., 2003; Ghaffoor et al., 2022). Мобилизация почвенных запасов элементов питания, таких как фосфор и калий, и повышение степени их утилизации из удобрений является одной из ключевых задач прикладной агрохимии. Совершенствование и поиск рычагов активного управления процессами мобилизации элементов питания в почвах позволят устанавливать новые (повышенные) уровни стационарных состояний по показателям почвенного плодородия, что представляет собой одновременно научный и практический интерес (Елешев, Иванов, 1990).

На рисунке 1 на примере фосфора, как одного из основных элементов питания, показаны оценки его почвенных запасов в виде различных форм для южного чернозема и сезонных потоков между этими формами в результате процессов разложения органических веществ, мобилизации минеральных соединений в доступные для растений формы. В южных карбонатных черноземах запасы валового фосфора составляют порядка 150 мг/100 г почвы. Из них минеральные (непосредственно и потенциально доступные) и органические формы находятся в соотношении около 2 : 1, т. е. порядка 100 и 50 мг/100 г почвы соответственно. Важную роль в освобождении связанных в почвах фосфатов и превращении фосфора удобрений играют органические вещества.

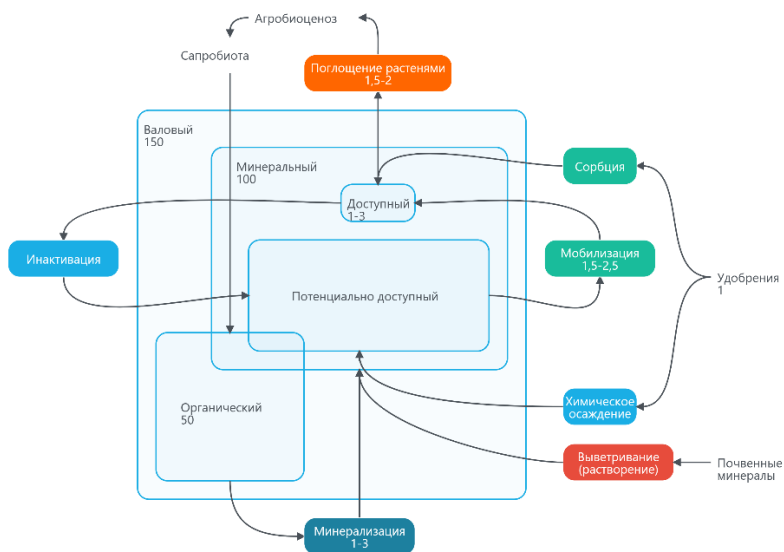


Рис. 1. Общая схема взаимосвязей между формами элемента питания в почве на примере фосфора (адаптировано из Елешев и Иванов, 1990). Размер резервуара каждой формы отражает его относительное количество, под названием формы элемента указана оценка его количества в мг/100 г почвы для южного чернозема в условиях средней обеспеченности. В закрашенных прямоугольниках указаны основные процессы с оценкой их нетто величин за вегетационный сезон (~100 дней), оценка поглощения приведена для озимой пшеницы при урожайности 5–6.5 т/га.

Fig. 1. The general scheme of relations between the forms of soil nutrient elements by the example of phosphorus (adapted from Eleshev and Ivanov, 1990). The size of the reservoir of each form reflects its relative quantity, under the name of the element form, an estimate of its quantity in mg/ 100 g of soil for southern chernozem, considering its average availability level in soil, is indicated. The shaded rectangles indicate the main processes with an estimate of their net values for the growing season (~100 days), the consumption estimate is given for winter wheat at a yield of 5–6.5 t/ha.

При правильной технологии ведения землепользования стационарное состояние по содержанию органофосфатов можно сдвигать в большую сторону. В южных черноземах – до 54–55 мг/100 г почвы. Скорость минерализации органофосфатов – 0.028 мг/100 г почвы в сутки, таким образом, в течение вегетационного сезона продолжительностью 3 месяца может минерализоваться около 2.5 мг/100 г почвы (Елешев, Иванов, 1990). Эта величина соответствует уровню мобилизации фосфора в доступные для растений формы, а значит может поддерживать поток фосфора внутри почвы из валовых форм для восполнения его выноса. Например, интенсивность минерализации органофосфатов под такими культурами как ячмень/кукуруза может составлять 2.9 мг/100 г почвы, а под люцерной 3-го года – 3.3 мг/100 г почвы. Из данной схемы видно, что при внесении значительных доз быстрорастворимых удобрений, за счет процесса сорбции они могут сразу пополнять резервуар непосредственно доступного растениям фосфора. Однако при высокой концентрации этих форм также высокой будет и скорость процесса их инактивации, которая сдвинет равновесие скоростей мобилизация/инактивация так, что нетто результат процесса мобилизации снизится. Чтобы поддерживать равновесие этих процессов смещенным в сторону мобилизации элемента (запуская всю цепочку перехода элемента из валовых форм в непосредственно доступную) необходимо снижать концентрацию доступных форм.

Повышение продуктивности и качества зерновых культур одновременно со снижением количеств удобрений, сохранением и улучшением почвенного плодородия – задача непростая в современных условиях. Приемы, воздействующие на питательный режим почвы и способные максимально утилизировать запасы почвенной системы, можно разделить на две большие группы: агротехнические (чередование культур, орошение, агротехника и т. д.) и собственно агрохимические (рациональные технологии внесения удобрений, поиск новых эффективных форм удобрений и мелиорантов и т. д.) (Елешев, Иванов, 1990). Известно, что удобрения пролонгированного действия могут также увеличивать и качество продукции одновременно со снижением нагрузки на экосистему (количества и частоты внесения минеральных удобрений)

(Ghafoor et al., 2022; Li G et al., 2022; Shaviv et al., 1993; Trenkel, 2010; Wang et al., 2021).

В настоящей работе, используя данные полевого опыта с озимой пшеницей, посредством математического моделирования исследовали механизм влияния пролонгированного удобрения на интенсивность мобилизации элементов в почве (на примере азотфоски, обогащенной биоразлагаемым полимером в серии различных концентраций). Оценивалась эффективность новой формы удобрения по затрачиваемому количеству на планируемый урожай и изменению показателей эффективного плодородия. Рабочей гипотезой являлось предположение о том, что низкая скорость растворения удобрения, по сравнению с традиционной формой, позволяет поддерживать более низкую концентрацию доступных форм элементов, сдвигая равновесие почвенных процессов в сторону мобилизации элементов из почвы. При этом урожайность не будет ограничена только почвенным ресурсом, поскольку постепенное растворение полимермодифицированного удобрения добавляет растениям недостающие количества элементов в течение всего вегетационного периода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Описание объекта

Закладка полевого опыта проведена на опытном поле ФГБНУ “Чеченский НИИСХ”, расположенном в лесостепной зоне, на южной окраине г. Грозный, осенью 2022 г., площадью 12 га. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный, суглинистый. В первой декаде октября была проведена предварительная разбивка полевого опыта согласно разработанной схеме на делянки площадью 15 м², с учетной площадью – 5 м². Делянки выбирали максимально схожие и однородные по рельефу.

Система обработки почвы включала вспашку почвы плугом ПН-4-35 на глубину до 30 см с последующим дискованием дисковой бороной БДМ-3×4 на глубину до 15 см и обработкой культиватором КПП-5 для обеспечения необходимых физических свойств в пахотном слое почвы (структурности, плотности и др.). Следом была проведена подготовка почвы комбинированным агрегатом – компактоматом для заделки удобрений и посева. На

учетных делянках произведена заделка опытных образцов удобрений (таблеток) вручную на глубину 3 см из расчета 5 шт. на м² в соответствии со схемой опыта.

Схема опыта. Система применения удобрений предусматривала внесение минеральных удобрений в дозе рассчитанной на планируемую урожайность озимой пшеницы 5 т/га. Азофоску применяли в качестве эталона для сравнительной оценки эффективности полимер-модифицированных удобрений.

Шесть вариантов опыта включали: контроль (**К**) – без удобрений; Азофоска 16 : 16 : 16 (**А**) с нормой внесения 2.0 ц/га; и 4 варианта с полимер-модифицированным удобрением (ПМУ) в концентрациях 5% (**ПМУ-5**); 10% (**ПМУ-10**); 15% (**ПМУ-15**); и 20% (**ПМУ-20**). ПМУ вносили по 25 таблеток (5 шт. – 25 г/м²). Полевая повторность опыта 4-кратная. Размещение вариантов в повторениях рендомизированное.

Полимерную модификацию минерального удобрения азофоска 16 : 16 : 16 проводили в лабораторных условиях путем смешивания с поливиниловым спиртом (Баматов и др., 2022). Полимерная модификация азофоски имеет следующий химический состав: поливиниловый спирт (C₂H₄O)_x, где x – степень полимеризации, лимонная кислота C₆ H₈ O₇ (в соотношении 1 : 10 по массе полимера), азофоска NH₄H₂PO₄ + NH₄NO₃ + KCL. Содержание полимера в азофоске снижает скорость ее растворения. Таким образом, в изучаемой серии удобрений немодифицированная азофоска имеет максимальную скорость растворения, а ПМУ-20 – минимальную.

Поступление элементов питания в почву из таблетированной формы полимер-модифицированного минерального удобрения азофоски может определяться в основном тремя механизмами: путем постепенного растворения в воде, ферментативного разложения поливинилового спирта, и диффузией ионов удобрения через набухший в воде поливиниловый спирт. Первый механизм имеет место за счет того, что поливиниловый спирт является водорастворимым, а при температурах более 70 °С он является уже хорошо растворимым. При этом конкретная величина растворимости регулируется условиями его получения и степенью полиме-

ризации. Поскольку в почвах максимальная температура редко превышает 25 °С, то значительную роль в высвобождении минерального удобрения из смеси с данным полимером также может иметь его биоразлагаемость, а именно – расщепление поливинилового спирта ферментами бактерий *Pseudomonas sp.* (второй механизм). После разложения макроцепи поливинилового спирта ее фрагменты могут полностью усваиваться бактериями (Крутько и др., 2014). Третий возможный механизм обусловлен тем, что в почве азофоска диссоциирует на различные ионы: нитрат-ион – NO_3^- , ион аммония – NH_4^+ , фосфат-ионы – H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} и PO_4^{3-} , – а поливиниловый спирт, набухший в воде, является проницаемым для водных растворов неорганических кислот (Иорданский и др., 1972).

Посев и описание сорта. Посев озимой пшеницы был проведен 18–19 октября с нормой высева 45 млн шт./га. Использовался мягкий сорт озимой пшеницы – краснодарский сорт Бумба. Оригинатор – 25-ФГБНУ “Национальный Центр зерна имени П.П. Лукьяненко”. Сорт среднеранний, низкорослый, обладает высокой устойчивостью к полеганию. Засухоустойчивость высокая. Средняя урожайность в регионе – 80.3 ц/га. Максимальная урожайность – 93.3 ц/га. Хлебопекарные качества отличные. Сильная пшеница. Включен в Госреестр по Северо-Кавказскому (6) региону.

Отбор образцов. В течение вегетации отбирались образцы почвы для агрохимического анализа:

1. перед внесением удобрения;
2. в период кущения пшеницы;
3. в период колошения пшеницы.

Измерения. Анализы почвы проводили в лаборатории САС “Агрохимия Чеченская”. Характеристики озимой пшеницы (всхожесть, высота растений, количество колосьев, длина колоса, количество зерен в колосе, масса зерен в колосе, масса 1 000 семян) определяли по ГОСТ 9353-2016 “Пшеница. Технические условия”.

Оценку количеств доступных растениям элементов питания проводили по содержанию подвижных соединений фосфора и калия, установленному методом Мачигина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91), и содержанию нитратов – ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86). Содержание органического вещества (гумуса) определяли стандартными методами – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), pH водной вытяжки – по ГОСТ 26423-85.

Расчет баланса элементов в почве. Расчет баланса элементов в пахотном слое почвы (0–30 см) производили на момент колошения, когда основная биомасса озимой пшеницы уже сформировалась. Для перевода площадной нормы внесения в единицы концентрации плотность пахотного слоя принимали равной 1.3 г/см^3 . Невязку баланса питательных элементов определяли как разницу между начальными и конечными (на момент колошения) содержаниями питательных элементов в почве, с учетом количеств, внесенных с удобрением и выносимых с урожаем. Для учета выноса основных элементов питания озимой пшеницей с основной продукцией с учетом побочной (в данном случае пожнив-ные остатки) применяли следующие величины выноса на 1 т урожая: 33 кг азота, 12 кг фосфора, 24 кг калия. Поскольку потребление корневой массой не учитывалось, то в настоящей работе приведена нижняя оценка (минимальная) выноса элементов питания, соответственно, величины возможной мобилизации элементов питания из почвы по балансу также являются минимальными оценками.

Оценочная модель мобилизации почвенных ресурсов (на примере фосфора). Для моделирования динамики питательных элементов использовалось обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dS}{dt} = F(t) + M(S, t) - C(t) \quad (1),$$

где $S(t)$ – концентрация подвижной формы элемента в почве в момент времени t (используются экспериментально данные в момент до посева (начальный) и в фазу колошения (конечный)).

$F(t)$ – скорость поступления питательного элемента в почву при растворении удобрения, которая задается линейной функцией:

$$F(t) = \begin{cases} 2k_3 t / k_4^2, & \text{при } t \leq k_4, \\ 0, & \text{при } t > k_4 \text{ (полное растворение)} \end{cases} \quad (2)$$

где $k_3 = 0.9$ мг/100 г почвы – общее количество внесенного питательного элемента, k_4 – время полного растворения удобрения: для азофоски высокая скорость $k_4 = 5$ сут., и медленная для удобрений пролонгированного действия $k_4 = 100$ сут. $F(t)$ линейно растет со временем так, чтобы за время полного растворения общее поступление питательного элемента было равно k_3 .

$M(S, t)$ – суммарная скорость процессов мобилизации и иммобилизации питательного элемента в почве и задается следующим уравнением:

$$M(S, t) = k_5 k_2 - k_6 S, \quad (3)$$

где k_5 – базовая скорость мобилизации в почве, k_2 – коэффициент плотности растений (за счет ускорения мобилизации экссудатами растений), k_6 – общий коэффициент перехода питательного элемента из подвижного пула в потенциально доступный в результате иммобилизации (включая инактивацию и химическое осаждение) (рис. 1).

$C(t)$ – скорость потребления элемента растениями, которая увеличивается со временем линейно за счет роста фитомассы растения и задается уравнением:

$$C(t) = k_1 t, \quad (4)$$

где коэффициент k_1 – скорость нарастания потребления элемента растениями, мг/(100 г сут.²), также пропорционален плотности растений (через коэффициент k_2):

$$k_1 = 2k_2 / T^2, \quad (5)$$

где T – вегетационный период активного роста растения, принятый равным 100 суткам.

Параметры модели, использованные для параметризации модели к экспериментальным данным, относятся к процессам мо-

билизации и иммобилизации питательного элемента в почве k_5 и k_6 .

Моделирование, статистическую обработку данных и работу с графикой проводили на языке R версии 4.3.1 (R Core Team, 2022). Для определения статистически значимых различий между средними в вариантах опыта применяли апостериорный критерий Тьюки HSD (честно значимая разница) для однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с уровнем достоверности более 95%. Апостериорный критерий Тьюки является модифицированным критерием Стьюдента для множественного сравнения независимых групп при одинаковом их размере и одинаковых дисперсиях. Одинаковость дисперсий выборок проверялась критерием Фишера. Для визуализации результатов множественных сравнительных анализов использовали метод отображения компактных букв (CLD), в котором значимыми отличиями между своими средними величинами обладают группы, в индексации которых нет ни одной общей буквы (библиотека R multcompView). Проверку достоверности тренда изменения для измеряемых характеристик урожая и почвы с увеличением количества полимера в ПМУ определяли при помощи F-критерия Фишера (для взвешенного линейного тренда).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные. Применение полимер-модифицированной азофоски приводит к значимому увеличению урожайности озимой пшеницы (рис. 2а). Поскольку доза действующего вещества азофоски во всех вариантах опыта одинаковая, то результаты эксперимента показывают влияние на урожайность именно добавленного в азофоску полимера. Варианты ПМУ-15 и ПМУ-20 значимо отличаются от чистой азофоски, где максимальная прибавка урожая была в варианте ПМУ-20 и составила 1.3 ± 0.2 т/га (или 25% от урожайности с азофоской – 5 т/га). В целом в ряду увеличения концентрации полимера от 5 до 20% обнаружен статистически значимый тренд роста урожайности ($p_{\text{val}} = 0.007$). Также значимые отличия и/или значимый положительный линейный тренд с концентрацией полимера в азофоске обнаружен для таких показателей урожайной продукции, как количество колось-

ев, количество зерен в колосе, масса зерен в колосе, и всхожесть (рис. 2).

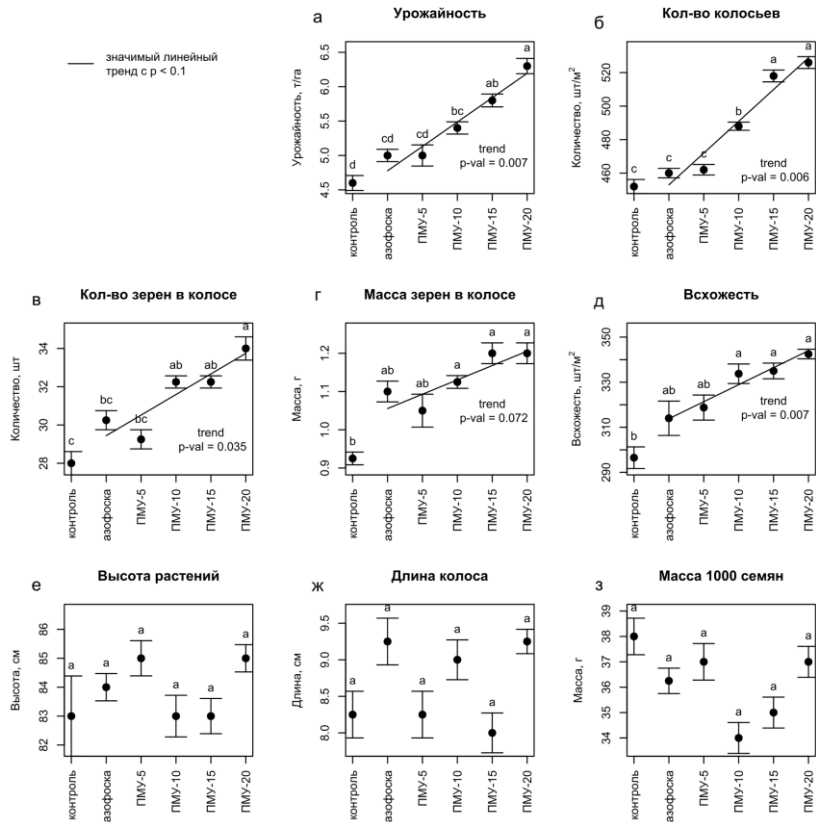


Рис. 2. Урожайность и структура урожая для разных вариантов опыта. Приведены средние значения для 4 полевых повторностей со стандартной ошибкой среднего.

Fig. 2. Yield and yield structure for different variants of the experient. The average values for 4 field replicates with the standard error of the mean are given.

Результаты агрохимического анализа почвы перед внесением удобрений свидетельствуют о том, что исходная почва относилась к группе среднего содержания гумуса (4.1 %), имела реакцию почвенного раствора оптимальную для роста и развития пшеницы (рН 6.8), очень низкую обеспеченность фосфором (0.9 мг/100 г почвы), низкую обеспеченность калием (18 мг/100 г почвы) и среднюю обеспеченность нитратным азотом (1.0 мг/100г почвы) (рис. 3, базовые линии).

К стадии колошения состояние почвы в разных вариантах опыта изменилось относительно исходного по таким показателям плодородия, как содержание подвижных форм фосфора и калия и нитратного азота. По подвижному фосфору все варианты опыта значительно отличались от исходного содержания в большую сторону, при этом все варианты с ПМУ перешли из области низкой в область средней обеспеченности подвижным фосфором (рис. 3а). Также в серии возрастающей концентрации полимера был выявлен значимый возрастающий линейный тренд, а содержание подвижного фосфора в ПМУ-20 был значимо выше, чем в варианте чистой азофоски.

По подвижному калию между вариантами опыта не было достоверных различий на уровне 95%, но зафиксирован значимый возрастающий линейный тренд изменений в серии возрастающей концентрации полимера. При этом все варианты, кроме контроля, перешли из области низкой в область средней обеспеченности по подвижному калию (рис. 3б).

По нитратному азоту все изменения относительно исходного состояния наоборот произошли в сторону снижения также со значимым положительным трендом в серии концентраций полимера. От варианта чистой азофоски отличался только вариант ПМУ-20, и только ПМУ-20 при этом не отличался значимо от исходного содержания в почве, т. е. испытал наименьшее снижение в содержании нитратного азота (рис. 3в). Тем не менее, исходное состояние относилось к нижней границе области средней обеспеченности нитратным азотом, ПМУ-20 перешел в область низкой обеспеченности, а все остальные варианты опыта оказались уже в области очень низкой обеспеченности нитратным азотом.

Статистически значимых изменений pH со временем и с ростом концентрации полимера не было даже в крайних вариантах опыта. Обозначен достоверный положительный тренд роста pH между этими вариантами в пределах 0.5 единицы, что не является существенным для роста растения и растворения питательных элементов (рис. 3г).

Величины, приведенные для первой фазы кущения на рисунке 3, показывают, что описанные общие тренды изменений начали формироваться в почве уже на стадии фазы кущения озимой пшеницы.

Расчеты баланса и эффективности. При расчете баланса для питательных элементов видно, что вынос элементов с урожаем (азота 4.2–5.8, фосфора 1.5–2.1 и калия 3.1–4.2 мг/100 г почвы) во всех вариантах опыта превышает его внесение с удобрениями (0.9–1.1 мг/100 г почвы), следовательно, недостающее питание растение получает из почвы (табл. 1). Снижение содержания нитратного азота в почве не покрывает эту разницу, а для фосфора и калия, более того, в почве наблюдается накопление подвижных форм, для фосфора – от 50 до 150% относительно исходного содержания, и для калия – от 4 до 30% в разных вариантах опыта. В условиях проводимого эксперимента рассчитанный баланс элементов питания между поступлением и выносом, учитывая изменения в почве, можно объяснить только мобилизацией этих элементов из почвы. Итак, суммарный прирост к стадии колошения для нитратного азота в результате мобилизации составил в контроле 3.5 мг/100 г почвы, и в серии концентраций полимера увеличивался от 3 (азофоска) до 4.7 мг/100 г почвы (ПМУ-20). Для фосфора прирост подвижной формы составил в контроле 2 мг/100 г почвы и в серии концентраций полимера увеличивался от 1.3 до 2.5 мг/100 г почвы. Для калия, в отличие от нитратного азота и фосфора, прирост подвижной формы в контроле был минимальным – 3.8 мг/100 г почвы, а в серии концентраций полимера увеличивался от 4.9 до 8.8 мг/100 г почвы.

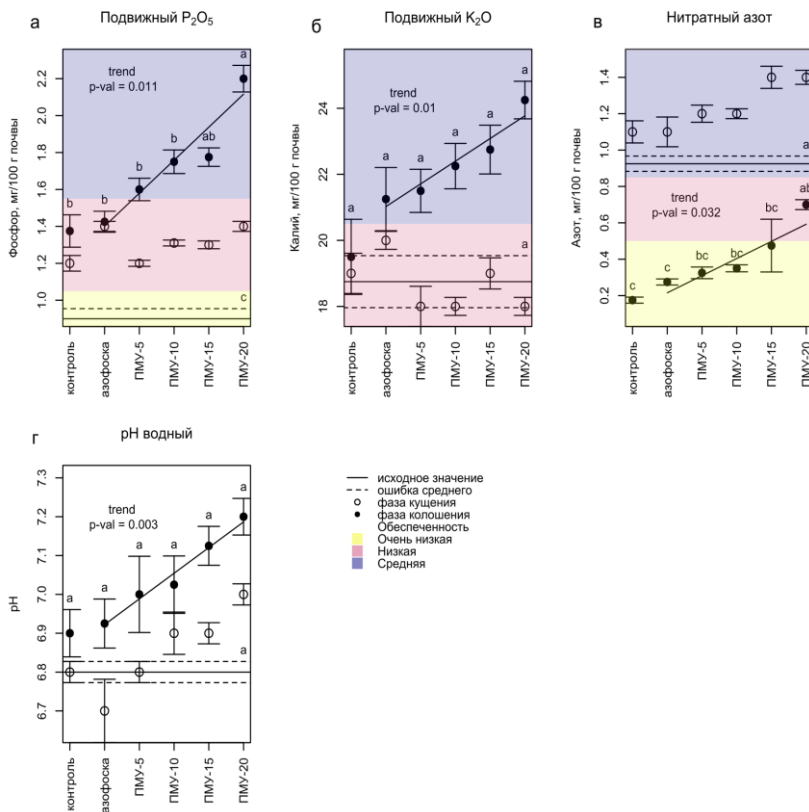


Рис. 3. Показатели эффективного плодородия почвы в разных вариантах опыта в фазу кущения и фазу колошения относительно базовой линии (исходные значения до посева). Цветовой фон отражает зоны обеспеченности почвы показателем плодородия. Приведены средние значения для 4 полевых повторностей со стандартной ошибкой среднего.

Fig. 3. Indicators of effective soil fertility in different variants of the experiment in the tillering phase and the earing phase relative to the baseline (initial values before sowing). The color background reflects the zones of availability levels for each fertility indicator in the soil. The average values for 4 field replicates with the standard error of the mean are given.

Таблица 1. Баланс элементов питания для вариантов опыта на момент колошения с оценкой прироста подвижной формы (по разнице)

Table 1. The balance of nutrient elements for the variants of the experiment at the stage of earing with an estimate of the surplus of the its mobile form (by difference)

-	Контроль	Азофоска	ПМУ-5	ПМУ-10	ПМУ-15	ПМУ-20
Количество, мг/100 г почвы	Баланс азота					
начальное содержание	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
внесено с удобрением	0	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9
вынос с зерном и пожнивными остатками	4.2	4.6	4.6	5	5.3	5.8
в почве на момент кущения*	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4	1.4
в почве на момент колошения	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7
Оценка прироста подвижной формы	3.5	3.0	2.9	3.4	3.9	4.7
Добавочная эффективность удобрения		0 ^C	0.1 ^{BC}	0.5 ^{BC}	1.0 ^A	1.8 ^A

Продолжение таблицы
Table 1 continued

-	Контроль	Азофоска	ПМУ-5	ПМУ-10	ПМУ-15	ПМУ-20
Количество, мг/100 г почвы	Баланс фосфора					
начальное содержание	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
внесено с удобрением	0	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9
вынос с зерном и пожнивными остатками	1.5	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1
в почве на момент кущения*	1.2	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4
в почве на момент колошения	1.4	1.4	1.6	1.8	1.8	2.2
Оценка прироста подвижной формы	2.0	1.3	1.3	1.7	1.9	2.5
Добавочная эффективность удобрения		0 ^C	0.2 ^{BC}	0.5 ^{BC}	0.7 ^B	1.3 ^A

Продолжение таблицы
Table 1 continued

-	Контроль	Азофоска	ПМУ-5	ПМУ-10	ПМУ-15	ПМУ-20
Количество, мг/100 г почвы	Баланс калия					
начальное содержание	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
внесено с удобрением	0	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9
вынос с зерном и пожнивными остатками	3.1	3.3	3.3	3.6	3.9	4.2
в почве на момент кущения*	19	20	18	18	19	18
в почве на момент колошения	19.5	21.2	21.5	22.2	22.8	24.2
Оценка прироста подвижной формы	3.8	4.9	5.0	6.1	6.9	8.8
Добавочная эффективность удобрения		0 ^A	0.3 ^A	1.4 ^A	2.3 ^A	4.3 ^A

Примечание. *Содержания элементов в почве на момент кущения приведены для информации и не участвовали в расчете баланса.

Note. *The contents of elements in the soil at the stage of tillering are given for information and were not considered in the calculation of the balance.

Также для всех вариантов с внесением удобрения была рассчитана добавочная эффективность удобрения по каждому элементу питания (табл. 1). Эта эффективность отражает увеличение эффективности удобрения от присутствия полимера, поскольку доза удобрения между вариантами одинакова. Для ее расчета используется соотношение общей прибыли элемента (сумма, обеспечивающая формирование урожая и повышение плодородия) к количеству, внесенному с удобрением (Баматов и др., 2022). В результате добавочная эффективность для фосфора в серии концентрации полимера монотонно росла с 0 (чистая азофоска) до 1.3 (ПМУ-20), т. е. при концентрации полимера 20% – только за счет полимера относительно чистой азофоски – было дополнительно получено на 1 мг внесенного удобрения 1.8 мг подвижного элемента в виде фитомассы и/или прибавки плодородия по фосфору. Соответственно, добавочная эффективность ПМУ для калия монотонно росла от 0 до 4.3, а для нитратного азота – от 0 до 1.8.

Моделирование мобилизации элементов в почве. Для понимания механизма выявленной выше эффективности ПМУ и его влияния на почвенное плодородие была построена динамическая модель согласно общей теоретической схеме процессов на примере фосфора, представленной на рисунке 1. При помощи моделирования проведена оценка реалистичности описания полученных результатов по приросту подвижных форм питательных элементов (прибавки эффективного плодородия почвы) в результате процессов мобилизации/инактивации в почве для контроля, чистой азофоски и удобрения пролонгированного действия на примере наиболее контрастных и статистически значимых данных варианта ПМУ-20. В модели концентрации подвижного элемента в почве в каждый момент времени влияют три составляющие: скорость растворения удобрения, потребление его растениями и суммарный результат процессов мобилизации и инактивации элемента в почве. Модель параметризована к экспериментальным данным только двумя коэффициентами: базовой мобилизации (k_5) и инактивации (k_6), – так что результаты всех процессов соответствуют экспериментальным данным (табл. 2), (рис. 4).

Таблица 2. Параметры модели, оптимизированной для описания данных эксперимента

Table 2. Model parameters after optimization to fit experimental data

Параметр	Контроль	Азофоска	ПМУ20	Описание
T	100			продолжительность активного вегетационного сезона, сут
k_2	1.5	1.66	2.1	вынос элемента питания с растениями коэффициент ускорения мобилизации растениями, мг/100 г почвы
k_3	0	0.9	0.9	фактическое количество внесенного питательного элемента, мг/100 г почвы
k_4	-	10	100	время полного растворения удобрения, сут
k_5	0.06			базовая скорость мобилизации элемента из почвы, 1/сут
k_6	0.05			общий коэффициент перехода питательного элемента из подвижного пула в потенциально доступный в результате иммобилизации и химического осаждения, 1/сут

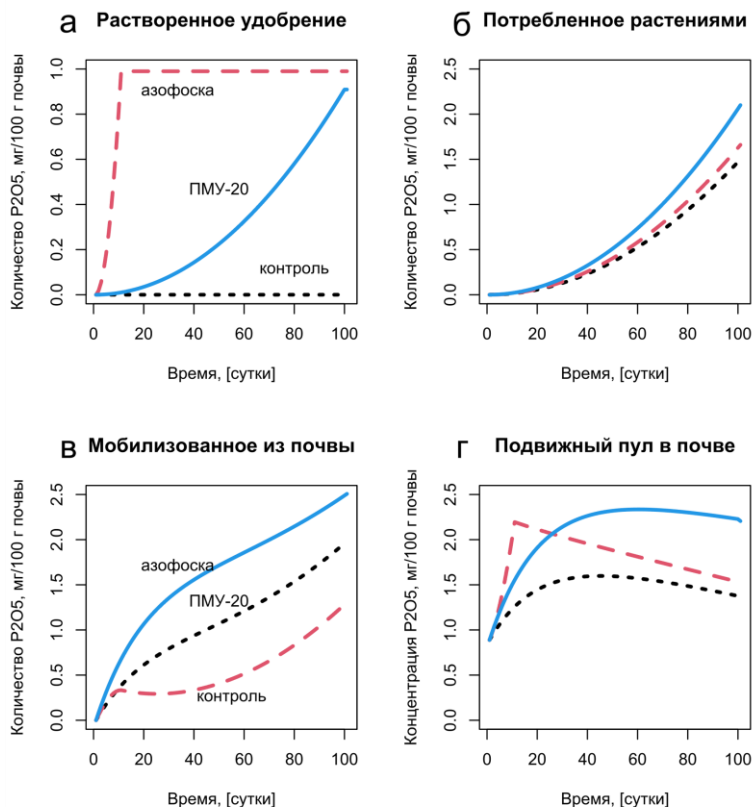


Рис. 4. Результат всех 4 процессов модели в виде динамики во времени (растворение удобрения, потребление растениями фосфора, мобилизация из почвы, концентрация в почве) для 3 вариантов опыта: контроль (черная пунктирная линия, без внесения), традиционная форма удобрения (красная штриховая линия, быстрое растворение) и пролонгированное удобрение (синяя сплошная линия, медленное растворение).

Fig. 4. The result of all 4 processes in the model shown as the changes over time (dissolution of fertilizer, phosphorus consumption by plants, mobilization from soil, concentration in soil) for 3 variants of the experiment: control (black dotted line, without fertilizer application), the traditional form of fertilizer (red dashed line, rapid dissolution) and slow-release fertilizer (blue solid line, slow dissolution).

Все результаты моделирования показаны на рисунке 4. Интегральные кривые динамики растворения двух типов удобрений показаны на рисунке 4а. Азофоска растворяется полностью в первые 10 дней, в то время как ПМУ-20 – в течение 100 дней, в контроле удобрение отсутствовало.

Потребление растениями растет в течение всего сезона и достигает экспериментальных значений (рис. 4б). Видно, что в контроле и в варианте Азофоска потребление растениями ограничено по сравнению с ПМУ-20.

Кривые нетто мобилизации фосфора из почвы чистой азофоски и полимер-модифицированной находятся по разные стороны от контроля (рис. 4в). В контроле в отсутствие удобрений растения поглощают имеющийся почвенный фосфор, тем самым снижают его концентрацию и замедляют инактивацию, которая пропорциональна концентрации элемента в растворе. Равновесие сдвигается в сторону мобилизации. В случае ПМУ-20 мобилизация на протяжении всего сезона идет быстрее, чем в контроле, поскольку поступление из удобрения медленное, а растения поглощают фосфор быстрее, так как плотность корней больше (всхожесть выше) и, соответственно, итоговый вынос выше. Поскольку запас элемента в почве несравнимо больше пула непосредственно доступного растениям, то базовая скорость мобилизации, в отличие от инактивации, не зависит от концентрации и принимается равной константе. Однако базовая скорость мобилизации ускоряется экссудатами корней, соответственно, она пропорциональна растущей биомассе. В случае чистой азофоски, наоборот, быстрое растворение еще больше насыщает пул доступного элемента с самого начала и, таким образом, увеличивает скорость инактивации, равновесие смещается, и величина итоговой мобилизации снижается. Разница нетто мобилизации к концу сезона с чистой азофоской составляет 1.2 мг $P_2O_5/100$ г почвы.

Концентрация подвижного фосфора в почве, согласно модели, в контроле сначала вырастает за счет того, что скорость мобилизации выше скорости потребления растениями, но затем по мере роста потребления начинает снижаться. Контрольный вариант полностью обеспечивает урожай за счет почвенных запасов, но при этом и ограничивает урожай. В варианте Азофоски происхо-

дит быстрое обогащение почвы вначале при растворении удобрения, а затем большая часть этого прироста потребляется растениями. Поскольку процесс мобилизации с самого начала подавлен азотфоской и начинает ускоряться только во второй половине периода вегетации при снижении концентрации в почве, то итоговая прибавка подвижной формы фосфора в почве составляет только 0.5 мг/100 г почвы. В случае пролонгированного удобрения концентрация в почве сразу начинает нарастать за счет активного процесса мобилизации и выходит на плато с прибавкой подвижной формы фосфора в почве 1.3 мг/100 г почвы.

Установленный эффект пролонгированных удобрений на урожайность и характеристики растения согласуется с другими исследованиями, в которых пролонгированные удобрения, по сравнению с традиционными, влияли на длину листа и содержание хлорофилла у лука туберозного (Wang et al., 2021), качество и урожай яровой пшеницы (Ghafoor et al., 2022), урожайность, активность корней, число зерен и массу зерна яровой кукурузы (Li et al., 2022). Из обнаруженных эффектов особое значение для настоящего исследования имеет повышенная всхожесть озимой пшеницы в вариантах с ПМУ, поскольку она напрямую влияет на плотность корней в почве, а, следовательно, и на интенсивность корневой экссудации. Потребление элементов питания растениями происходит через корни в ризосфере, где у пшеницы кислотность может быть на 2 единицы ниже, чем в почве (Barrow, 2017; Smiley, 1979). Корни ускоряют растворение фосфора и его переход в подвижную форму (Richardson et al., 2011). Для учета этого эффекта в модели мобилизации фосфора (уравнение 3) в дополнение к базовой скорости его мобилизации в почве (k_5) использовался коэффициент k_2 (пропорциональный количеству растений). Коэффициент, ускоряющий мобилизацию за счет корневых экссудатов, нормирован, так что он имеет величину итогового выноса с урожаем в каждом варианте опыта.

Внесение в почву хорошо растворимых в воде фосфорных удобрений приводит к высоким концентрациям фосфора в почвенном растворе, что способствует раннему росту сельскохозяйственных культур, но фосфор из этого раствора быстро адсорбируется и иммобилизуется на поверхности частиц почвы. Это при-

водит к гораздо более ограниченному поступлению фосфора в сельскохозяйственные культуры на более поздних стадиях роста, когда спрос сельскохозяйственных культур на фосфор высок. При этом насыщенность пула потенциально доступного фосфора фосфором удобрения блокирует пополнение этого пула из других малорастворимых форм валового фосфора, т. е. мобилизацию фосфора почвы. В итоге ограничивается развитие растений и, как следствие, урожайность.

Содержание подвижного фосфора в количестве 1.5 мг/100 г почвы соответствует естественному фосфатному фону. Подвижный фосфор по Мачигину, используемый в настоящей работе, больше выступает как фактор емкости почвы к фосфат ионам. Возможно, что пул непосредственно доступного растениям фосфора на самом деле еще меньше, и поэтому в эксперименте при наличии подвижного фосфора в почве в количестве 1.5 мг/100 г почвы уже наблюдается ограничение роста озимой пшеницы.

В исследуемом эксперименте применялась система удобрения с дефицитным балансом по всем трем элементам питания (в среднем по вариантам опыта интенсивность баланса составляла для N – 20%, P – 50%, K – 25% внесение относительно выноса). Известно, что внесение удобрений с дефицитным балансом само по себе может приводить к мобилизации почвенного ресурса. Оптimum содержания подвижного фосфора для роста озимой пшеницы составляет 3.0–3.5 мг/100 г почвы при плановом урожае 5–6 т/га. В нашем опыте при плановом урожае 5 т/га, который был достигнут в варианте опыта с обычной азофоской, исходное содержание подвижного фосфора в почве составляло 0.9 ± 0.1 мг/100 г почвы. Таким образом, небаланс фосфора равен 2–2.5 мг/100 г почвы, что соответствует количеству фосфора, мобилизованному из почвы в настоящем эксперименте в вариантах с ПМУ. Высокое значение мобилизации в контрольном варианте также может объясняться тем, что в отсутствие внесения удобрения мобилизация почвенных запасов начинается раньше. Общее количество мобилизованного азота и фосфора в контрольном варианте превышает все варианты, в которых содержится большая доля быстрорастворимого удобрения (чистая Азофоска, ПМУ-5, ПМУ-10), но уступает ПМУ-15 и ПМУ-20, т. к. последние ввиду

меньшей растворимости похожи на контроль по концентрации подвижного фосфора в почве, но при этом в них поддерживается рост большего количества растений за счет дополнительного постоянно растворяющегося удобрения. Большее число растений обеспечивает ускорение мобилизации элементов. Для калия контрольный вариант имеет наименьшую величину мобилизации, что может быть объяснено общей высокой мобилизационной активностью в отношении калия для чернозема выщелоченного, особенно при применении минеральных удобрений (Воронкова, Храмцов, 2015; Леплявченко и др., 2009).

Различие в количестве нетто мобилизованного фосфора между вариантами опыта в модели создает именно коэффициент инактивации (k_6), поскольку он умножается на динамическую концентрацию подвижной формы элемента в почве, которая в случае традиционного удобрения сразу после внесения имеет высокое значение (рис. 4а), а для серии ПМУ и для контроля – около нуля. Таким образом, единовременно вносимое удобрение в большой концентрации контактирует с почвой и, соответственно, существенная часть его инактивируется. Преимуществом пролонгированного удобрения является то, что оно выделяется постепенно и не контактирует с почвой длительное время в большой концентрации, и таким образом не подвержено значительной инактивации.

На диаграмме (рис. 5) показано состояние почвы в конце эксперимента в координатах показателей эффективного плодородия относительно ее начального состояния.

Видно, что в настоящем эксперименте с применением ПМУ выщелоченный чернозем перешел на более высокий уровень эффективного плодородия за счет мобилизации внутренних ресурсов, что согласуется с литературой (Aarnio et al., 2003; Ghafoor et al., 2022). Чем меньше скорость растворения азофоски, тем больше выражена прибавка показателей плодородия. Запасы фосфора и калия, особенно в черноземах, считаются довольно большими, и их можно использовать в дополнение к удобрениям пролонгированного действия в течение нескольких десятков лет. При этом истощение почвы не должно происходить, поскольку при многолетнем окультуривании пахотного слоя неизбежно происходит

эрозия, и к пахотному слою постепенно припахиваются нижележащие горизонты, восполняющие валовые запасы.

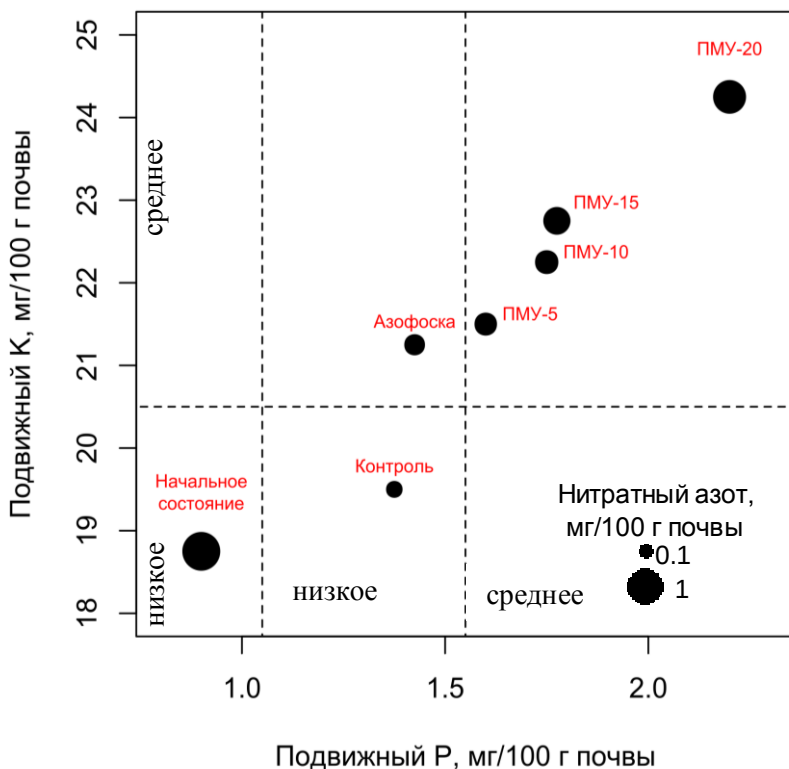


Рис. 5. Диаграмма состояния почвы на момент фазы колошения в координатах показателей плодородия почвы (подвижные фосфор, калий, нитратный азот) для всех вариантов опыта относительно начального состояния почвы. Пунктиром обозначены соответствующие зоны обеспечения для данной почвы.

Fig. 5. Soil state diagram at earing phase in the coordinates of soil fertility indicators (mobile phosphorus, potassium, nitrate nitrogen) for all variants of the experiment compared to the the initial state of the soil. The dotted line indicates the corresponding zone of nutrient availability level for this soil.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, удобрения пролонгированного действия являются эффективными, поскольку плановая урожайность может быть достигнута с меньшим расходом минерального удобрения по сравнению с его быстрорастворимой формой. Влияние ПМУ на почвы задействует процесс мобилизации внутренних почвенных запасов, за счет чего можно одновременно повысить уровень эффективного плодородия почвы и снизить затраты на удобрения. Проектирование ПМУ с кривыми растворения питательных элементов, соответствующими потребностям сельскохозяйственной культуры в конкретные фазы, открывает перспективы разработки наиболее оптимальной системы удобрения на основе ПМУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баматов И.М., Васильева Н.А., Васильев Т.А., Перевертин К.А.* Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 90–109. DOI: [10.19047/01361694-2022-113-90-109](https://doi.org/10.19047/01361694-2022-113-90-109).
2. *Воронкова Н.А., Храмцов И.Ф.* Влияние длительного применения минеральных удобрений и соломы в севообороте на калийный режим чернозема выщелоченного // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. (часть 2). С. 307–312.
3. *Елешев Р.Е., Иванов А.Л.* Фосфорный режим почв Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1990. 160 с.
4. *Иорданский А.Л., Моисеев Ю.В., Маркин В.С.* Исследование диффузии водных растворов кислот в пленке из поливинилового спирта // Высокомолекулярные соединения. 1972. XIV. № 4. С. 801–805.
5. *Капцынель Ю.И., Казанцева О.Ф.* Агрохимическая эффективность капсулированной мочевины // Бюллетень ВИУА. 1990. С. 6–10.
6. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв в интенсивном земледелии // Земледелие. 1987. № 5. С. 2–6.
7. *Козел Е.Г.* Получение капсулированных с ингибитором форм мочевины и их влияние на активность уреазы и содержания азота в почве // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 224–225.
8. *Кореньков Д.А.* Минеральные удобрения и их рациональное применения. Россельхозиздат, 1973. 176 с.

9. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Глоба А.И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: БГТУ, 2014. 105 с.
10. Леплявченко Л.П., Громова Л.И., Онищенко Л.М., Дроздова В.В., Ерезенко Е.Е., Осипов М.А. Агрохимические свойства чернозема выщелоченного и продуктивность полевого севооборота в связи с применением минеральных удобрений // Научный журнал КубГАУ. 2009. № 46(2). С. 91–145.
11. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: МГУ, КолосС, 2004. 718 с.
12. Пироговская Г.В. Медленнодействующие удобрения. Минск: БНИИПА, 2000. 287 с.
13. Aarnio T., Rätty M., Martikainen P.J. Long-Term Availability of Nutrients in Forest Soil Derived from Fast- and Slow-Release Fertilizers // Plant and Soil. 2003. 252 (2). P. 227–239. DOI: [10.1023/A:1024765211123](https://doi.org/10.1023/A:1024765211123).
14. Barrow N.J. The Effects of pH on phosphate uptake from the soil // Plant and Soil. 2017. 410. No. 1/2. P. 401–410. DOI: [10.1007/s11104-016-3008-9](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9).
15. Białkowska A., Borycka B., Bakar M., Rżany A. Innovative NPK Fertilizers based on Polyacrylamide and Polyvinyl Alcohol with Controlled Release of Nutrients // Polish Journal of Chemical Technology. Vol. 24. No. 3. P. 14–18. DOI: [10.2478/pjct-2022-0017](https://doi.org/10.2478/pjct-2022-0017).
16. Boyandin A.N., Kazantseva E.A., Varygina D.E., Volova T.G. Constructing slow-release formulations of ammonium nitrate fertilizer based on degradable poly (3-hydroxybutyrate) // J. Agr. Food Chem. 2017. Vol. 65(32). P. 6745–6752. DOI: [10.1021/acs.jafc.7b01217](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01217).
17. Ghaffoor I., Rahman M.H.U., Hasnain M.U., Ikram R.M., Khan M.A., Iqbal R., Hussain M.I., Sabagh A.E. Effect of slow-release nitrogenous fertilizers on dry matter accumulation, grain nutritional quality, water productivity and wheat yield under an arid environment // Sci. Rep. 2022. Vol. 12(1). Art. No. 14783. DOI: [10.1038/s41598-022-18867-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-18867-5).
18. Ibrahim M., Iqbal M., Tang Y.-T., Khan S., Guan D.-X., Li G. Phosphorus Mobilization in Plant–Soil Environments and Inspired Strategies for Managing Phosphorus: A Review // Agronomy. 2022. Vol. 12. P. 2539. DOI: [10.3390/agronomy12102539](https://doi.org/10.3390/agronomy12102539).
19. Kontárová S., Přikryl R., Škarpa P., Křiška T., Antošovský J., Gregušková Z., Figalla S., Jašek V., Sedlmajer M., Menčík P., Mikolajová M. Slow-Release Nitrogen Fertilizers with Biodegradable Poly(3-hydroxybutyrate) Coating: Their Effect on the Growth of Maize and the Dynamics of N Release in Soil. Polymers. 2022. Vol. 14(20). Art. No. 4323. DOI: [10.3390/polym14204323](https://doi.org/10.3390/polym14204323).
20. Li G., Fu P., Cheng G., Lu W., Lu D. Delaying application time of slow-release fertilizer increases soil rhizosphere nitrogen content, root activity, and

grain yield of spring maize // *The Crop Journal*. 2022. Vol. 10(6). P. 1798–1806. DOI: [10.1016/j.cj.2022.04.014](https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.04.014).

21. Richardson A.E., Lynch J.P., Ryan P.R., Delhaize E.F., Smith A., Smith S.E., Harvey P.R., Ryan M.H., Veneklaas E.J., Lambers H., Oberson A., Culvenor R.A., Simpson R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture // *Plant Soil*. 2011. Vol. 349. P. 121–156. DOI: [10.1007/s11104-011-0950-4](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4).

22. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2022. URL: <https://www.R-project.org/>.

23. Shaviv A. Advances in Controlled-Release Fertilizers // *Advances in Agronomy*. 2001. Vol. 71. P. 2–51.

24. Shaviv A., Ahaviv A., Mikkelsen R.L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation // *Fertilizer Research. A review*. 1993. Vol. 35. P. 1–12.

25. Smiley R.W. Wheat rhizosphere ph and the biological control of take-all / J.L. Harley, R.S. Russell (Eds). *The Soil–Root Interface*. Academic Press, 1979. P. 329–338. DOI: [10.1016/B978-0-12-325550-1.50033-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-325550-1.50033-1).

26. Sofyane A., Ablouh E., Lahcini M., Elmeziiane A., Khouloud M., Kaddami H., Raihane M. Slow-release fertilizers based on starch acetate/glycerol/polyvinyl alcohol biocomposites for sustained nutrient release, *Proc. “Materials Today”*. 2021. Vol. 36. Part 1. P. 74–81. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.05.319](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.319).

27. Talboys P.J., Heppell J., Roose T. Healey J.R., Jones D.L., Withers P.J.A. Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management // *Plant Soil*. 2016. Vol. 401. P. 109–123. DOI: [10.1007/s11104-015-2747-3](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2747-3).

28. Trenkel M.E. Slow – and Controlled-Release Fertilizer: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. Paris, International Fertilizer Industry Association (IFI), 2010. 163 p.

29. Wang C., Lv J., Xie J., Yu J., Li J., Zhang J., Tang C., Niu T., Patience B.E. Effect of slow-release fertilizer on soil fertility and growth and quality of wintering Chinese chives (*Allium tuberm Rottler ex Spreng.*) in greenhouses // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11(1). Art. No. 8070. DOI: [10.1038/s41598-021-87593-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-87593-1).

REFERENCES

1. Bamatov I.M., Vasilyeva N.A., Vladimirov A.A., Vasiliev T.A., Perevertin K.A., Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 113, pp. 90–109,

DOI: [10.19047/0136-1694-2022-113-90-109](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-90-109).

2. Voronkova N.A., Khramtsov I.F., Vliyanie dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobrenii i solomy v sevooborote na kaliinyi rezhim chernozema vyshchelochennogo (The effect of long-term use of mineral fertilizers and straw in crop rotation on the potassium regime of leached chernozem), *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, No. 2 (chast' 2), pp. 307–312.
3. Eleshev R.E., Ivanov A.L., *Fosfornyi rezhim pochv Kazakhstana* (Phosphorus regime of soils in Kazakhstan), Alma-Ata: Nauka, 1990, 160 p.
4. Iordanskiy A.L., Moiseyev Yu.V., Markin V.S., Issledovaniye diffuzii vodnykh rastvorov kisloty v plenke iz polivinilovogo spirta (Study of diffusion of aqueous solutions of acids in polyvinyl alcohol film), *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, 1972, XIVA, No. 4, pp. 801–805.
5. Kaptsynel' Yu.I., Kazantseva O.F., Agrokhimicheskaya effektivnost' kapsulirovannoi mocheviny (Agrochemical efficiency of encapsulated urea), *Byulleten' VIUA*, 1990, pp. 6–10.
6. Kiryushin V.I., Upravlenie plodorodiem pochv v intensivnom zemledelii (Soil Fertility Management in Intensive Farming), *Zemledelie*, 1987, No. 5, pp. 2–6.
7. Kozel E.G., Poluchenie kapsulirovannykh s ingibitorom form mocheviny i ikh vliyanie na aktivnost' ureazy i sodержaniya azota v pochve (Obtaining urea forms encapsulated with an inhibitor and their effect on urease activity and nitrogen content in the soil), *Innovatsii i investitsii*, 2019, No. 10, pp. 224–225.
8. Koren'kov D.A., *Mineral'nye udobreniya i ikh ratsional'noe primeneniya* (Mineral fertilizers and their rational use), Moskva: Rossel'khozizdat, 1973, 2 ed., 176 p.
9. Krut'ko E.T., Prokopchuk N.R., Globa A.I., *Tekhnologiya biorazlagayemykh polimernykh materialov* (Technology of biodegradable polymeric materials), Minsk: BGTU, 2014, 105 p.
10. Leplyavcheno L.P., Gromova L.I., Onishchenko L.M., Drozdova V.V., Erezenko E.E., Osipov M.A., Agrokhimicheskie svoystva chernozema vyshchelochennogo i produktivnost' polevogo sevooborota v svyazi s primeneniem mineral'nykh udobrenii (Agrochemical properties of leached chernozem and productivity of field crop rotation in connection with the use of mineral fertilizers), *Nauchnyi zhurnal KubGAU*, 2009, No. 46(2), pp. 91–145.
11. Mineev V.G., *Agrokhimiya* (Agrochemistry), Moskva: MGU, KolosS, 2004, 718 p.
12. Pirogovskaya G.V., *Medlennodeistvuyushchie udobreniya* (Slow-release fertilizers), Minsk: BNIIPA, 2000, 287 p.
13. Aarnio T., Rätty M., Martikainen P.J., Long-Term availability of nutrients in forest soil derived from fast- and slow-release fertilizers, *Plant and Soil*, 2003,

Vol. 252, No. 2, pp. 227–239, DOI: [10.1023/A:1024765211123](https://doi.org/10.1023/A:1024765211123).

14. Barrow N.J., The Effects of pH on Phosphate Uptake from the Soil, *Plant and Soil*, 2017, Vol. 410, No. 1/2, pp. 401–410, DOI: [10.1007/s11104-016-3008-9](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9).

15. Białkowska A., Borycka B., Bakar M., Rżany A., Innovative NPK fertilizers based on polyacrylamide and polyvinyl alcohol with controlled release of nutrients, *Polish Journal of Chemical Technology*, 2022, Vol. 24, No. 3, pp. 14–18, DOI: [10.2478/pjct-2022-0017](https://doi.org/10.2478/pjct-2022-0017).

16. Boyandin A.N., Kazantseva E.A., Varygina D.E., Volova T.G., Constructing slow-release formulations of ammonium nitrate fertilizer based on degradable poly (3-hydroxybutyrate), *J. Agr. Food Chem.*, 2017, Vol. 65, No. 32, pp. 6745–6752, DOI: [10.1021/acs.jafc.7b01217](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01217).

17. Ghafoor I., Rahman M.H.U., Hasnain M.U., Ikram R.M., Khan M.A., Iqbal R., Hussain M.I., Sabagh A.E., Effect of slow-release nitrogenous fertilizers on dry matter accumulation, grain nutritional quality, water productivity and wheat yield under an arid environment, *Sci Rep.*, 2022, Vol. 12, No. 1, pp. 14783, DOI: [10.1038/s41598-022-18867-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-18867-5).

18. Ibrahim M., Iqbal M., Tang Y.-T., Khan S., Guan D.-X., Li G., Phosphorus mobilization in plant–soil environments and inspired strategies for managing phosphorus: A Review, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, pp. 2539, DOI: [10.3390/agronomy12102539](https://doi.org/10.3390/agronomy12102539).

19. Kontárová S., Přikryl R., Škarpa P., Křiška T., Antošovský J., Gregušková Z., Figalla S., Jašek V., Sedlmajer M., Menčík P., Mikolajová M., Slow-release nitrogen fertilizers with biodegradable poly(3-hydroxybutyrate) coating: their effect on the growth of maize and the dynamics of N release in soil, *Polymers*, 2022, Vol. 14, No. 20, pp. 4323, DOI: [10.3390/polym14204323](https://doi.org/10.3390/polym14204323).

20. Li G., Fu P., Cheng G., Lu W., Lu D., Delaying application time of slow-release fertilizer increases soil rhizosphere nitrogen content, root activity, and grain yield of spring maize, *The Crop Journal*, 2022, Vol. 10, No. 6, pp. 1798–1806, DOI: [10.1016/j.cj.2022.04.014](https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.04.014).

21. Richardson A.E., Lynch J.P., Ryan P.R., Delhaize E.F., Smith A., Smith S.E., Harvey P.R., Ryan M.H., Veneklaas E.J., Lambers H., Oberson A., Culvenor R.A., Simpson R.J., Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture, *Plant Soil*, 2011, Vol. 349, pp. 121–156, DOI: [10.1007/s11104-011-0950-4](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4).

22. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, URL: <https://www.R-project.org/>.

23. Shaviv A., Advances in controlled-release fertilizers, *Advances in Agronomy*, 2001, Vol. 71, pp. 2–51.

24. Shaviv A., Ahaviv A., Mikkelsen R.L., Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation. A review, *Fertilizer Research*, 1993, Vol. 35, pp. 1–12.
25. Smiley R.W., Wheat rhizosphere ph and the biological control of take-all, J.L. Harley, R.S. Russell (Eds), *The Soil–Root Interface*, Academic Press, 1979, pp. 329–338, DOI: [10.1016/B978-0-12-325550-1.50033-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-325550-1.50033-1).
26. Sofyane A., Ablouh E., Lahcini M., Elmezziane A., Khouloud M., Kaddami H., Raihane M., Slow-release fertilizers based on starch acetate/glycerol/polyvinyl alcohol biocomposites for sustained nutrient release, *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 36, Part 1, pp. 74–81, DOI: [10.1016/j.matpr.2020.05.319](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.319).
27. Talboys P.J., Heppell J., Roose T., Healey J.R., Jones D.L., Withers P.J.A., Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management, *Plant Soil*, 2016, Vol. 401, pp. 109–123, DOI: [10.1007/s11104-015-2747-3](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2747-3).
28. Trenkel M.E., *Slow – and Controlled-Release Fertilizer: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*, International Fertilizer Industry Association (IFI), Paris, 2010, 163 p.
29. Wang C., Lv J., Xie J., Yu J., Li J., Zhang J., Tang C., Niu T., Patience B.E., Effect of slow-release fertilizer on soil fertility and growth and quality of wintering Chinese chives (*Allium tuberm Rottler ex Spreng.*) in greenhouses, *Sci Rep.*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 8070, DOI: [10.1038/s41598-021-87593-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-87593-1).

УДК 66.092-977, 631.879, 631.421.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-265-294



Ссылки для цитирования:

Пономарев К.О., Дрягина А.А., Филимоненко Е.А., Димитрюк И.Д. Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений элементов в почве // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 265-294. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-265-294

Cite this article as:

Ponomarev K.O., Dryagina A.A., Filimonenko E.A., Dimitryuk I.D., Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in the soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 265-294, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-265-294

Благодарность:

Биоугли получены на оборудовании, закупленном в рамках Госзадания № FEWZ-2024-0013 (Научно-технические основы и прикладные решения ресурсоэффективной термической переработки органического сырья с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью для энергетической, металлургической и сельскохозяйственной отраслей). Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-76-01011 “Разработка высокопродуктивного субстрата с использованием биоугольных мелиорантов из термически переработанного органического сырья для выращивания микрозелени и овощной низкорослой продукции” (<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>).

Acknowledgments:

Biochar was obtained using equipment purchased under State assignment No. FEWZ-2024-0013 (Scientific and technical foundations and applied solutions for resource-efficient thermal processing of organic raw materials to produce high value-added products for the energy, metallurgical and agricultural industries). The research was financially supported by the Russian Science Foundation under Project No. 23-76-01011 “Development of a high-yield substrate using biochar ameliorants from thermally processed organic raw materials for growing microgreens and low-growth vegetable products” (<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>).

Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений элементов в почве

© 2024 г. К. О. Пономарев*, А. А. Дрягина,
Е. А. Филимоненко, И. Д. Димитрюк

Тюменский государственный университет, Россия,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6,

* <https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.

Поступила в редакцию 20.10.2023, после доработки 17.01.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Для решения экологических проблем и снижения экономических затрат необходимо усовершенствовать системы применения минеральных удобрений путем разработки и внедрения новых технологий, включая использование биоуглей. Из-за отсутствия эффективного мониторинга изменений в почве сложно корректировать нормы внесения удобрений. Это обуславливает важность информации об элементном составе биоугольных мелиорантов, используемых при снижении подвижности тяжелых металлов в почве. Применение биоугля для восстановления загрязненных почв основано на его способности иммобилизовать тяжелые металлы и органические поллютанты. В работе использовались биоугли, полученные медленным пиролизом разных видов органических материалов: сосновых опилок, навоза крупного рогатого скота (КРС), пшеничной соломы, скорлупы кедрового ореха и пивной дробины. Проанализировано влияние биоуглей (доза внесения 10 т/га) на концентрацию 13 элементов (C, N, K, P, Mg, Ca, Fe, Mn, Pb, Ni, Cr, Cd, Co) в почве. Анализ данных проводился после выращивания мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) на дерново-подзолистых почвах. Установлено, что концентрации тяжелых металлов в мелиорированных биоуглями почвах значительно ниже предельно допустимых концентраций для почв (ПДК). Содержание свинца (Pb) в почвах с биоуглями в 9 и более раз ниже уровня ПДК, а биоуголь из отходов жизнедеятельности КРС достоверно снижает концентрацию этого металла в почве.

Ключевые слова: биоуголь; пиролиз; органические отходы; элементный состав; мелиорация почв.

Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in the soil

© 2024 K. O. Ponomarev*, A. A. Dryagina,
E. A. Filimonenko, I. D. Dimitryuk

¹University of Tyumen,

6 Volodarskogo Str., Tyumen 625003, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.

Received 20.10.2023, Revised 17.01.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: To solve environmental problems and reduce economic costs, it is necessary to improve mineral fertilizer application systems by developing and introducing new technologies, including the use of biochars. Due to the lack of effective monitoring of soil changes, it is difficult to adjust fertilizer application rates. This determines the importance of information on the elemental composition of biochar ameliorants used to reduce the mobility of heavy metals in the soil. The use of biochar for remediation of contaminated soils is based on its ability to immobilize heavy metals and organic pollutants. In this work biochars were used, obtained by slow pyrolysis of organic materials of different types: pine sawdust, cattle manure, wheat straw, pine nut shells and brewer's grains. The effect of biochars (biochar application at a dose of 10 t ha⁻¹) on the concentration of 13 elements (C, N, K, P, Mg, Ca, Fe, Mn, Pb, Ni, Cr, Cd, Co) in the soil was analyzed. The data collected after growing of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) on the sod-podzolic soils were analyzed. It has been established that the heavy metals concentrations in the studied soils reclaimed with biochars are significantly lower than the maximum allowable concentrations for soils (MAC). The content of lead (Pb) in soils treated with biochars is 9 or more times lower than the MAC level, and biochar, produced from manure, significantly reduces the concentration of this metal in the soil.

Keywords: biochar; pyrolysis; organic waste; element composition; soil reclamation.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах мира биоуголь, произведенный из характерного для их территории сырья, используется для мелиорации почв. К таким видам сырья относятся кокосовая койра, цветочные остатки религиозных и ритуальных действий (например, цветки календулы) и др. (Singh et al., 2018; Tangmankongworakoon, 2019; Athira et al., 2023), которые не типичны для России. В России распространенным органическим сырьем являются древесные отходы, биоуголь из которых используется как топливный ресурс без практического применения его в качестве почвенного мелиоранта (Waqas et al., 2018; Gorshkov et al., 2021). Если биоуголь использо-

вать с целью мелиорации почв, то это будет коммерческий древесный биоуголь, на упаковке которого не указаны условия пиролиза, например, при какой температуре произведен биоуголь, использованная порода древесины (сосна, береза, ива или др.), форма исходного сырья (опилки, стружка, щепа или др.) (Jones et al., 2011; Kubaczyński et al., 2022). Эти факторы приводят к отличиям в свойствах выбранного биоугля и в его элементном составе. Соответственно, при внесении в почву такого мелиоранта возможен абсолютно непредсказуемый агрономический эффект.

Видится целесообразным определение макро- и микроэлементного состава биоуглей, полученных в условиях традиционного пиролиза при температуре 600 °C (Kambo, Dutta, 2015) из разного, преобладающего в Сибири, органического сырья, а также мелиорированных ими почв. Эта задача является важной при использовании продукта пиролиза органического сырья (углеродистого остатка) в качестве мелиоранта-удобрения почвы, так как многие из химических элементов необходимы растениям в небольших дозах, а их дефицит или избыток в почве негативно влияет на развитие культур (Morgan, Connolly, 2013). Решение этой задачи позволит обеспечить использование соответствующего мелиоранта для конкретных территорий, почвенных условий и культур.

Потенциал биоугля выражается в его уникальных свойствах (низкие показатели кислотности и объемная плотность, высокая водоудерживающая способность) и в наличии неорганических компонентов (макроэлементов – К, Р, Са, Mg, и микроэлементов – Fe, Cu, Mn, Zn) (Vijayaraghavan, 2021; Pandiselvam et al., 2023). Повышение концентрации химических элементов в почве в диапазоне предельно допустимых концентраций (ПДК) приводит к улучшению роста растений и увеличению урожайности культур (Власюк, 1969). Как известно, свойства биоугля значительно изменяются в зависимости от условий термической переработки, например, температуры пиролиза (Крылова et al., 2019; Balmuk et al., 2023). Так, с ростом температуры пиролиза с 300 до 600 °C выход биоугля из птичьего помета снижается, но рН, зольность и площадь его поверхности увеличиваются (Xu et al., 2017). Также в нем увеличивается содержание минеральных компонентов – Р, К,

Ca, Mg – на 34.4%, 32.0%, 30.9% и 30.1% соответственно. Так как с ростом температуры органические компоненты биомассы, включая целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин, в значительной степени преобразуются и высвобождаются в виде летучих веществ и газов, то концентрации менее летучих минеральных соединений, таких как Na, Mg, P, K, Ca, Cl, увеличиваются по сравнению с исходным сырьем (Tchoffor et al., 2013; Bergfeldt et al., 2018). Установлено (Kulczycki et al., 2020), что при смешении биоуглей, произведенных при 300–400 °C, с почвой в полученных субстратах снижаются концентрации Mn и Fe, но при внесении в почву биоуглей, полученных при 500–600 °C, концентрации этих элементов в субстратах увеличились. При этом рекомендуется применять температуру пиролиза ниже 700 °C, чтобы такие элементы, как калий, сохранились в биоугле, а не улетучивались (Clemente et al., 2018).

Особое внимание стоит обратить на то, что тип исходного сырья значительно влияет на содержание макро- и микроэлементов в биоугле и, соответственно, в смеси биоугля с различными типами почв (например, в биоугле из кофейной шелухи концентрации P, K, Ca, Mg и Na намного выше, чем в биоугле из рисовой шелухи) (Matoso et al., 2020). Известно (Carter et al., 2013), что биоуголь из растительных остатков (типа рисовой шелухи) содержит большое количество микроэлементов, например, As, Be, Cd, Cu, Mn, Hg, Zn, Ba, B, концентрации которых превышают содержания этих элементов в почве. Внесение древесного биоугля в почву увеличивает в ней и в выращенных на ней растениях концентрацию минеральных элементов, таких как фосфор, калий, кальций, магний, железо и цинк (Saffeullah et al., 2021). Известно (Gonzalez Sarango et al., 2022), что при внесении древесного биоугля в почву в ней увеличивается концентрация азота, что объясняется частичным снижением его потерь при выщелачивании. Также зарегистрировано увеличение содержания Ca и Zn в почвах при использовании биоугля (Gonzalez Sarango et al., 2022), но низкая доза древесного биоугля в почве (3–6 т/га) являлась причиной слабого повышения плодородия деградированных и сильно выветренных почв.

На сегодняшний день недостаточно исследований, направленных на определение макро- и микроэлементного состава био-

углей, полученных из распространенных в Сибири органических отходов, и элементного статуса мелиорированных ими почв данного региона. Поэтому в данной работе выбрано и переработано методом медленного пиролиза при температуре 600 °С разное сырье: сосновые опилки, навоз крупного рогатого скота (КРС), пшеничная солома, скорлупа кедрового ореха и пивная дробина. Знания о содержании микроэлементов в биоуглях позволят избежать накопления тяжелых металлов в почве, оказывающих негативное влияние на рост и здоровье растений. Высокие содержания тяжелых металлов в биоугле могут привести к накоплению токсинов в почве, миграции загрязняющих веществ по пищевым цепям и в целом к негативному воздействию на окружающую среду. А значит необходимо убедиться, что биоуголь не только полезен, но и безопасен для использования в качестве мелиоранта. Цель работы состоит в оценке влияния биоуглей из разного вида сырья на концентрацию доступных для растений элементов в почве. Сформулирована гипотеза о том, что температура термической обработки биомассы влияет на свойства биоуглей и на доступность элементов в них, но при выборе биоугля для улучшения почвы, т. е. направленного на повышение плодородия почвы за счет добавления элементов питания, таких как К, Р, Са, Mg, следует преимущественно ориентироваться на выбор сырья, а не на температуру термической конверсии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В Сибири ежегодно образуются сотни миллионов тонн органических отходов (Zueva et al., 2021), из которых сосновые опилки, навоз крупного рогатого скота (КРС), пшеничная солома, скорлупа кедрового ореха и пивная дробина являются преобладающими (Степанова, Степанов, 2009; Zueva et al., 2021). Рециркуляция органических отходов возможна при использовании экологически устойчивых и безопасных методов их термической конверсии, например, методом медленного пиролиза (Gupta et al., 2023). В экспериментах пиролиз биообразцов вышеперечисленных типов проводился на установке (рис. 1).

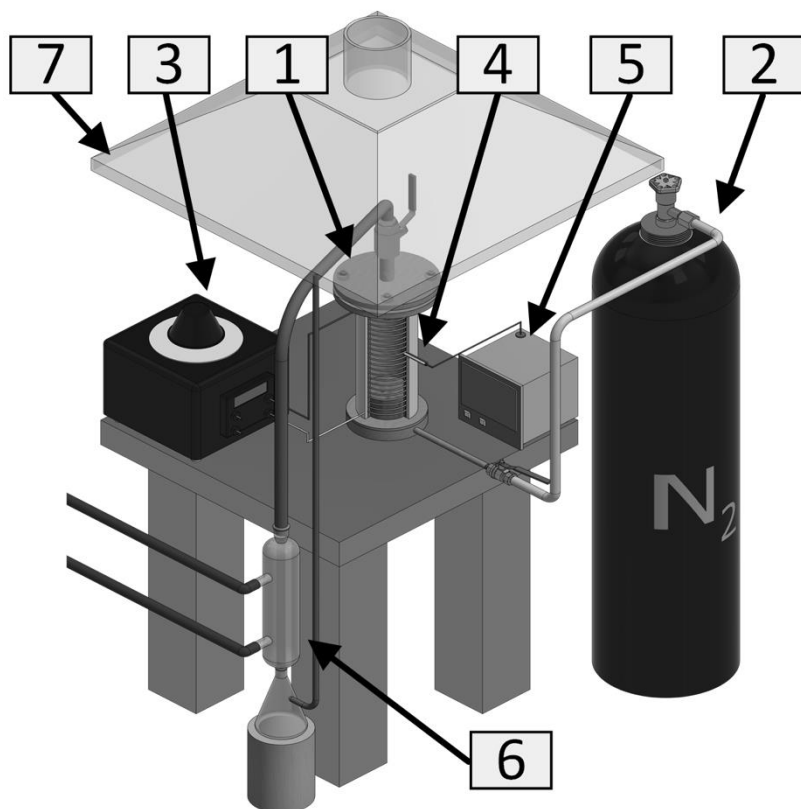


Рис. 1. Установка получения биоугля методом пиролиза: 1 – реактор; 2 – баллон с азотом; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – термопара; 5 – регистратор температуры; 6 – теплообменник; 7 – вытяжная система вентиляции.

Fig. 1. Setup for biochar production by pyrolysis: 1 – reactor; 2 – nitrogen gas cylinder; 3 – laboratory autotransformer; 4 – thermocouple; 5 – temperature recorder; 6 – heat exchanger; 7 – exhaust system of ventilation.

В реактор 1 помещали высушенную до воздушно-сухого состояния биомассу. Далее реактор заполняли азотом 2 и продували в течение 5 минут, после чего азотная линия перекрывалась. С ис-

пользованием лабораторного автотрансформатора 3 реактор нагревался со скоростью 10 °С в минуту до 600 °С. Температура контролировалась термопарой ТЭЦ-57 типа К (Термоэлемент, Россия) 4, подключенной к регистратору температуры ТМ 5104 5. При достижении температуры 600 °С осуществлялась выдержка в течение 30 минут. Визуальное наблюдение за ходом экспериментов показало, что в течение этого времени прекращалось движение пиролизного газа через теплообменник (холодильник) 6 с получением смол, что указывало на окончание процесса термической обработки биомассы. Летучие продукты пиролиза поступали из реактора через теплообменник 6 в вытяжную систему 7. После остывания реактора до комнатной температуры биоуголь извлекался из реактора в герметичную пластиковую тару. Далее процесс повторялся до набора необходимого объема всех биоуглей: *Б1* – биоуголь из сосновых опилок; *Б2* – биоуголь из отходов жизнедеятельности КРС; *Б3* – биоуголь из пшеничной соломы; *Б4* – биоуголь из скорлупы кедрового ореха; *Б5* – биоуголь из пивной дробины.

Изготовленный биоуголь смешивали с почвой гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы (доза внесения 10 т/га), свойства которой приведены в таблице 1 (Пономарев и др., 2022), и вносили в вегетационные сосуды (масса почвы в сосуде 2 кг) в трехкратной повторности по следующей схеме: *ПК* – почва-контроль (почва без биоугля); *П+Б1* – почва с биоуглем из сосновых опилок; *П+Б2* – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности КРС; *П+Б3* – почва с биоуглем из пшеничной соломы; *П+Б4* – почва с биоуглем из скорлупы кедрового ореха; *П+Б5* – почва с биоуглем из пивной дробины.

Исследуемая почва характеризуется как нейтральная по степени кислотности (Кидин и др., 2008), что является нетипичным показателем для таких почв (Rizhiya et al., 2015). Последнее связано, скорее всего, с длительным периодом использования такой почвы в качестве пахотной огородной почвы (Бельченко, 2012). Так как дерново-подзолистые почвы содержат низкую концентрацию элементов питания (Бельченко, 2012; Rizhiya et al., 2015; Аветян и др., 2023), то, в соответствии с рекомендациями (Ngala, 2013; Абашев и др., 2017), во все варианты (*ПК*, *П+Б1*, *П+Б2*,

П+Б3, П+Б4, П+Б5) вносились удобрения (азофоска – 0.13 г и карбамид мочевины – 0.05 г на вегетационный сосуд), обеспечивающие следующие дозы внесения азота, фосфора и калия: N = 0.06 т/га, P = 0.03 т/га, K = 0.03 т/га (N₆₀P₃₀K₃₀). Далее в течение 4 месяцев проводился вегетационный опыт по выращиванию на полученных субстратах мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта “Ирень” по 20 семян на вегетационный сосуд. После завершения вегетационного опыта собирался урожай. Биомасса (надземная и подземная части мягкой яровой пшеницы) удалена на этапе пробоподготовки образцов (ПК, П+Б1, П+Б2, П+Б3, П+Б4, П+Б5) для определения в почве содержаний макро- и микроэлементов.

Таблица 1. Свойства исходной почвы, используемой для эксперимента (Пономарев и др., 2022)

Table 1. Control soil properties and its chemical and physical characteristics (Пономарев и др., 2022)

ρ, г/см ³	W, %	ПВ, %	pH _{KCl}	C, %	N, %
1.4	1.3	30.16	6.52	0.90	0.07

Примечание. ρ – плотность сложения почвы; W – гигроскопическая влажность почвы; ПВ – полная влагоемкость на абсолютно сухую почву; pH_{KCl} – кислотность по солевой вытяжке; C – углерод; N – азот.

Note. ρ – soil density; W – hygroscopic soil moisture; SP – total water holding capacity of absolutely dry soil; pH_{KCl} – acidity determined in the salt extract; C – carbon; N – nitrogen.

Содержание углерода (C) и азота (N) в изготовленных био-углях (Б1, Б2, Б3, Б4, Б5) и субстратах после выращивания пшеницы (ПК, П+Б1, П+Б2, П+Б3, П+Б4, П+Б5) определено прямым методом сухого каталитического сжигания в токе кислорода на автоматическом анализаторе Vario Pyro Cube (Elementar, Германия). Этот метод обеспечивает большую точность перед другими косвенными методами, например, по окисляемости Тюрина и Уолкли-Блэка (Когут и др., 2021; Когут и др., 2023).

Содержание легко извлекаемых форм основных минералов (макроэлементов) – K, P, Ca, Mg, и тяжелых металлов – Fe, Mn, Cr,

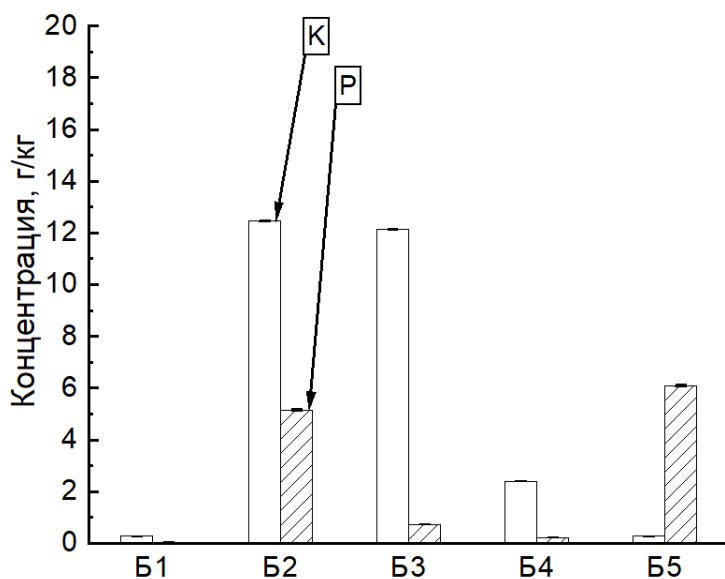
Pb, Ni, Cr, Cd, Co, в биоуглях и субстратах определяли методом ААС с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра PlasmaQuant PQ 9000 (Analytik Jena, Германия) в пламени аргон-воздух. Массовая доля определяемого элемента в пробе и среднее значение двух результатов измерений массовой доли элементов определялись по М-МВИ-80-2008. Для оценки содержания наиболее доступных форм данных элементов разработаны и могут использоваться различные методики (Соколов (ред.), 1975; Обухов, 1991). В данной работе экстракцию доступных для растений форм элементов осуществляли с использованием наиболее распространенного (Savant et al., 1999) химического экстрагента – ацетатно-аммонийного буферного раствора с $\text{pH} = 4.8$, который используется для характеристики запаса наиболее доступных для растений элементов (Плеханова, Золотарева, 2020). Для корректной верификации результатов исследований мы придерживались процедуры руководящего документа РД 52.18.289-90 для всех исследуемых элементов по аналогии с работой (Титаренко и др., 2016). Документ РД 52.18.289-90 регламентирует определение содержания в вытяжке следующих элементов: Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Co, Cr, Mn. Однако практика показывает (Титаренко и др., 2016), что этот метод подходит для определения легко извлекаемых форм и других элементов, таких как Li, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Fe, Rb, Sr, Ba. Помимо традиционно используемых методов определения доступных форм Р (метод Кирсанова или метод Чирикова) (Борисочкина и др., 2022), известны работы, в которых определение концентрации макроэлемента проводилось экстракцией ацетатно-аммонийным буферным раствором (Uusitalo, Jansson, 2002), а также нормативные документы, например, ПНД Ф 16.2:2.3.73-2012, в котором ацетатно-аммонийный буферный раствор используется для определения легко извлекаемого фосфора в почвах. На основании выше сказанного сделан вывод о корректности руководства требованиями РД 52.18.289-90 при определении концентрации исследуемых 11 элементов (Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Mn, Fe, Mg, Ca, K, P).

Статистическая обработка результатов исследований включала вычисление средних значений, указанных на графиках, и абсолютной погрешности. Значимость различий между средними

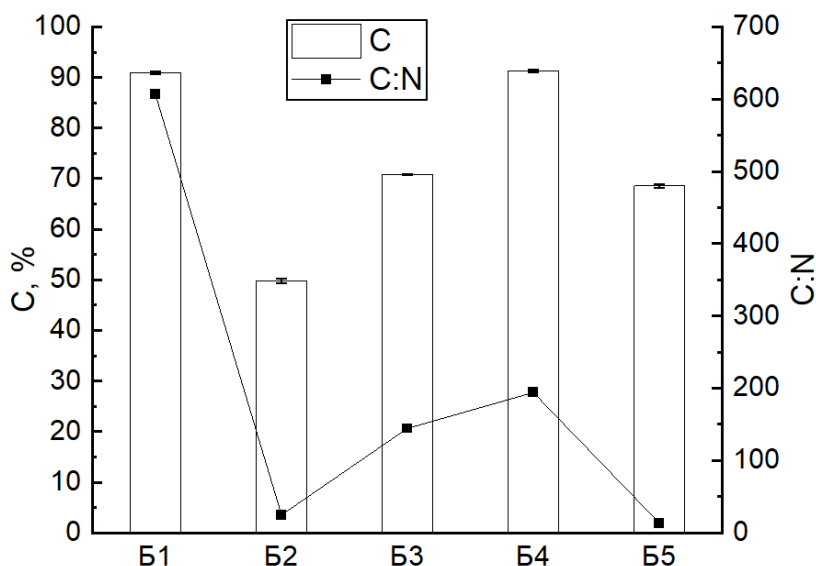
концентрациями элементов анализировалась с использованием однофакторного дисперсионного анализа с использованием критерия Тьюки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание наиболее доступных форм химических элементов определено в биоуглях из различных, характерных для Сибири, органических отходов: сосновые опилки (*Б1*), отходы жизнедеятельности КРС (*Б2*), пшеничная солома (*Б3*), скорлупа кедрового ореха (*Б4*) и пивная дробина (*Б5*). На рисунке 2 приведено содержание одних из самых важных, с точки зрения плодородия почв, элементов – калия (К) и фосфора (Р), а также массовая концентрация углерода (С) и отношение С : N в исследуемых биоуглях.



а)



б)

Рис. 2. Содержание наиболее доступных форм калия и фосфора **а)** концентрация углерода и отношение С : N; **б)** в биоуглях: *B1* – биоуголь из сосновых опилок; *B2* – биоуголь из отходов жизнедеятельности КРС; *B3* – биоуголь из пшеничной соломы; *B4* – биоуголь из скорлупы кедрового ореха; *B5* – биоуголь из пивной дробины.

Fig. 2. The most available forms content of potassium and phosphorus **a)** carbon concentration and C:N ratio; **б)** in biochars: *B1* – biochar from pine sawdust; *B2* – biochar from manure; *B3* – biochar from wheat straw; *B4* – biochar from pine nut shell; *B5* – biochar from brewer's grains (brewing waste).

Большее содержание легко извлекаемых форм калия наблюдалось в биоуглях *B2*, *B3* и *B4*, фосфора – в биоуглях *B2*, *B3* и *B5* (рис. 2). Наименьшие концентрации *K* и *P* зарегистрированы в составе биоугля *B1*. Результаты (рис. 2) показали, что наибольшую эффективность в увеличении концентрации калия в почве потен-

циально проявит биоуголь *B2*, а фосфора – *B5*. Стоит отметить высокое содержание углерода в биоуглях из опилок и скорлупы орехов (>90%), наименьшее содержание зарегистрировано в биоугле из отходов жизнедеятельности КРС (примерно 50%). Данные согласуются с результатами исследований других авторов (Wang et al., 2014; Geng et al., 2022). Также в биоугле *B5* установлено высокое содержание азота (низкое соотношение C : N при высоком количестве углерода C = 68.5%), что, вероятно, приведет к росту концентрации легко усваиваемых растениями минеральных форм азота при внесении *B5* в почву (Бойцова и др. 2021). Данные (рис. 2) показывают, что биоуголь *B5* обладает многообещающим потенциалом в качестве мелиоранта на ряду с *B2* и *B3* благодаря своему богатому минералами составу (например, количество P в *B5* в 1.2 и в 8.3 раз больше, чем в *B2* и *B3* соответственно ($p < 0.05$)).

В биоуглях определены содержания эссенциальных элементов – Mg, Mn, Ca и Fe (рис. 3).

Высокие концентрации элементов зарегистрированы в биоуглях *B2*, *B3* и *B5*. В частности, высокие концентрации щелочных элементов (Ca и Mg) в этих биоуглях позволяют сделать вывод о потенциале использования их для раскисления почв. К тому же в биоугле *B2* концентрация Ca составляла 18 г/кг, Fe – 0.7 г/кг, Mn – 0.3 г/кг, что, например, в 30.4, 12.7 и 30.7 раз больше концентраций соответствующих элементов в биоугле *B4* ($p < 0.05$). Это указывает на высокие агрономические преимущества биоугля *B2* перед остальными вариантами.

Важно понимать, что в биоуглях содержатся и другие тяжелые металлы, концентрации которых в почвах стараются снижать (Usevičiūtė et al., 2022). Поэтому для безопасного внесения мелиорантов в почву необходимо, чтобы концентрации этих элементов не превышали ПДК в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21. На рисунке 4 приведено содержание наиболее доступных форм Pb, Ni, Cr в исследуемых биоуглях.

Зарегистрированные в биоуглях легко извлекаемые формы тяжелых металлов ниже уровней ПДК (рис. 4). При допустимых (согласно уровням ПДК по СанПиН 1.2.3685-21) концентрациях этих элементов в биоуглях наибольшее содержание Pb, Ni и Cr

зарегистрировано в биоугле Б2. Доступные для растений формы свинца (Pb) в исследуемых биоуглях находились в диапазоне от 1.2 до 1.7 мг/кг; никеля (Ni) – 0.5–2.3 мг/кг; хрома (Cr) – 0.1–1.5 мг/кг. Можно сделать предположение о том, что биоугли из различных, преобладающих в Сибири, органических отходов, при их внесении в пахотный слой почвы не приведут к токсичным концентрациям легко извлекаемых форм тяжелых металлов.

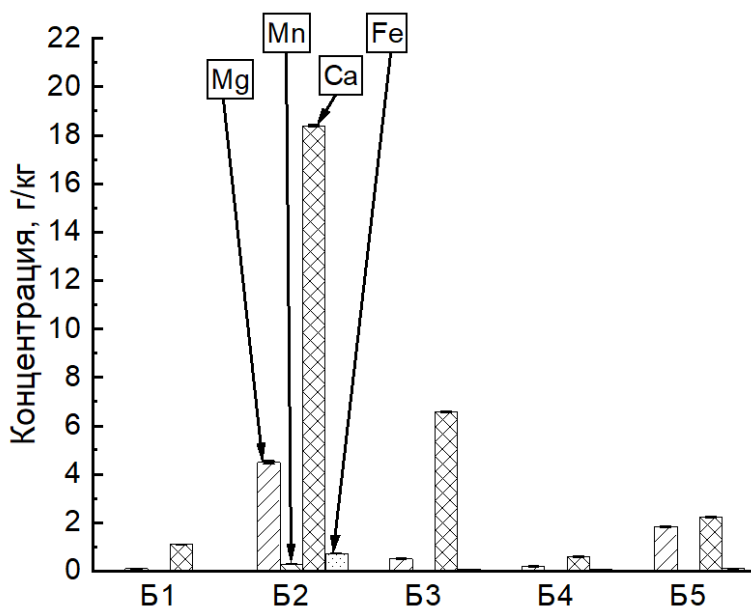


Рис. 3. Содержание наиболее доступных форм элементов в биоуглях: *Б1* – биоуголь из сосновых опилок; *Б2* – биоуголь из отходов жизнедеятельности КРС; *Б3* – биоуголь из пшеничной соломы; *Б4* – биоуголь из скорлупы кедрового ореха; *Б5* – биоуголь из пивной дробины.

Fig. 3. The content of the most available forms of elements in biochars: *B1* – biochar from pine sawdust; *B2* – biochar from manure; *B3* – biochar from wheat straw; *B4* – biochar from pine nut shell; *B5* – biochar from brewer's grains (brewing waste).

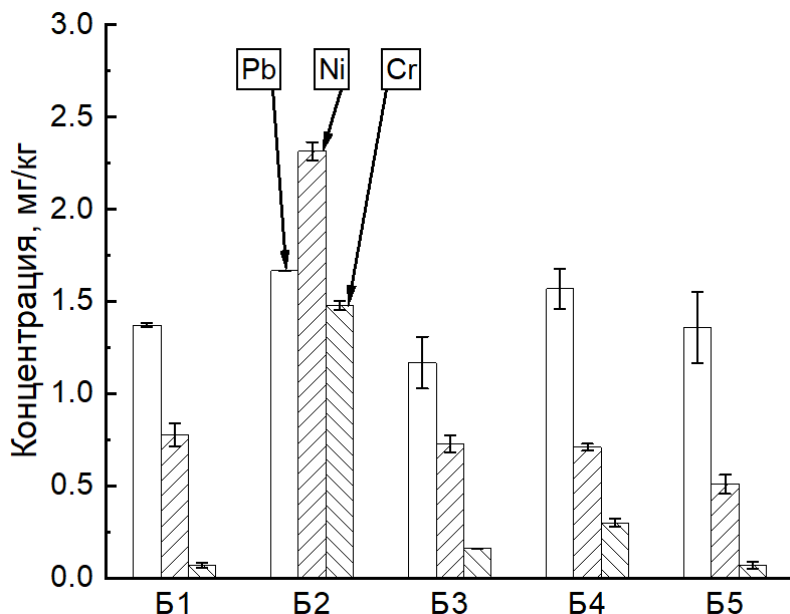
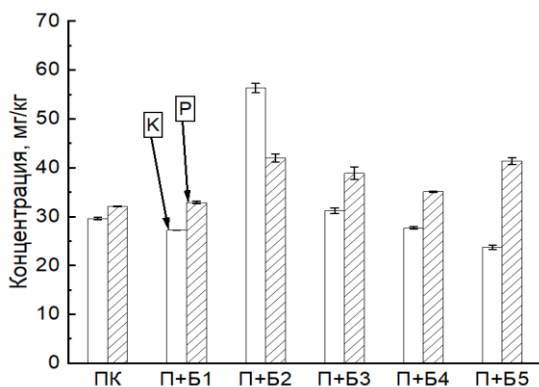


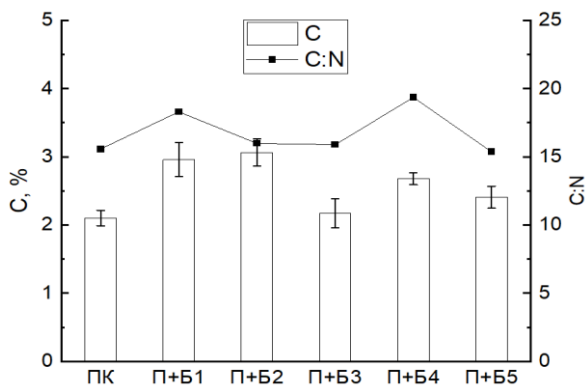
Рис. 4. Содержание наиболее доступных форм тяжелых металлов в биоуглях (концентрации Cd и Co не представлены на графике, их содержания в биоуглях <0.01 мг/кг и <0.02 мг/кг, соответственно): *B1* – биоуголь из сосновых опилок; *B2* – биоуголь из отходов жизнедеятельности КРС; *B3* – биоуголь из пшеничной соломы; *B4* – биоуголь из скорлупы кедрового ореха; *B5* – биоуголь из пивной дробины.

Fig. 4. The content of the most available forms of heavy metals in biochars (Cd and Co concentrations are not shown in the graph; their contents in biochars are <0.01 mg/kg and <0.02 mg/kg, respectively): *B1* – biochar from pine sawdust; *B2* – biochar from manure; *B3* – biochar from wheat straw; *B4* – biochar from pine nut shell; *B5* – biochar from brewer's grains (brewing waste).

Количество и доступность элементов питания в почве – один из определяющих факторов, влияющих на развитие растений (Rizhiya et al., 2015; Аветян и др., 2023). Одними из основных для жизни и роста растений элементов являются азот, фосфор и калий.



а)



б)

Рис. 5. Содержание наиболее доступных форм калия и фосфора **а)** концентрация углерода и отношение $C : N$; **б)** в субстратах: *ПК* – почва-контроль; *П+Б1* – почва с биоуглем из сосновых опилок; *П+Б2* – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности КРС; *П+Б3* – почва с биоуглем из пшеничной соломы; *П+Б4* – почва с биоуглем из скорлупы кедрового ореха; *П+Б5* – почва с биоуглем из пивной дробины.

Fig. 5. The content of the most available forms of potassium and phosphorus **a)** carbon concentration and $C : N$ ratio; **б)** in substrates: *ПК* – control soil; *П+Б1* – soil with biochar from pine sawdust; *П+Б2* – soil with biochar from manure; *П+Б3* – soil with biochar from wheat straw; *П+Б4* – soil with biochar from pine nut shell; *П+Б5* – soil with biochar from brewer's grains (brewing waste).

Эти минералы называют “макроэлементами”, и они необходимы растениям на протяжении всей их жизни (Карабутов, Уваров, 2015). На рисунке 5 представлены наиболее доступные формы калия (К) и фосфора (Р), а также массовая концентрация углерода (С) и отношение С : N в субстратах (почве-контроле и почвах с биоуглем) после сбора урожая и удаления биомассы (надземной и подземной части мягкой яровой пшеницы) в условиях вегетационного опыта.

При сравнении почвы без добавления биоугля (ПК) и субстрата П+Б2 установлено увеличение содержания калия (К) в 1.9 раза и фосфора (Р) в 1.3 раз (рис. 5) ($p < 0.05$). Внесение биоугля из других видов сырья привело к увеличению легко извлекаемых форм фосфора (достоверно за исключением П+Б1), а также к снижению калия в П+Б1, П+Б4 и П+Б5 ($p < 0.05$). На основании полученных результатов (рис. 5) и определенному содержанию калия и фосфора в биоуглях (рис. 2) сделан вывод, что биоугли из навоза и соломы заметнее увеличивают концентрацию этих элементов в почве, что придает им агрономические преимущества перед остальными биоуглями, особенно перед биоуглем из опилок.

Соотношение С : N почвы может изменяться при внесении в почву различного вида органического сырья. Известно (Cleveland, Liptzin, 2007), что в субстрате соотношение С : N $\approx 20 \pm 4$ считается оптимальным для почвенных микроорганизмов. По результатам экспериментов установлено, что при добавлении биоуглей Б2, Б3 и Б5 соотношение С : N субстрата практически не изменилось (изменения не превышали 2.5%). Биоугли Б1 и Б4 повлияли на увеличение С : N по сравнению с контролем: 18.3 и 19.4 против 15.6. Таким образом величина С : N приблизилась к оптимальному для почвенных микроорганизмов значению (20 ± 4) (Cleveland, Liptzin, 2007).

Так как в биоуглях содержится значительное количество элементов питания (рис. 2–3), то помимо Р, К, N и С, они вносят в почву Mg, Mn, Ca и Fe (рис. 6), которые играют важную роль в здоровье и питании растений.

Результаты экспериментов показали (рис. 6), что добавление в почву биоугля из разных видов сырья приводит к росту содер-

жания не всех рассматриваемых эссенциальных элементов в субстратах. Внесение биоуглей *Б2*, *Б3* и *Б5* привело к достоверному ($p<0.05$) увеличению в субстратах Mg и Ca на 29–42% и 8–13% соответственно. Концентрация Mn снизилась, по сравнению с почвой-контролем, при внесении практически всех биоуглей на 22–37%, за исключением внесения *Б5* (в этом случае концентрация Mn увеличилась на 9% до 87 мг/кг) ($p<0.05$). Концентрация Fe практически не изменилась (в пределах 5%) при внесении биоуглей *Б1* и *Б4* и находилась в диапазоне 33–35 мг/кг, но существенно снизилась на 25–40% при внесении биоуглей *Б2*, *Б3* и *Б5* ($p<0.05$).

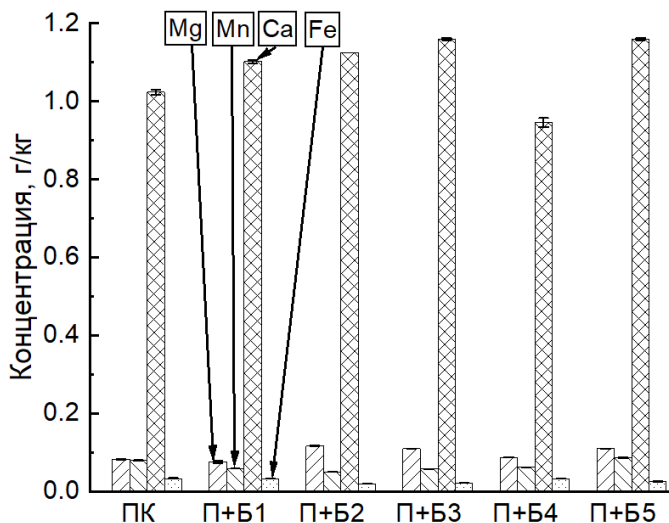


Рис. 6. Содержание наиболее доступных форм элементов в субстратах: *ПК* – почва-контроль; *П+Б1* – почва с биоуглем из сосновых опилок; *П+Б2* – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности КРС; *П+Б3* – почва с биоуглем из пшеничной соломы; *П+Б4* – почва с биоуглем из скорлупы кедрового ореха; *П+Б5* – почва с биоуглем из пивной дробины.
Fig. 6. The content of the most available forms of elements in substrates: *ПК* – control soil; *П+Б1* – soil with biochar from pine sawdust; *П+Б2* – soil with biochar from manure; *П+Б3* – soil with biochar from wheat straw; *П+Б4* – soil with biochar from pine nut shell; *П+Б5* – soil with biochar from brewer's grains (brewing waste).

На рисунке 7 представлено содержание Pb, Ni, Cr в почвах с внесенными биоуглями после проведения вегетационного опыта.

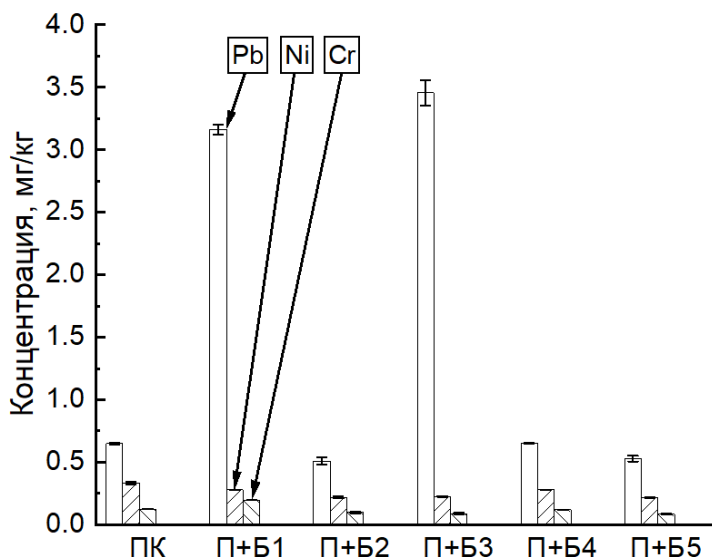


Рис. 7. Содержание наиболее доступных форм тяжелых металлов в субстратах (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже обнаружения: <0.01 мг/кг и <0.02 мг/кг соответственно): *ПК* – почва-контроль; *П+Б1* – почва с биоуглем из сосновых опилок; *П+Б2* – почва с биоуглем из отходов жизнедеятельности КРС; *П+Б3* – почва с биоуглем из пшеничной соломы; *П+Б4* – почва с биоуглем из скорлупы кедрового ореха; *П+Б5* – почва с биоуглем из пивной дробины.

Fig. 7. The content of the most available forms of heavy metals in substrates (Cd and Co concentrations are not indicated, they are below detection: <0.01 mg/kg and <0.02 mg/kg, respectively): *ПК* – control soil; *П+Б1* – soil with biochar from pine sawdust; *П+Б2* – soil with biochar from manure; *П+Б3* – soil with biochar from wheat straw; *П+Б4* – soil with biochar from pine nut shell; *П+Б5* – soil with biochar from brewer's grains (brewing waste).

Показано (рис. 7), что добавление биоугля к почве повлияло на содержание в ней легко извлекаемых форм Pb, Ni, Cr. Концен-

трация никеля (Ni) уменьшилось на 17–35% при добавлении любого из биоуглей ($p < 0.05$). Концентрация хрома (Cr) в почве достоверно ($p < 0.05$) уменьшилась на 17–35% при добавлении *Б2*, *Б3* и *Б5*. В субстрате *П+Б4* количество Cr практически не изменилось (изменения в пределах 5%), а в *П+Б1* концентрация Cr увеличилась на 55% до 0.2 мг/кг. Содержание наиболее доступных форм Ni и Cr не превышало 0.3 мг/кг, т. е. концентрация этих элементов была ниже ПДК для почв. Внесение в почву биоугля из отходов жизнедеятельности КРС (*Б2*) привело к достоверному ($p < 0.05$) снижению на 30% в ней наиболее доступных форм Pb, а внесение биоуглей из опилок (*Б1*) и соломы (*Б3*) в почву увеличило концентрацию Pb в почве примерно в 4.9–5.3 раз ($p < 0.05$). Но важно отметить, что содержание Pb в почвах с этими биоуглями не превышало 3.5 мг/кг, что в 9 раз ниже ПДК по СанПиН 1.2.3685-21.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что для дерново-подзолистых почв Тюменской области с близкой к нейтральной величине pH целесообразно использовать в качестве мелиорантов биоугли из отходов жизнедеятельности КРС и пшеничной соломы, так как для них характерна высокая концентрация основных элементов питания (макроэлементов). Отмечено, что помимо этих двух биоуглей, высокие концентрации щелочных элементов Ca, Mg и K зарегистрированы в биоугле из пивной дробины, а значит эти три биоугля могут быть использованы как эффективные мелиоранты, в том числе с возможностью раскисления почв.

Установлено, что биоугли, полученные из характерных для Сибирского региона органических отходов, например: сосновых опилок, навоза КРС, пшеничной соломы, скорлупы кедрового ореха и пивной дробины, – не нанесут вреда почве при их внесении в пахотный слой в качестве мелиорантов. Показано, что биоугли из сосновых опилок и скорлупы кедровых орехов повлияли на увеличение C : N по сравнению с контролем: 18.3 и 19.4 против 15.6, приблизив величину C : N к оптимальному для почвенных микроорганизмов значению (20 ± 4). Также установлено, что во всех рассмотренных биоуглях практически отсутствуют кадмий

(Cd <0.01 мг/кг) и кобальт (Co <0.02 мг/кг), а концентрации других тяжелых металлов невысоки и не превышают ПДК. В мелиорированных биоуглями почвах концентрации наиболее доступных форм тяжелых металлов (Pb, Ni, Cr, Cd, Co) значительно ниже предельно допустимых концентраций по СанПиН 1.2.3685-21. Представленные в работе перспективные для Сибири биоугли, их макро- и микроэлементный состав, а также элементный статус мелиорированных ими почв являются ценными данными, необходимыми для проведения мероприятий по мелиорации и рекультивации земель (особенно учитывая состояние почв территорий Тюменской области (Гилёва и др., 2022)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев В.Д., Попов Ф.А., Носкова Е.Н., Жук С.Н. Влияние минеральных удобрений на урожайность зерна яровой пшеницы // Пермский аграрный вестник. 2017. № 1 (17). С. 7–11.
2. Аветян С.А., Савицкая Н.В., Савин И.Ю., Шишонакова Е.А. Картографическая интерпретация химического и радиационного загрязнения почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. № 114. С. 99–102. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-29-65](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-29-65).
3. Бельченко С.А. Влияние систем удобрения на химические свойства дерново-подзолистой песчаной почвы // Вестник аграрной науки. 2012. Т. 34. № 1. С. 22–23.
4. Бойцова Л.В., Рижия Е.Я., Москвин М.А. Содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при внесении в нее биоугля // Агрохимия. 2021. № 11. С. 25–32. DOI: [10.31857/s0002188121080056](https://doi.org/10.31857/s0002188121080056).
5. Борисочкина Т.И., Котельникова А.Д., Рогова О.Б. Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 110. С. 114–147. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-114-147](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-114-147).
6. Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Киев: Наукова думка, 1969. 516 с.
7. Гилёва Л.Н., Подрядчикова Е.Д., Гоняева В.Р. Исследование и оценка экологического состояния земель города Тюмени // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 3. С. 407–422. DOI: [10.55186/2413046X_2022_7_3_158](https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_3_158).

8. *Карабутов А.П., Уваров Г.И.* Влияние элементов агротехнологии на калийный режим почвы в длительных опытах // Региональные геосистемы. 2015. Т. 30. № 3 (200). С. 125–132.
9. *Кидин В.В., Дерюгин И.П., Кобзаренко В.И.* Практикум по агрохимии. М.: КолосС, 2008. 599 с.
10. *Козут Б.М., Милановский Е.Ю., Хаматнуров Ш.А.* О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. № 114. С. 5–28. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-5-28](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28).
11. *Козут Б.М., Семенов В.М., Артёмьева З.С., Данченко Н.Н.* Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. DOI: [10.31857/s0002188121050070](https://doi.org/10.31857/s0002188121050070).
12. *Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А.В.* Получение биоугля пиролизом биомассы // Химия твердого топлива. 2019. № 6. С. 55–64. DOI: [10.1134/s0023117719060100](https://doi.org/10.1134/s0023117719060100).
13. *Обухов А.И., Плеханова И.О.* Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1991. 183 с.
14. *Плеханова И.О., Золотарева О.А.* Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10. С. 79–88. DOI: [10.31857/S0002188120100099](https://doi.org/10.31857/S0002188120100099).
15. *Пономарев К.О., Первушина А.Н., Коротаева К.С., Юртаев А.А., Петухов А.С., Табакаев Р.Б., Шаненков И.И.* Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. № 113. С. 110–137. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-113-110-137](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-110-137).
16. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Взамен ГН 2.1.7.2041-06; введ. 2021-03-01. М.: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации, 2021. 469 с.
17. *Соколов А.В.* (ред.) Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 655 с.
18. *Степанова И.А., Степанов А.С.* Утилизация отходов агропромышленного комплекса: учебное пособие. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. 164 с.
19. *Титаренко В.О., Каунова А.А., Темердашев З.А., Попандопуло В.Г.* Исследование взаимосвязи между элементарным составом винограда и почвой региона его произрастания // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 2. С. 138–146. DOI: [10.15826/analitika.2016.20.2.004](https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.2.004).

20. Pandiselvam R., Shaji A., Ramesh S.V., Sathyan N., Manikantan M.R., Mathew A.C. Development, evaluation, and optimization of portable pyrolysis system for the production of biochar from tender coconut husk // Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. P. 1–10. DOI: [10.1007/s13399-023-03923-5](https://doi.org/10.1007/s13399-023-03923-5).
21. Balmuk G., Videgain M., Manyà J.J., Duman G., Yanik J. Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2023. Vol. 169. P. 105858. DOI: [10.1016/j.jaap.2023.105858](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105858).
22. Bergfeldt B., Morgano M.T., Leibold H., Richter F., Stapf D. Recovery of phosphorus and other nutrients during pyrolysis of chicken manure // Agriculture (Switzerland). 2018. Vol. 8. No. 12. P. 1–10. DOI: [10.3390/agriculture8120187](https://doi.org/10.3390/agriculture8120187).
23. Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T.B., Haefele S. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*brassica chinensis*) // Agronomy. 2013. Vol. 3. No. 2. P. 404–418. DOI: [10.3390/agronomy3020404](https://doi.org/10.3390/agronomy3020404).
24. Clemente J.S., Beauchemin S., Thibault Y., Mackinnon T., Smith D. Differentiating inorganics in biochars produced at commercial scale using principal component analysis // ACS Omega. 2018. Vol. 3. No. 6. P. 6931–6944. DOI: [10.1021/acsomega.8b00523](https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00523).
25. Cleveland C.C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? // Biogeochemistry 2007. Vol. 85. No. 3. P. 235–252. DOI: [10.1007/s10533-007-9132-0](https://doi.org/10.1007/s10533-007-9132-0).
26. Geng N., Kang X., Yan X., Yin N., Wang H., Pan H., Yang Q., Lou Y., Zhuge Y. Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 232. P. 113241. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113241](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113241).
27. Gonzalez Sarango E.M., Leimer S., Valarezo Manosalvas C., Wilcke W. Does biochar improve nutrient availability in Ultisols of tree plantations in the Ecuadorian Amazonia? // Soil Science Society of America Journal. 2022. Vol. 86. No. 4. P. 1072–1085. DOI: [10.1002/saj2.20421](https://doi.org/10.1002/saj2.20421).
28. Gorshkov A., Berezikov N., Kaltaev A., Yankovsky S., Slyusarsky K., Tabakaev R., Larionov K. Analysis of the physicochemical characteristics of biochar obtained by slow pyrolysis of nut shells in a nitrogen atmosphere // Energies. 2021. Vol. 14. No. 23. P. 8075. DOI: [10.3390/en14238075](https://doi.org/10.3390/en14238075).
29. Gupta A., Ghosh P., Arora K., Sharma S., Kumar S. Valorization potential of pine needle waste biomass: recent trends and future perspectives // Environmental Science and Pollution Research. 2023. P. 1–16. DOI: [10.1007/s11356-023-27440-0](https://doi.org/10.1007/s11356-023-27440-0).

30. Jones D.L., Edwards-Jones G., Murphy D.V. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 804–813. DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.12.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.015).
31. Kambo H.S., Dutta A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 359–378. DOI: [10.1016/j.rser.2015.01.050](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050).
32. Kubaczyński A., Walkiewicz A., Pytlak A., Grządziel J., Gałzka A., Brzezińska M. Biochar dose determines methane uptake and methanotroph abundance in Haplic Luvisol // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 806. P. 151259. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.151259](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151259).
33. Kulczycki G., Magnucka E.G., Oksińska M.P., Kucińska J., Kobylecki R., Pawęska K., Zarzycki R., Kacprzak A., Pietr S.J. The effect of various types of biochar mixed with mineral fertilization on the development and ionome of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings and soil properties in a pot experiment // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1–16. DOI: [10.3390/agronomy10121903](https://doi.org/10.3390/agronomy10121903).
34. Matoso S.C.G., Wadt P.G.S., de Souza Júnior V.S., Pérez X.L.O., Plotegher F. Variation in the properties of biochars produced by mixing agricultural residues and mineral soils for agricultural application // *Waste Management and Research*. 2020. Vol. 38. No. 9. P. 978–986. DOI: [10.1177/0734242X20935180](https://doi.org/10.1177/0734242X20935180).
35. Morgan J.B., Connolly E.L. Plant-soil interactions: nutrient uptake // *Nature Education Knowledge*. 2013. Vol. 4. No. 8. P. 2.
36. Ngala L. Partial balance of N, P and K in a sole millet crop on a sandy loam soil of Northeast Nigeria // *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 17–22. DOI: [10.5897/jssem12.018](https://doi.org/10.5897/jssem12.018).
37. Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov E.V. Effect of biochar on the properties of loamy sand Spodosol soil samples with different fertility levels: A laboratory experiment // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 2. P. 192–200. DOI: [10.1134/S1064229314120084](https://doi.org/10.1134/S1064229314120084).
38. Saffeullah P., Nabi N., Zaman M.B., Liaqat S., Siddiqi T.O., Umar S. Efficacy of characterized prosopis wood biochar amendments in improving growth, nitrogen use efficiency, nitrate accumulation, and mineral content in cabbage genotypes // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2021. Vol. 21. P. 690–708. DOI: [10.1007/s42729-020-00393-w](https://doi.org/10.1007/s42729-020-00393-w).
39. Savant N.K., Korndörfer G.H., Datnoff L.E., Snyder G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review // *Journal of Plant Nutrition*. 1999. Vol. 22. No. 12. P. 1853–1903. DOI: [10.1080/01904169909365761](https://doi.org/10.1080/01904169909365761).
40. Singh P., Singh R., Borthakur A., Madhav S., Singh V.K., Tiwary D., Srivastava V.C., Mishra P.K. Exploring temple floral refuse for biochar

- production as a closed loop perspective for environmental management // Waste Management. 2018. Vol. 77. P. 78–86. DOI: [10.1016/j.wasman.2018.04.041](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.041).
41. *Tangmankongworakoon N.* An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose // International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 37–44. DOI: [10.1007/s40093-019-0267-5](https://doi.org/10.1007/s40093-019-0267-5).
42. *Tchoffor P.A., Davidsson K.O., Thunman H.* Transformation and release of potassium, chlorine, and sulfur from wheat straw under conditions relevant to dual fluidized bed gasification // Energy & fuels. 2013. Vol. 27. No. 12. P. 7510–7520. DOI: [10.1021/ef401703a](https://doi.org/10.1021/ef401703a).
43. *Uševičiūtė L., Baltrėnaitė-gedienė E., Feizienė D.* The combined effect of biochar and mineral fertilizer on triticale yield, soil properties under different tillage systems // Plants. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 111. DOI: [10.3390/plants11010111](https://doi.org/10.3390/plants11010111).
44. *Uusitalo R., Jansson H.* Dissolved reactive phosphorus in runoff assessed by soil extraction with an acetate buffer // Agricultural and Food Science in Finland. 2002. Vol. 11. No. 4. P. 343–353.
45. *Vijayaraghavan K.* The importance of mineral ingredients in biochar production, properties and applications // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2021. Vol. 51. No. 2. P. 113–139. DOI: [10.1080/10643389.2020.1716654](https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1716654).
46. *Wang Y., Yin R., Liu R.* Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2014. Vol. 110. No. 1. P. 375–381. DOI: [10.1016/j.jaap.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.006).
47. *Waqas M., Aburizaiza A.S., Miandad R., Rehan M., Barakat M.A., Nizami A.S.* Development of biochar as fuel and catalyst in energy recovery technologies // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 188. P. 477–488. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.04.017](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.017).
48. *Xu X., Zhao Y., Sima J., Zhao L., Mašek O., Cao X.* Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review // Bioresource Technology. 2017. Vol. 241. P. 887–899. DOI: [10.1016/j.biortech.2017.06.023](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.023).
49. *Zueva S., Kovalev A.A., Litti Y.V., Ippolito N.M., Innocenzi V., De Michelis I.* Environmental and economic aspects of biomethane production from organic waste in Russia // Energies. 2021. Vol. 14. No. 17. P. 1–8. DOI: [10.3390/en14175244](https://doi.org/10.3390/en14175244).

REFERENCES

1. Abashev V.D., Popov F.A., Noskova E.N., Zhuk S.N., Vliyanie mineral'nykh udobrenii na urozhainost' zerna yarovoi pshenitsy (Influence of mineral fertilizers on spring wheat grain yield capacity), *Permskii agrarnyi vestnik*, 2017, No 1 (17), pp. 7–11.
2. Avetyan S.A., Savitskaya N.V., Savin I.Yu., Shishkonakova E.A., Cartographic interpretation of chemical and radiation contamination of Russian soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 114, pp. 29–65. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-29-65](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-29-65).
3. Belchenko S.A., The influence of fertilizer systems on the chemical properties of sod-podzolic sandy soil (Vliyanie sistem udobreniya na khimicheskie svoystva dernovo-podzolistoi peschanoi pochvy), *Vestnik agrarnoi nauki*, 2012, Vol. 34, No. 1, pp. 22–23.
4. Boitsova L.V., Rizhiyaa E.Ya., Moskvina M.A., Soderzhanie mineral'nykh form azota v dernovo-podzolistoi supeschanoi pochve raznoi stepeni okul'turennosti pri vnesenii v nee biouglya (Mineral nitrogen content in sod-podzolic sandy soils of different fertility after application of biochar), *Agrokhiimiya*, 2021, No. 11, pp. 25–32, DOI: [10.31857/s0002188121080056](https://doi.org/10.31857/s0002188121080056).
5. Borisochkina T.I., Kotelnikova A.D., Rogova O.B., The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenosis, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 114–147, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-114-147](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-114-147).
6. Vlasjuk P.A., *Biologicheskie elementy v zhiznedeyatel'nosti rastenii* (Biological elements in the life of plants), Kiev: Nauk. dumka, 1969, 516 p.
7. Gileva L.N., Podryadchikova E.D., Gonyaeva V.R., Issledovanie i otsenka ekologicheskogo sostoyaniya zemel' goroda Tyumeni (Research and assessment of the ecological condition of the lands of the city of Tyumen), *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2022, Vol. 7, No 3, pp. 407–422, DOI: [10.55186/2413046X_2022_7_3_158](https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_3_158).
8. Karabutov A.P., Uvarov G.I., Vliyanie elementov agrotekhnologii na kaliinyi rezhim pochvy v dlitel'nykh opytakh (The influence of elements of agricultural technology on potash regime of the soil in long-term experiments), *Regional'nye geosistemy*, 2015, Vol. 30, No. 3 (200), pp. 125–132.
9. Kidin V.V., Deryugin I.P., Kobzarenko V.I., *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agrochemistry), Moscow: Agropromizdat, 2008. 599 p.
10. Kogut B.M., Milanovsky E.Yu., Hamaturov Sh.A., Methods for determining the organic carbon content in soils (critical review), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 114, pp. 5–28, DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-5-28](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28).

11. Kogut B.M., Semenov V.M., Artemyeva Z.S., Danchenko N.N., Degumusirovanie i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda (Humus depletion and soil carbon sequestration), *Agrokhimiya*, 2021, No. 5, pp. 3–13, DOI: [10.31857/s0002188121050070](https://doi.org/10.31857/s0002188121050070).
12. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovsky A.V., Poluchenie biouglya pirolizom biomassy (Obtaining biochar by pyrolysis of biomass), *Khimiya tverdogo topliva*, 2019, No. 6, pp. 55–64, DOI: [10.1134/s0023117719060100](https://doi.org/10.1134/s0023117719060100).
13. Obukhov A.I., Plekhanova I.O., *Atomno-absorbtsionnyi analiz v pochvenno-biologicheskikh issledovaniyakh* (Atomic Absorption Analysis in Biological Studies of Soils), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1991, 183 p.
14. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A., *Ekologicheskoe normirovanie sostoyaniya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami* (Ecological regulation of the condition of soils contaminated with heavy metals), *Agrokhimiya*, 2020, No. 10, pp. 79–88, DOI: [10.31857/S0002188120100099](https://doi.org/10.31857/S0002188120100099).
15. Ponomarev K.O., Pervushina A.N., Korotaeva K.S., Yurtaev A.A., Petuhov A.S., Tabakaev R.B., Shanenkov I.I., Biochar influence on the development of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and acidity of soddy-podzolic soil in Western Siberia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 113, pp. 110–137, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-113-110-137](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-110-137).
16. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans from environmental factors, Instead of GN 2.1.7.2041-06; introduced 2021-03-01, Moscow: Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation, 2021, 469 p.
17. Sokolov A.V. (Ed.), *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical methods of soil research). Moscow: Nauka, 1975, 655 p.
18. Stepanova I.A., Stepanov A.S., *Utilizatsiya otkhodov agropromyshlennogo kompleksa: uchebnoe posobie* (Utilization of waste products of the agro-industrial complex: a study guide), Orenburg: IPK GOU OGU, 2009, 164 p.
19. Titarenko V.O., Kaunova A.A., Temerdashev Z.A., Popandopulo V.G., *Issledovanie vzaimosvyazi mezhdu elementnym sostavom vinograda i pochvoi regiona ego proizrastaniya* (Study of the relationship between the elemental composition of grapes and the soil of the region where they grow), *Analitika i kontrol'*, 2016, Vol. 20, No. 2, pp. 138–146, DOI: [10.15826/analitika.2016.20.2.004](https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.2.004).
20. Pandiselvam R., Shaji A., Ramesh S.V., Sathyan N., Manikantan M.R., Mathew A.C., Development, evaluation, and optimization of portable pyrolysis system for the production of biochar from tender coconut husk, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, pp. 1–10, DOI: [10.1007/s13399-023-03923-5](https://doi.org/10.1007/s13399-023-03923-5).
21. Balmuk G., Videgain M., Manyà J.J., Duman G., Yanik J., Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar,

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, Vol. 169, p. 105858, DOI: [10.1016/j.jaap.2023.105858](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105858).

22. Bergfeldt B., Morgano M.T., Leibold H., Richter F., Stapf D., Recovery of phosphorus and other nutrients during pyrolysis of chicken manure, *Agriculture (Switzerland)*, 2018, Vol. 8, No. 12, pp. 1–10. DOI: [10.3390/agriculture8120187](https://doi.org/10.3390/agriculture8120187).

23. Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T.B., Haefele S., The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*brassica chinensis*), *Agronomy*, 2013, Vol. 3, No. 2, pp. 404–418, DOI: [10.3390/agronomy3020404](https://doi.org/10.3390/agronomy3020404).

24. Clemente J.S., Beauchemin S., Thibault Y., Mackinnon T., Smith D., Differentiating inorganics in biochars produced at commercial scale using principal component analysis, *ACS Omega*, 2018, Vol. 3, No. 6, pp. 6931–6944, DOI: [10.1021/acsomega.8b00523](https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00523).

25. Cleveland C.C., Liptzin D., C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, Vol. 85, No. 3, pp. 235–252, DOI: [10.1007/s10533-007-9132-0](https://doi.org/10.1007/s10533-007-9132-0).

26. Geng N., Kang X., Yan X., Yin N., Wang H., Pan H., Yang Q., Lou Y., Zhuge Y., Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, Vol. 232, p. 113241, DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113241](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113241).

27. Gonzalez Sarango E.M., Leimer S., Valarezo Manosalvas C., Wilcke W., Does biochar improve nutrient availability in Ultisols of tree plantations in the Ecuadorian Amazonia? *Soil Science Society of America Journal*, 2022, Vol. 86, No. 4, pp. 1072–1085, DOI: [10.1002/saj2.20421](https://doi.org/10.1002/saj2.20421).

28. Gorshkov A., Berezikov N., Kaltaev A., Yankovsky S., Slyusarsky K., Tabakaev R., Larionov K., Analysis of the physicochemical characteristics of biochar obtained by slow pyrolysis of nut shells in a nitrogen atmosphere, *Energies*, 2021, Vol. 14, No. 23, p. 8075, DOI: [10.3390/en14238075](https://doi.org/10.3390/en14238075).

29. Gupta A., Ghosh P., Arora K., Sharma S., Kumar S., Valorization potential of pine needle waste biomass: recent trends and future perspectives, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, pp. 1–16, DOI: [10.1007/s11356-023-27440-0](https://doi.org/10.1007/s11356-023-27440-0).

30. Jones D.L., Edwards-Jones G., Murphy D.V., Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, Vol. 43, No. 4, pp. 804–813, DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.12.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.015).

31. Kambo H.S., Dutta A., A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 45, pp. 359–378, DOI: [10.1016/j.rser.2015.01.050](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050).

32. Kubaczyński A., Walkiewicz A., Pytlak A., Grządziel J., Gałązka A., Brzezińska M., Biochar dose determines methane uptake and methanotroph abundance in Haplic Luvisol, *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 806, p. 151259, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.151259](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151259).
33. Kulczycki G., Magnucka E.G., Oksińska M.P., Kucińska J., Kobyłecki R., Pawęska K., Zarzycki R., Kacprzak A., Pietr S.J., The effect of various types of biochar mixed with mineral fertilization on the development and ionome of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings and soil properties in a pot experiment, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, No. 12, pp. 1–16. DOI: [10.3390/agronomy10121903](https://doi.org/10.3390/agronomy10121903).
34. Matoso S.C.G., Wadt P.G.S., de Souza Júnior V.S., Pérez X.L.O., Plotegher F., Variation in the properties of biochars produced by mixing agricultural residues and mineral soils for agricultural application, *Waste Management and Research*, 2020, Vol. 38, No. 9, pp. 978–986, DOI: [10.1177/0734242X20935180](https://doi.org/10.1177/0734242X20935180).
35. Morgan J.B., Connolly E.L., Plant-soil interactions: nutrient uptake, *Nature Education Knowledge*, 2013, Vol. 4, No. 8, p. 2.
36. Ngala L., Partial balance of N, P and K in a sole millet crop on a sandy loam soil of Northeast Nigeria, *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2013, Vol. 4, No. 2, pp. 17–22, DOI: [10.5897/jsem12.018](https://doi.org/10.5897/jsem12.018).
37. Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov E.V., Effect of biochar on the properties of loamy sand Spodosol soil samples with different fertility levels: A laboratory experiment, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 2, pp. 192–200, DOI: [10.1134/S1064229314120084](https://doi.org/10.1134/S1064229314120084).
38. Saffellullah P., Nabi N., Zaman M.B., Liaqat S., Siddiqi T.O., Umar S., Efficacy of characterized prosopis wood biochar amendments in improving growth, nitrogen use efficiency, nitrate accumulation, and mineral content in cabbage genotypes, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, Vol. 21, pp. 690–708, DOI: [10.1007/s42729-020-00393-w](https://doi.org/10.1007/s42729-020-00393-w).
39. Savant N.K., Korndörfer G.H., Datnoff L.E., Snyder G.H., Silicon nutrition and sugarcane production: a review, *Journal of Plant Nutrition*, 1999, Vol. 22, No. 12, pp. 1853–1903, DOI: [10.1080/01904169909365761](https://doi.org/10.1080/01904169909365761).
40. Singh P., Singh R., Borthakur A., Madhav S., Singh V.K., Tiwary D., Srivastava V.C., Mishra P.K., Exploring temple floral refuse for biochar production as a closed loop perspective for environmental management, *Waste Management*, 2018, Vol. 77, pp. 78–86, DOI: [10.1016/j.wasman.2018.04.041](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.041).
41. Tangmankongworakoon N., An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 37–44, DOI: [10.1007/s40093-019-0267-5](https://doi.org/10.1007/s40093-019-0267-5).

42. Tchoffor P.A., Davidsson K.O., Thunman H., Transformation and release of potassium, chlorine, and sulfur from wheat straw under conditions relevant to dual fluidized bed gasification, *Energy & fuels*, 2013, Vol. 27, No. 12, pp. 7510–7520, DOI: [10.1021/ef401703a](https://doi.org/10.1021/ef401703a).
43. Usevičiūtė L., Baltėnaitė- gediėnė E., Feizienė D., The combined effect of biochar and mineral fertilizer on triticales yield, soil properties under different tillage systems, *Plants*, 2022, Vol. 11, No. 1, p. 111, DOI: [10.3390/plants11010111](https://doi.org/10.3390/plants11010111).
44. Uusitalo R., Jansson H., Dissolved reactive phosphorus in runoff assessed by soil extraction with an acetate buffer, *Agricultural and Food Science in Finland*, 2002, Vol. 11, No. 4, pp. 343–353.
45. Vijayaraghavan K., The importance of mineral ingredients in biochar production, properties and applications, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, Vol. 51, No. 2, pp. 113–139, DOI: [10.1080/10643389.2020.1716654](https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1716654).
46. Wang Y., Yin R., Liu R., Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, Vol. 110, No. 1, pp. 375–381, DOI: [10.1016/j.jaap.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.006).
47. Waqas M., Aburizaiza A.S., Miandad R., Rehan M., Barakat M.A., Nizami A.S., Development of biochar as fuel and catalyst in energy recovery technologies, *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 188, pp. 477–488, DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.04.017](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.017).
48. Xu X., Zhao Y., Sima J., Zhao L., Mašek O., Cao X., Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review, *Bioresource Technology*, 2017, Vol. 241, pp. 887–899, DOI: [10.1016/j.biortech.2017.06.023](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.023).
49. Zueva S., Kovalev A.A., Littl Y.V., Ippolito N.M., Innocenzi V., De Michelis I., Environmental and economic aspects of biomethane production from organic waste in Russia, *Energies*, 2021, Vol. 14, No. 17, pp. 1–8, DOI: [10.3390/en14175244](https://doi.org/10.3390/en14175244).

УДК 631.454; 54.11; 66.02

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-295-324



Ссылки для цитирования:

Сметанников Ан.Ф., Корляков К.Н., Оносов Д.В., Цема Л.Г., Оносова Е.Ф., Шишков Д.Г., Васбиева М.Т., Сметанников Ал.Ф. Способ получения и возможности применения новых комплексных удобрений из флотационных шламов – отходов переработки калийно-магниевых руд // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 295-324. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-295-324

Cite this article as:

Smetannikov A.F., Korlyakov K.N., Onosov D.V., Tsema L.G., Onosova E.F., Shishkov D.G., Vasbieva M.T., Smetannikov Al.F., Method of obtaining and possibility of using of new complex fertilizers from flotation sludge – potassium-magnesium ore processing wastes, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 295-324, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-295-324

Способ получения и возможности применения новых комплексных удобрений из флотационных шламов – отходов переработки калийно-магниевых руд

© 2024 г. Ан. Ф. Сметанников^{1*}, К. Н. Корляков^{2**},
Д. В. Оносов^{1***}, Л. Г. Цема^{2****}, Е. Ф. Оносова^{2*****},
Д. Г. Шишков^{2*****}, М. Т. Васбиева^{2*****},
Ал. Ф. Сметанников¹

¹Горный институт – филиал Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук (ГИ ПФИЦ УрО РАН), Россия,
614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78 А,

* <https://orcid.org/0000-0002-9444-7748>, e-mail: smetannikov@bk.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0001-7136-7158>, e-mail: onosov@inbox.ru.

²Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук
(ПНИИСХ ПФИЦ УрО РАН), Россия,

614532, Пермь, Пермский р-н, с. Лобаново, ул. Культуры, 12,

** <https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>, e-mail: korlyakovkn@rambler.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0001-6288-3185>, e-mail: lubacema@mail.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-0656-6964>,
e-mail: smetannikova49@bk.ru
***** <https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>, e-mail: pniish@rambler.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru.

*Поступила в редакцию 13.11.2023, после доработки 21.11.2023,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Приведены результаты исследования свойств огарков, полученных после высокотемпературного обжига глинисто-солевых отходов (шламов) производства калийных удобрений из К-Мг руд. Огарки используются как комплексные удобрения, мелиорирующие компоненты и микроудобрения. Вторичные отходы, после извлечения из обожженных шламов (огарков) Pd, Pt, Ag, состоят из шламов после дешламации измельченного огарка и хвостов после обогащения песков. Смешивание этих продуктов, увлажнение, грануляция и спекание формируют спек, готовый к использованию в качестве комплексного удобрения, мелиорирующей добавки, а также микроудобрения. Проведены исследования химического состава и состава примесей огарков и спеков. Установлена идентичность состава огарков и спеков. Проведены испытания огарков и спеков как комплекса удобрений, мелиорантов и микроудобрений. Исследования осуществлены на опытном поле Пермского НИИСХ, на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, сформированной на делювии пермских глин, представляющей до 70% пахотных земель Пермского края, исследуемая культура – картофель. Урожайность картофеля при внесении огарка в качестве мелиорирующей добавки была выше на 6.05 т/га по сравнению с контролем (применение традиционных удобрений обеспечивало прибавку 3.56 т/га). Впервые выполнены исследования состава микроэлементов в клубнях картофеля с неудобренных участков, а также участков с внесением традиционных удобрений, и участков, удобренных огарками. Анализировались два компонента клубней – кожура и мякоть – масс-спектральным способом с разложением в закрытой системе (автоклав). Для большей части элементов характерно более высокое содержание в кожуре (практически на порядок) в сравнении с мякотью. Обратная зависимость отслеживается для Р и S, содержание которых больше в мякоти, чем в кожуре. В варианте с применением огарка наблюдалось большее содержание микроэлементов, особенно редкоземельных, по сравнению с контролем. Способ переработки шламов с целью извлечения Pd, Pt, Ag формирует вторичные отходы, которые возможно использовать как комплексные удобрения

продолженного действия, мелиорирующие добавки и микроудобрения.

Ключевые слова: глинисто-солевые отходы; огарки; спеки; высокотемпературный обжиг; комплексные удобрения; мелиоранты; микроэлементы; картофель.

Method of obtaining and possibility of using of new complex fertilizers from flotation sludge – potassium-magnesium ore processing wastes

© 2024 An. F. Smetannikov^{1*}, K. N. Korlyakov^{2**},
D. V. Onosov^{1***}, L. G. Tsema^{2****}, E. F. Onosova^{2*****},
D. G. Shishkov^{2*****}, M. T. Vasbieva^{2*****},
Al. F. Smetannikov^{1*****}

¹Mining Institute – division of Perm Federal Research Center
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
78 A Sibirskaia Str., Perm 614007, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-9444-7748>, e-mail: smetannikov@bk.ru,
***<https://orcid.org/0000-0001-7136-7158>, e-mail: onosov@inbox.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0003-0656-6964>,
e-mail: smetannikova49@bk.ru.

²Perm Agricultural Research Institute – Division of Perm Federal Research Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
12 Kultura Str., Lobanovo village 614532, Perm, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>, e-mail: korlyakovkn@rambler.ru,
****<https://orcid.org/0000-0001-6288-3185>, e-mail: lubacema@mail.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>, e-mail: pniish@rambler.ru,
*****<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru.

Received 13.11.2023, Revised 21.11.2023, Accepted 21.08.2024

Abstract: The results of research on properties of cinders obtained by high-temperature roasting of clay-salt waste (sludge) after processing K-Mg ores are presented. Cinders are used as complex fertilizers, ameliorant components and microelement fertilizers. Secondary wastes, after extraction of Pd, Pt, Ag from burnt sludge (cinder), consist of sludge after deslagging of crushed cinder and “tails” after sand enrichment. Mixing these products, moistening, granulating and sintering forms result in a sintering product (CP) that is ready for application as complex fertilizer, ameliorating additive and microfertilizer. A study of the chemical composition and composition of impurities of cinders

and CP was carried out. The identity of the composition of cinders and CP has been established. Tests with cinders and CP as a complex of fertilizers, ameliorants and microfertilizers were carried out. The research was carried out on the experimental field of Perm Agricultural Research Institute, on sod-podzolic heavy loamy soil formed on the deluvium of Permian clays, this soil represents up to 70% of the arable lands of the Perm region, the studied crop was potato. The yield of potato when applying cinder as an ameliorant additive was higher by 6.05 t/ha compared to the control (the use of traditional fertilizers provided an increase of 3.56 t/ha). For the first time determination of chemical composition including trace elements studies was fulfilled in potato tubers from unfertilized variants, plots fertilized with traditional fertilizers and plots fertilized with cinders. Two components of tubers – peel and pulp – were analyzed using a mass spectral method, with decomposition in a closed system (autoclave). Most of the elements were characterized by a higher content in the peel (almost an order of magnitude) compared to the pulp. An inverse relationship was observed for P and S, their content was higher in pulp than in peel. In the variant with the use of cinder, a higher content of microelements, especially rare-earths elements, was observed compared to the control. A method for processing sludge to extract Pd, Pt, Ag, results in secondary wastes, that can be used as complex slow-release fertilizers, ameliorating additives and microelement-containing fertilizers.

Keywords: clay-salt wastes; cinder; sintering product; high-temperature roasting; complex fertilizers; ameliorants; microelements; potato.

ВВЕДЕНИЕ

Основным видом калийного удобрения является хлористый калий. Однако входящий в него хлор может нарушать углеводный обмен при формировании урожая. Картофель является культурой с повышенной потребностью в калии, также он нуждается в микроэлементах, среди которых основными являются халькофильные элементы (Сметанников и др., 2019; Fernandes et al., 2011; Sharipova et al., 2016; Cuchiara et al., 2017).

Для картофеля целесообразно применение комплексных удобрений, в состав которых входят макро- и микроэлементы, а также мелиорирующие компоненты. Этим требованиям отвечают огарки, полученные при обжиге глинисто-солевых отходов (шламов) после переработки K-Mg руд (Оносов и др., 2014). В составе исходных шламов присутствуют калиевые полевые шпаты (КПШ), остаточный сильвин и галит, ангидрит, гипс, доломит,

минералы примеси, содержащие халькофильные элементы. Форма нахождения халькофильных элементов – сульфиды.

Кроме того, есть примеси микроэлементов, к которым относятся редкоземельные элементы цериевой и иттриевой групп в виде фосфатов, размер которых составляет от 100 нм до 1–3 мкм.

Высокотемпературный обжиг в присутствии хлоридных агентов (сильвин и галит) и окислительной обстановке приводит к преобразованию вещества шлама. В результате разрушается часть минералов (доломит, сульфаты кальция, хлориды). С использованием элементной базы разрушенных минералов образуется пироксен (магнезиального состава), обладающий высокими мелиоративными свойствами (нейтрализация почвенной кислотности) и составляющий до 45% объема огарка. Кварц и полевошпат остаются без изменений. Отжигаются также органические соединения благородных металлов и сульфиды.

Свободные металлы формируют интерметаллидные обособления состава Pd, Pt, Ag, Cu, Sn, Pb (Патент № 2770546, Сметанников и др., 2022).

Происходит также преобразование редкоземельных элементов и формирование интерметаллидов Се и У. Преобразование исходного шлама в результате высокотемпературного обжига приводит к формированию новообразований, в которых практически отсутствуют хлориды и сера.

Новообразованные минералы (магнезиальный пироксен) обладают высокими мелиоративными свойствами. Халькофильные и редкоземельные элементы находятся в интерметаллидной форме, либо в небольшой части в виде фосфатов. Функции удобрений выполняет КПШ и остаточный сильвин. Полученный огарок представляет собой комплекс, в который входят компоненты, имеющие свойства удобрений, мелиорантов и микроудобрений. В качестве микроудобрений позиционируются халькофильные элементы и редкоземельные элементы цериевой и иттриевой групп. Роль последних в качестве микроудобрений изучена недостаточно. Предполагается, что Се и У оказывают влияние на урожайность в комплексе с другими элементами-примесями. Влияние огарка как удобрения на состав картофеля, сказывается в накоплении редкоземельных элементов и других элементов-примесей в клубнях

картофеля, причем преимущественно в кожуре. В мякоти клубней их содержание на порядок ниже.

Важным свойством огарков является их экологическая безопасность (Бачурин и др., 2014).

Влиянием удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы, в том числе, изучением комбинированных органических удобрений, а также исследованием влияния тяжелых металлов, занимались многие ученые (Авдонин, 1960; Алексеев, 1987; Андреева, 1996; Афанасьев, 1960; Авдонин, 1960; Аренс, 1960).

Проблема позиционирования микроэлементов, представляющих микроудобрения, достаточно широко известна и разрабатывалась в работах Р.К. Кедров-Зихмана (1948), Я.В. Пейве (1954), П.А. Власюка (1956), М.В. Каталимова (1965), М.Я. Школьника (1974) в решении теоретических и практических задач. В качестве микроэлементов, составляющих микроудобрения, рассматривались медь, цинк, молибден, кобальт и некоторые другие элементы.

Положительное действие микроэлементов обуславливается их участием в окислительно-восстановительных процессах, углеводном и азотном обмене.

Они повышают устойчивость растений к болезням и неблагоприятным условиям внешней среды. В ряде почвенно-климатических зон культуры отзывчивы на различные микроудобрения. Чаще всего это отмечается при длительном внесении высоких доз минеральных удобрений, особенно на осушенных торфянистых почвах, орошаемых землях и на легких по гранулометрическому составу почвах.

Применение удобрений с пониженной растворимостью (пролонгированного действия) позволяет синхронизировать скорость растворения в почвенной среде и скорость поступления в растения питательных веществ (Сметанников и др., 2019). Обоженные шламы (огарки) отвечают этим условиям, обладая рядом дополнительных функций. Это, в первую очередь, их мелиорирующие свойства и наличие элементов-примесей, позиционируемых как микроудобрения.

В 2012–2013 гг. в Горном институте Уральского отделения РАН была разработана технология переработки отходов при производстве калийных удобрений из К-Mg руд Верхнекамского ка-

лийного месторождения. Был зарегистрирован патент № 249961 “Способ переработки отходов калийного производства” (Сметанников и др., 2013). Предварительные испытания данного комплекса в качестве комплексных удобрений проводились в 2014–2016 гг. путем лабораторных и микроделяночных испытаний на опытном поле Пермского НИИСХ. Изучаемые культуры – ячмень и многолетние травы.

Далее проводились опыты по применению огарка в качестве удобрения на посадках картофеля в рамках выполнения научной темы “Разработка новых технологий хранения и удобрения семенного картофеля на основе исследования свойств природных калийных солей и продуктов переработки отходов К-Mg руд”, входящей в КПНИ “Развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации” Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 гг. (Сметанников и др., 2014; 2017; 2019). В 2014–2019 гг. использовались огарки, полученные из галургических шламов до извлечения из них благородных металлов. Однако извлечение из обожженных галургических шламов Au, Pd, Pt, Ag связано с кислотно-сорбционной переработкой огарка, и в этом случае вторичные отходы имеют кислотный характер (Патент № 32235140-2004, Патент № 2291907-2007). Поэтому вторичные отходы такого состава не могут быть использованы в качестве удобрений.

С 2019 по 2022 гг. проводились исследования складированных флотационных шламов, которые привели к открытию способа переработки шламов, исключающего кислотно-сорбционную переработку огарка (патент РФ № 2770546-2022). Это позволило получить вторичные отходы, идентичные по составу огарку до извлечения Pd, Pt, Ag. Был проведен комплекс “сравнительных” исследований вторичных отходов и исходных огарков.

Вторичные отходы представлены шламами после измельчения и дешламации огарка и хвостами после обогащения песков и извлечения концентрата Pd, Pt, Ag. Шламы и хвосты обогащения проходили процесс смешивания, грануляции и спекались при температуре 150 °С.

Вторичные отходы (спеки) могут быть в полной мере использованы в качестве удобрений пролонгированного действия,

мелиорантов и микроудобрений. В связи с этим задачами исследований является изучение влияния огарков и вторичных отходов на урожайность и хозяйственно-полезные свойства семенного и товарного картофеля.

Результаты представляются после получения патента по данной проблеме № 2811122 “Применение по новому назначению вторичных отходов из складируемых флотационных шламов”. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ – 11 января 2024 г.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования были проведены на базе “ГИ УрО РАН” и “Пермского НИИСХ” – филиалов ПФИЦ УрО РАН. Объектами исследования являлись складируемые флотационные шламы (отходы после переработки К-Mg руд), а также картофель сорта “Торняк”.

Шламы проходили стадию высокотемпературного обжига, инициирующего преобразование органических соединений Pd, Pt, Ag в интерметаллидные обособления. Для извлечения из обожженных шламов Pd, Pt, Ag проводилось измельчение огарка и последующая дешламация.

Продукты дешламации – шламы и пески. Пески подвергались гравитационному обогащению. Образовывалось два продукта: хвосты обогащения и концентрат Pd, Pt, Ag. Концентрат далее отправляется на аффинаж. Выход шламов составлял 75%, выход песков 25%. Выход хвостов после получения концентрата составлял 24%, т. е. вторичные отходы представлены шламами и хвостами обогащения песков и по объему составляют 99% от исходного огарка.

Эти продукты могут быть использованы в качестве комплексного удобрения, мелиорирующей добавки и микроудобрения.

В новом удобрении сохраняется минеральный состав огарков до извлечения Pd, Pt, Ag (табл. 1), отвечающий свойствам удобрений и мелиорантов, а также состав микропримесей, в числе которых халькофильные элементы (Cu, Mn, Zn, Co и др.) и редкоземельные элементы цериевой и иттриевой групп (табл. 2).

Аналитические исследования минерального состава огарков и песков проводили методом рентгенофазового количественного анализа (РКФА) на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000, Cu-анод, графитовый монохроматор, Акерманит- $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, расчет содержаний проведен по методике Ритвельда. Содержание микроэлементов в огарках и спеках определяли масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой (МС) и атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой (АЭ) методами по методике НСАМ № 499-АЭС/МС. Аппаратура: Масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой X SERIES (“Thermo Scientific”, США); атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой спектрометр iCAP 6500 Duo (“Thermo Scientific”, США). Содержание микроэлементов в клубнях картофеля определяли методом масс-спектрального анализа кожуры и мякоти клубней в закрытой системе (автоклаве).

Механизм “компоновки” удобрения заключался в объединении вторичных отходов (шламов и хвостов) после извлечения Pd, Pt, Ag, их смешивании, гранулировании и спекании.

Полученный спек в виде гранул представляет комплекс, состоящий из компонентов, позиционируемых как удобрения пролонгированного действия, мелиорирующие компоненты и микроудобрения.

В качестве удобрительной компоненты, как в огарках так, и в спеках, представлены калиевый полевой шпат, размер частиц которого меньше 40 мкм, и в небольшой степени сильвин. Низкая степень растворимости калиевого полевого шпата обеспечивает пролонгированность его действия.

Исследования по влиянию огарков и спеков в качестве комплексного удобрения показали, что урожайность картофеля не отличается от показателей, полученных при применении традиционного (НРК) удобрения, но выше по сравнению с контролем (Сметанников и др., 2019г).

Исследования по влиянию комплексной мелиорирующей добавки на урожайность картофеля проводили в 2020–2022 гг. Почва опытного участка – дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая, сформированная на делювии пермских глин, и представляет до 70% пахотных земель Пермского края. До закладки

опыта почва обладала следующими агрохимическими характеристиками: $pH_{KCl} = 4.8-5.0$, гидролитическая кислотность – 2.2–2.5 ммоль/100 г, сумма поглощенных оснований – 164–180 ммоль/100 г, содержание гумуса – 1.9–2.0%, содержание подвижных форм фосфора и калия – 68–96 и 92–112 мг/кг соответственно.

Полевой опыт имел следующую схему:

1. контроль (без удобрений);
2. НРК (традиционные удобрения) – фон;
3. фон + огарок.

Дозы огарка рассчитывали на нейтрализацию 0.5 гидролитической кислотности, доза в физическом весе составила 3.1 т/га. Из “традиционных” удобрений в опыте использовали карбамид, аммофос и калий хлористый.

Доза составляла $N_{60}P_{60}K_{90}$. Удобрения вносили вручную, перед посадкой.

Повторность в опыте трехкратная, расположение делянок последовательное, площадь делянки – 18 м².

Агротехника общепринятая для семеноводческих посадок картофеля в Предуралье, схема посадки 75 × 50 см.

Метод учета урожайности – косвенный. Математическая обработка результатов – методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты представляются после получения патента по данной проблеме № 2811122 “Применение по новому назначению вторичных отходов из складированных флотационных шламов”. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ – 11 января 2024.

В таблице 1 показан минеральный состав огарков и спеков. В качестве удобряющего компонента представлен калиевый полевой шпат (КПШ) и остаточный сильвин. В качестве мелиорирующих компонентов в огарке и спеке позиционируются в основном пироксен и, в незначительной степени, остаточный ангидрит.

Таблица 1. Минеральный состав огарков и спеков по данным РКФА, масс. %

Table 1. Mineral composition of cinders and sintered mass according to the results of X-ray phase quantitative analysis

№ пробы	Минералы								
	кварц	галит	сильвин	акерманит	содалит	пироксен	КШП	ангидрит	сумма
Огарок. Обжиг при температуре 850 °С, содержание, вес. %									
1	6	5	8	22	11	31	12	5	100
Спек. Спекание при температуре 100 °С, содержание, вес. %									
2	8	3	6	19	8	32	18	6	100

В таблице 2 представлен элементный состав огарков и спеков.

Элементы-примеси разделены на три группы – макроэлементы (Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Fe), элементы халькофильной группы (Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Pb), а также Ti, Cr. Кроме того, присутствуют редкоземельные элементы (Ce, La, Y, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy). Содержание Ni, Co, Cu в комплексных удобрениях может превышать нормы, приведенные в СанПин 1.2.3685-21, но это явление не приводит к превышению норм содержания этих элементов в почвах по двум причинам. Первая причина – это форма нахождения Ni, Co, Cu в удобрениях (интерметаллиды), что обуславливает их низкую растворимость. Вторая причина – эффект разбавления, т. е. концентрация этих элементов в “удобренной” почве уже не превышает нормы СанПин 1.2.3685-21.

Результаты анализов показывают высокую степень схожести результатов и, как следствие, полную идентичность состава огарков и спеков.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в комплексных удобрениях, г/т
Table 2. Content of trace elements in complex fertilisers, g/t

№ п/п	Элемент	Проба				Метод анализа
		Огарки		Спеки		
		Определение 1	Определение 2	Определение 1	Определение 2	
		Халькофильные элементы				
1	Кобальт	11.6	12.4	20.2	15.8	МС, АЭ
2	Никель	143.9	108.2	47.3	71.2	МС, АЭ
3	Медь	47.0	50.4	27.3	69.5	МС, АЭ
4	Цинк	55.7	57.8	47.3	51.6	МС, АЭ
5	Мышьяк	1.32	1.54	9.64	6.81	МС
6	Молибден	11.3	12.5	1.36	2.24	МС
9	Свинец	9.05	10.2	7.98	13.1	МС
10	Титан	1 560.0	1 480.0	1 250	1 311	АЭ
11	Хром	71.3	70.2	115.8	71.3	МС

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

№ п/п	Элемент	Проба				Метод анализа
		Огарки		Спеки		
		Определение 1	Определение 2	Определение 1	Определение 2	
		Редкоземельные элементы				
11	Церий	31.4	32.6	47.0	27.4	МС
12	Лантан	11.7	12.1	20.3	12.7	МС
13	Иттрий	43.4	47.0	20.1	14.1	МС
14	Празеодим	3.02	3.10	5.11	3.45	МС
15	Неодим	14.5	15.2	20.6	14.3	МС
16	Самарий	2.73	2.84	4.13	3.06	МС
18	Гадолиний	2.75	2.83	3.88	2.80	МС
20	Диспрозий	2.44	2.49	3.31	2.6	АЭ

Примечание. Определение 1 и 2 – параллельный анализ двух навесок, отобранных из одной пробы.

Note. Determination 1 and 2 – parallel analysis of two weighted portions, taken from the same sample.

Ниже приводятся результаты анализа влияния комплекса “огарок-спек” как мелиорирующей добавки на урожайность картофеля сорта “Горняк” (опыт 1 и результаты анализа элементного состава клубней картофеля и распределения элементов-примесей в коже и мякоти клубней картофеля (опыт 2)).

Опыт 1. Влияние комплексной мелиорирующей добавки на урожайность картофеля сорта “Горняк” представлено в таблице 3. Добавление к полному минеральному удобрению огарка не оказывало достоверного влияния на увеличение урожайности картофеля, что могло быть связано с засушливыми условиями вегетации в периоды проведения исследований. Тем не менее, тенденция увеличения урожайности была отмечена в оба года, что вместе с другими положительными эффектами, которые более подробно описаны ранее (Сметанников А.Ф., 2019, Шишков Д.Г., 2022), является свидетельством существенной отдачи от применения комплексной мелиорирующей добавки.

Таблица 3. Влияние применения комплексной мелиорирующей добавки (огарка) на урожайность картофеля сорта “Горняк” (2020, 2022 гг.)
Table 3. Effect of application of complex ameliorating additive (cinders) on yield of potato variety “Gornyak” (2020, 2022).

Вариант	2020 г.			2022 г.		
	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га		Урожайность, т/га	Прибавка, т/га	
		к контролю	к фону		к контролю	к фону
Без удобрений	10.23	–	–	8.63	–	–
Фон – N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	13.80	3.56	–	17.47	8.84	–
Фон + огарок	14.01	3.78	0.22	18.27	9.64	0.81
НСП ₀₅	1.29			1.23		

Опыт 2. Влияние применения комплексного удобрения (огарка) на элементный состав клубней картофеля сорта “Горняк”: макроэлементный состав; микроэлементный состав; влияние редкоземельных элементов.

Анализ макроэлементов Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Fe (табл. 4, рис. 1). Анализ халькофильных микроэлементов медь, цинк, молибден, кобальт и некоторые другие элементы (табл. 5, рис. 2). Анализ редкоземельных элементов п (табл. 6, рис. 3).

Необходимо отметить, что подобного рода анализ сельхозпродуктов (картофель) производится впервые (ранее эти работы распространения не получали).

Установлено, что в клубнях картофеля происходит накопление макроэлементов (Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Fe), микроэлементов (халькофильные Zn, Cu, Mn, Ni, Ti, Cr, Mo) и редкоземельных элементов цериевой и иттриевой групп. Их накопление в кожуре клубней на порядок больше, чем в мякоти. Исключением являлись P и S, которые накапливались преимущественно в мякоти.

Наиболее высокое содержание в клубнях картофеля характерно для калия. В варианте с внесением NPK содержание элемента наименьшее, наибольшее – в варианте NPK + огарок (в среднем на 15%). Наиболее характерной особенностью распределения калия является его преимущественное концентрирование в кожуре картофеля (в два раза больше, чем в мякоти) для всех вариантов.

Наибольшее содержание фосфора отмечено в варианте с внесением NPK, при добавлении огарка содержание элемента снижалось. Распределение “кожура–мякоть” – обратное калию. В мякоти фосфора накапливалось в два раза больше, чем в кожуре.

Тенденции накопления магния по различным вариантам были аналогичны тенденциям накопления фосфора. В варианте с совместным внесением добавки и NPK содержание магния меньше в мякоти, чем в кожуре.

Высоким является содержание серы с повышением ее содержания в картофеле с участков, удобренных NPK, и понижением в картофеле с участков, удобренных огарками. Здесь также содержание серы в мякоти больше, чем в кожуре.

Таблица 4. Распределение макроэлементов в клубнях картофеля
Table 4. Distribution of macroelements in potato tubers

Элемент	Символ	Варианты					
		без удобрений		NPK		NPK + огарок	
		кожура	мякоть	кожура	мякоть	кожура	мякоть
		Содержания, г/т					
Натрий	Na	25.2	6.52	49.4	7.74	48.1	11.6
Магний	Mg	234.6	238.7	354.4	391.2	357.1	261.0
Алюми-ний	Al	25.6	1.31	50.1	0.96	44.3	0.84
Фосфор	P	318.0	665.7	324.3	754.8	265.7	533.6
Сера	S	308.7	490.1	306.3	528.4	265.9	369.5
Калий	K	7 493.0	3 715.8	7 446.9	3 239.5	8 532.4	4 416.7
Кальций	Ca	187.4	53.6	227.7	29.0	177.8	19.7
Железо	Fe	20.4	9.38	33.9	23.2	34.5	9.37

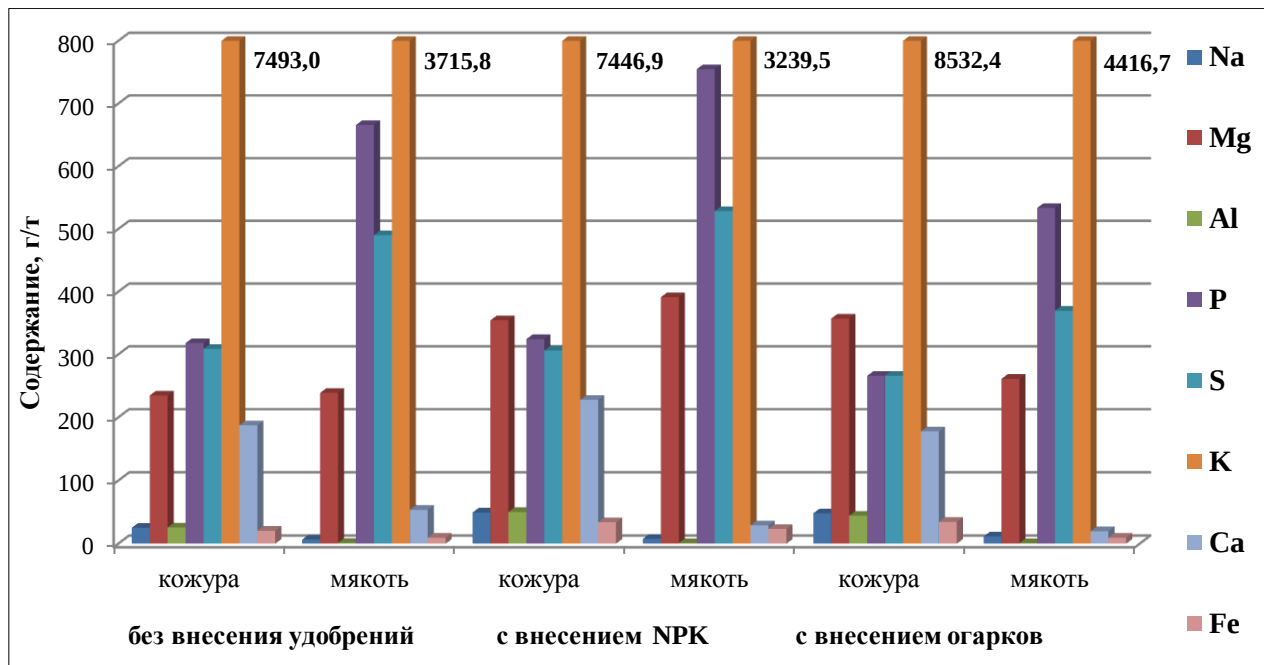


Рис. 1. График распределения макроэлементов.

Fig. 1. Macroelements distribution chart.

Таблица 5. Распределение микроэлементов (халькофильной группы) в клубнях картофеля
Table 5. Distribution of trace elements (chalcophilic group) in potato tubers

Элемент	Символ	Вариант					
		без удобрений		NPK		NPK + огарок	
		кожура	мякоть	кожура	мякоть	кожура	мякоть
		Содержания, г/т					
Цинк	Zn	5.80	5.07	4.55	7.22	4.87	4.77
Медь	Cu	1.44	1.55	1.72	2.62	1.69	1.06
Марганец	Mn	2.70	1.07	3.90	1.97	3.24	0.93
Никель	Ni	0.71	0.58	0.82	0.92	0.59	0.56
Титан	Ti	2.26	0.92	4.58	0.68	3.22	0.76
Хром	Cr	0.14	0.21	0.31	0.11	0.18	0.069
Молибден	Mo	0.077	0.073	0.13	0.062	0.11	0.045

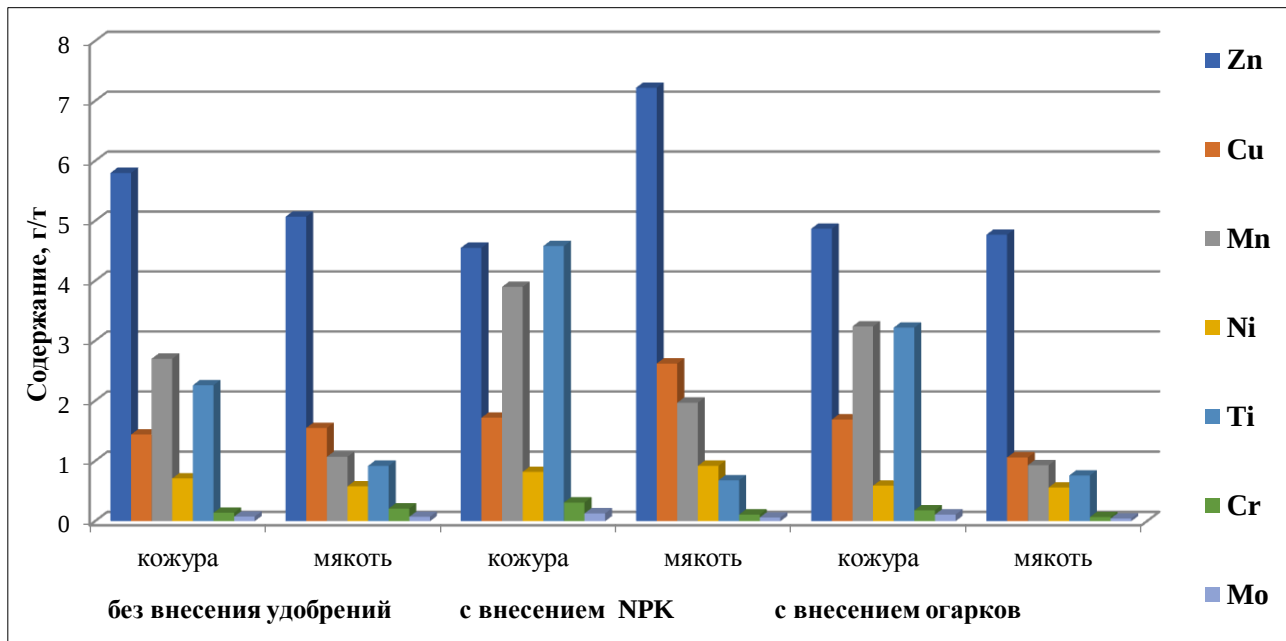


Рис. 2. График распределения микроэлементов.

Fig. 2. Microelements distribution chart.

Таблица 6. Распределение редкоземельных элементов в клубнях картофеля
Table 6. Distribution of rare-earth elements in potato tubers

Элемент	Символ	Вариант					
		без удобрений		NPK		NPK + огарок	
		кожура	мякоть	кожура	мякоть	кожура	мякоть
		Содержания, г/г					
Церий	Ce	0.027	0.0018	0.053	0.0021	0.082	0.0022
Лантан	La	0.014	0.00078	0.027	0.0013	0.040	0.0025
Празеодим	Pr	0.0028	0.0002	0.0058	0.0002	0.0089	<0.0002
Неодим	Nd	0.012	0.00087	0.022	0.0016	0.035	0.0013
Самарий	Sm	0.0019	0.0004	0.0042	<0.0004	0.0059	<0.0004
Иттрий	Y	0.0090	<0.003	0.017	<0.003	0.015	<0.003
Гадолиний	Gd	0.0018	<0.0003	0.0047	<0.0003	0.0052	<0.0003
Диспрозий	Dy	0.0016	<0.0003	0.0035	<0.0003	0.0033	<0.0003

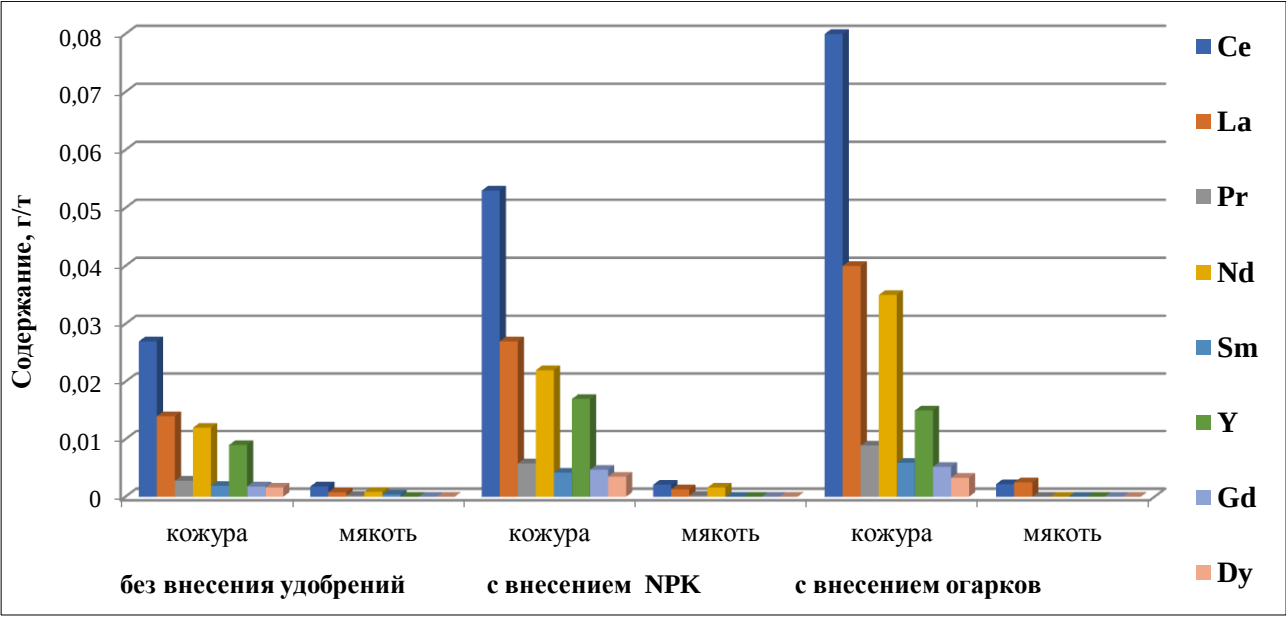


Рис. 3. График распределения редкоземельных элементов.
Fig. 3. Distribution chart of rare-earth elements.

Содержание кальция и железа увеличивалось в клубнях с участков, удобренных NPK, и понижается в картофеле с участков, удобренных огарками. В распределении “кожура–мякоть” отмечена общая закономерность – в мякоти содержание кальция в 3–8 раз меньше, чем в кожуре.

Распределение железа (“кожура–мякоть”) аналогично кальцию.

Натрий характеризуется достаточно низким содержанием, его содержание в картофеле повышается от неудобренных участков к участкам, удобренным NPK и огарками, и в 3–8 раз меньше в мякоти, чем в кожуре.

Содержание алюминия составляет от 20 до 50 г/т в кожуре и от 0.84 до 1.31 г/т в мякоти. Как видно, в мякоти содержание алюминия в 25–50 раз меньше, чем в кожуре. В кожуре картофеля его содержание повышается от участков без внесения удобрений к участкам с внесением NPK и огарков, а для мякоти фиксируется понижение содержания – от участков без внесения удобрений к участкам с внесением удобрений (NPK) и огарков.

В целом можно отметить некоторое повышение содержания для всех халькофильных элементов в картофеле с участков, удобренных NPK и огарками, по сравнению с картофелем с неудобренных участков, и понижение содержания этих элементов в мякоти картофеля.

Как видно из табличных данных, наиболее значимое влияние оказали редкоземельные элементы цериевой группы. Они последовательно накапливаются в клубнях картофеля с участков неудобренных к участкам, удобренным NPK, и далее к удобренным огарками. Причем основное накопление фиксируется в кожуре картофеля. Характерно также, что эффект накопления сказывается в основном на цериевой группе и главным элементом является церий. Элементы иттриевой группы, кроме иттрия, отсутствуют, а распределение иттрия аналогично церию.

Обнаружено преимущественное накопление редкоземельных элементов в кожуре картофеля.

Следующим этапом изучения влияния редкоземельных элементов является оценка качества картофеля с повышенными содержаниями этих элементов и влияния на системы жизнеобеспе-

чения организма человека. Настоящее исследование показывает, что под воздействием огарков повышается не только урожайность с.-х. культур (влияние удобряющих и мелиорирующих добавок), но и происходит увеличение содержания в биомассе редкоземельных элементов.

Комплексные удобрения, представляющие собой вторичные отходы, полученные из флотационных шламов – продуктов переработки К-Mg руд после извлечения благородных металлов, не соответствуют общепринятым представлениям об удобрениях. Это связано с тем, что комплексное удобрение содержит не только удобряющий компонент, но и мелиорирующий компонент и микроудобрения. Воздействие его на почву приводит не только к повышению урожайности, но и к изменению физико-химических свойств почвы.

Комплексные удобрения представляют собой техногенное образование (вторичные отходы), содержащее источник калия (КПШ), мелиорирующие компоненты (сульфат кальция и пироксен) и микроудобрения в виде индивидуализированных выделений интерметаллидов Cu, Zn, Co, Se, Y и др.

Учитывая состав и содержание указанных компонентов, комплексные удобрения представляют собой “образование”, характеризующееся нейтральной или слабощелочной реакцией среды, высоким содержанием калия, диоксида серы и магния. Следствием его внесения в почву (дерново-подзолистую) будет повышение естественного плодородия и изменение кислотно-основных свойств.

Если описываемые образования являются техногенными, то в природе существуют почвы подобного состава, сформированные в вулканических областях. Почвы эти являются корой выветривания вулканических пород и содержат калий (до 7.2%), диоксид серы, углерод, магний (Irvine, Baragar, 1971). В минеральном выражении это КПШ, сульфат кальция, пироксен или оливин.

Конечно, комплексное удобрение не “дотягивает” по содержанию калия до этих пород, но содержание пироксена и сульфата кальция близки.

Необходимо отметить, что комплексные удобрения-мелиоранты не являются конкурентами традиционных (быстро-

растворимых) удобрений. Основная задача данных удобрений – это улучшение кислотно-основных свойств почв, характеризующихся кислой реакцией среды, а также повышение общего плодородия почв.

Увеличение плодородия бедных дерново-подзолистых почв является до настоящего времени актуальной задачей для с.-х. производства не только Пермского края, но и севера России в целом.

Процессы изменения параметров плодородия почвы требуют многолетних исследований, в которых учитывается действие и последствие изучаемых удобрений и мелиорантов. Поэтому исследования по влиянию огарков и других видов нетрадиционных удобрений будут продолжены.

Необходимо отметить очень важное обстоятельство, связанное с нормами внесения комплексных удобрений, гораздо более высоких, в сравнении с нормами внесения традиционных удобрений. В условиях Пермского края решение этого вопроса возможно. Дело в том, что деятельность горно-химических предприятий Пермского края, связанных с переработкой К-Mg руд, приводит к формированию глинисто-солевых отходов (шламов), которые являются исходным сырьем для извлечения благородных металлов и использования вторичных отходов в качестве комплексных удобрений.

Учитывая наличие способа (технологии) переработки шламов с целью извлечения Pd, Pt, Ag и формирования после их извлечения вторичных отходов, позиционируемых как комплексные удобрения, выявляется перспектива по организации промышленной переработки шламов. Это позволит реализовать возможность использования вторичных отходов в качестве комплексных удобрений.

Разработка Верхнекамского калийного месторождения началась в 1934 г. В настоящее время расширился список предприятий, объемы переработки К-Mg руд возросли, следовательно, возросло количество отходов (шламов). На 2023 г. в шламохранилищах только ПАО “Уралкалий” накоплено около 60 миллионов тонн шламов. Широкое внедрение технологии переработки шламов и применения удобрений из вторичных отходов решает в положительном плане не только экономические, но и геоэкологиче-

ские проблемы Пермского региона за счет масштабной утилизации экологически опасных отходов.

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ получения новых комплексных удобрений из флотационных шламов – отходов переработки К-Mg руд после их обжига и извлечения из них Pd, Pt, Ag, включающих удобрения пролонгированного действия, мелиорирующие компоненты и микроудобрения.

2. Комплексные удобрения представлены вторичными отходами, которые формируются после извлечения из продукта обжига – огарка – Pd, Pt, Ag, и по минеральному и микроэлементному составу соответствуют составу огарка до извлечения драгоценных металлов.

3. Проведенные полевые опыты на посадках картофеля показали возможность и необходимость применения вторичных отходов как комплексных удобрений, мелиорантов и микроудобрений. Использование огарков и вторичных отходов в качестве мелиорирующей добавки обеспечило существенное увеличение урожайности картофеля в сравнении с фоном и традиционными удобрениями, а также повышение его качества (содержания сухого вещества и крахмала в клубнях).

4. Комплексные удобрения не являются конкурентами традиционных (быстрорастворимых) удобрений. Основная задача этих “удобрений” – повышение плодородия почвы и изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы, что является актуальной задачей для с.-х. производства не только Пермского края, но и севера России в целом.

5. Разработана методика оценки влияния макро- и микроэлементов, а также редкоземельных элементов на состав клубней картофеля. Основа методики – анализ клубней картофеля с раздельным анализом кожуры и мякоти клубней масс-спектральным методом с разложением пробы в закрытой системе (автоклав).

6. Распределение элементов-примесей в клубнях картофеля характеризуется преимущественным их накоплением в кожуре клубней в сравнении с мякотью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин Н.С., Арене И.П., Степанова А.Н. Влияние удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1960. № 9. С. 25–34.
2. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 140 с.
3. Андреева Н.М. Комбинированные органические удобрения из отходов производства // Химия в сельском хозяйстве. 1996. № 6. С. 33–34.
4. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Сравнительная эффективность систем удобрения // Агрохимия. 2021. № 2. С. 31–36. DOI: [10.31857/S0002188121020034](https://doi.org/10.31857/S0002188121020034).
5. Бачурин Б.А., Сметанников А.Ф., Хохрякова Е.С. Эколого-геохимическая оценка продуктов переработки глинисто-солевых шламов калийного производства // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15442>.
6. Власюк П.А. Микроэлементы и радиоактивные изотопы в питании растений. Киев: Изд-во АН УССР, 1956. 115 с.
7. Каталымов М.В. Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
8. Кедров-Зихман О.К. Известкование почв подзолистой зоны СССР. М.: Изд-во Министерства сельского хозяйства СССР, 1948. 32 с.
9. Оносов Д.В., Сметанников А.Ф. Разработка технологии комплексной утилизации отходов переработки калийно-магниевого руд // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: Материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института Уро РАН и 75-летию основателя и первого директора института члена-корреспондента РАН А.Е. Красноштейна. Пермь: ФГБУН Горный институт Уральского отделения РАН, 2014. С. 167–171.
10. Пейве Я.В. Микроэлементы в сельском хозяйстве Нечерноземной полосы СССР. М.: Издательство АН СССР, 1954. 108 с.
11. Синегрибов В.А., Сметанников А.Ф., Юдина Т.Б., Новиков П.Ю., Логвиненко И.А., Красноштейн А.Е. Способ извлечения благородных металлов: № 2291907 С1 Российская Федерация. МПК C22B 11/00 // Бюл. № 22. 2007 г.
12. Синегрибов В.А., Юдина Т.Б., Сметанников А.Ф., Красноштейн А.Е. Способ извлечения благородных металлов: Патент № 2235140 С2 Российская Федерация. МПК C22B 11/00, C22B 1/04, C22B 3/06. Бюл. № 24. 2004 г.
13. Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Бачурин Б.А., Оносов Д.В.,

Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишков Д.Г., Оносова Е.Ф. Разработка методологического подхода в применении комплексных удобрений пролонгированного действия для зерновых культур, многолетних трав и картофеля // Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2018. № 21. С. 415–423.

14. Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Митрофанов Е.М., Бачурин Б.А., Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишков Д.Г., Оносова Е.Ф. Результаты испытаний отходов переработки калийно-магнєвых руд в качестве удобрений пролонгированного действия // Вестник ПНЦ. 2017. № 4. С. 58–63.

15. Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Корляков К.Н., Оносов Д.В., Ямалтдинова В.Р., Шишков Д.Г., Оносова Е.Ф. Концепция использования комплексных удобрений пролонгированного действия на основе отходов переработки калийно-магнєвых руд как новой парадигмы в улучшении плодородия почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 133–158. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-133-158](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-133-158).

16. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Оносова Е.Ф., Сметанников Ал.Ф. Способ извлечения палладия, платины, серебра из отходов переработки калийно-магнєвых руд: Патент № 2770546 С1 Российская Федерация. МПК С22В 11/06, С22В 7/00, С22В 1/02. заявл. 07.06.2021. опубл. 18.04.2022.

17. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Косолапова А.И., Новиков П.Ю. Способ переработки отходов калийного производства: Патент № 2497961 С1 Российская Федерация. МПК С22В 11/00, С22В 7/00, В03В 7/00: заявл. 02.10.2012: опубл. 10.11.2013.

18. Шишков Д.Г., Корляков К.Н., Васбиева М.Т., Цема Л.Г., Сметанников А.Ф., Ямалтдинова В.Р. Использование продукта переработки К-Mg руд как комплексной мелиорирующей добавки на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в Предуралье // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2022. № 4. С. 26–34.

19. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1974. 324 с.

20. Cuchiara C.C., Larre C.F., Peters J.A. Copper and zinc interactions: morphophysiological responses in sweet potato plants (*Ipomoea batatas* L.) // Iheringia – Serie Botanica. 2017. Vol. 72(1). P. 142–149. DOI: [10.21826/2446-8231201772113](https://doi.org/10.21826/2446-8231201772113).

21. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks // Canadian Journal of Earth Sciences. 1971. Vol. 8. Iss. 5. P. 523–548. DOI: [10.1139/e71-055](https://doi.org/10.1139/e71-055).

22. *Fernandes A.M., Soratto R.P., Silva B.L.* Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: I – Macronutrients // *Revista Brasileira de Ciencia do solo*. 2011. Vol. 35(6). P. 2039–2056. DOI: [10.1590/S0100-06832011000600020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600020).
23. *Sharipova D.S., Aitbayev., Tazhibayev T.S. Nacheva E.K.* The impact of nev and improved elements of agricultural technologies on potato productivity in the south-east of Kazakhstan // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016. Vol. 13(2). P. 1031–1036. DOI: [10.13005/bbra/2129](https://doi.org/10.13005/bbra/2129).

REFERENCES

1. Avdonin N.S., Arene I.P., Stepanova A.N., Vlijanie udobrenij na svojstva dernovo-podzolistoj pochvy (The influence of fertilizers on the properties of sod-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 1960, No. 9, pp. 25–34.
2. Alekseev Yu.V., *Tjzhelye metally v pochvah i rastenijah* (Heavy metals in soils and plants), Leningrad: Agro-promizdat, 1987, 140 p.
3. Andreeva N.M., Kombinirovannye organicheskie udobrenija iz othodov proizvodstva (Combined organic fertilizers from production waste), *Himija v sel'skom hozjajstve*, 1996, No. 6, pp. 33–34.
4. Afanas'ev R.A., Merzlaja G.E., Sravnitel'naja jeffektivnost' sistem udobrenija (Comparative efficiency of fertilization systems), *Agrohimija*, 2021, No. 2, pp. 31–36, DOI: [10.31857/S0002188121020034](https://doi.org/10.31857/S0002188121020034).
5. Bachurin B.A., Smetannikov A.F., Hohrjakova E.S., Ekologo-geohimiskaja ocenka produktov pererabotki glinisto-solevyh shlamov kalijnogo proizvodstva (Ecological and geochemical assessment of products from processing clay-salt sludge from potassium production), *Elektronnyj zhurnal "Sovremennye problemy nauki i obrazovanija"*, 2014, No. 6, URL: www.science-education.ru/120-15442.
6. Vlasjuk P.A., *Mikrojelementy i radioaktivnye izotopy v pitanii rastenij* (Microelemets and radionuclides in plant nutrition), Kiev: Izd-vo AN USSR, 1956, 115 p.
7. Katalymov M.V., *Mikrojelementy i mikroudobrenija* (Microelements and microfertilizers), Moscow: Himija, 1965, 330 p.
8. Kedrov-Zihman O.K., *Izvestkovanie pochv podzolistoj zony SSSR* (Liming of soils in the podzolic zone of the USSR), Moscow: Izd-vo Ministerstva sel'skogo hozjajstva SSSR, 1948, 32 p.
9. Onosov D.V., Smetannikov A.F., Razrabotka tehnologii kompleksnoj utilizacii othodov pererabotki kalijno-magnievyyh rud (Development of technology for complex recycling of potassium-magnesium ore processing waste), In: *Problemy bezopasnosti i jeffektivnosti osvoenija georesursov v sovremennyh uslovijah*: Proc. of the Sci. and Pract. Conf. devoted to the 25th

Anniversary of the Mining Institute of the Ural Branch of RAS and 75th Anniversary of the Founder and First Director of the Institute Corresponding Member of RAS A.E. Krasnoshtein, Perm: FGBUN Mining Institute of the Ural Branch of RAS, 2014, pp. 167–171.

10. Pejve Ya.V., *Mikrojelementy v sel'skom hozjajstve nechernozyomnoj polosy SSSR* (Microelements in agriculture of the Non-Chernozem zone of the USSR), Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1954, 108 p.

11. Sinegribov V.A., Smetannikov A.F., Judina T.B., Novikov P.Yu., Logvinenko I.A., Krasnoshtein A.E., *Sposob izvlecheniya blagorodnykh metallov* (Method for extracting precious metals), No. 2291907 C1 Russian Federation, MPK C22B 11/00, Bul. 2007 g., No. 2.

12. Sinegribov V.A., Yudina T.B., Smetannikov A.F., Krasnoshtein A.E., *Sposob izvlecheniya blagorodnykh metallov* (Method for extracting precious metals), Patent No. 2235140 C2 Russian Federation, MPK C22B 11/00, C22B 1/04, C22B 3/06, Bul. 2004 g., No. 24.

13. Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Bachurin B.A., Onosov D.V., Fomin D.S., Jamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F., *Razrabotka metodologicheskogo podhoda v primenении kompleksnykh udobreniy prpolongirovannogo dejstvija dlja zernovykh kul'tur, mnogoletnih trav i kartofelja* (Development of a methodological approach to the use of complex long-acting fertilizers for grain crops, perennial grasses and potatoes), *Nauchnye chtenija pamjati P.N. Chirvinskogo*, 2018, No. 21, pp. 415–423.

14. Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Mitrofanov E.M., Bachurin B.A., Onosov D.V., Fomin D.S., Jamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F. *Rezultaty ispytaniy othodov pererabotki kalijno-magnievyykh rud v kachestve udobreniy prpolongirovannogo dejstvija* (Results of testing waste from processing potassium-magnesium ores as long-acting fertilizers), *Vestnik PNC*, 2017, No. 4, pp. 58–63.

15. Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Korlyakov K.N., Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F., Concept of use of comprehensive fertilizers of long-term action on the basis of waste processing of potassium-magnesium ore as a new paradigm in improving soil fertility, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 133–158, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-133-158](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-133-158).

16. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Onosova E.F., Smetannikov A.F., *Sposob izvlecheniya palladija, platiny, serebra iz othodov pererabotki kalijno-magnievyykh rud* (Method for extracting palladium, platinum, silver from processing waste of potassium-magnesium ores): Patent No. 2770546 C1 Russian Federation, MPK C22B 11/06, C22B 7/00, C22B 1/02. *zajavl.* 07.06.2021, *opubl.* 18.04.2022.

17. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Sinegribov V.A., Kosolapova A.I.,

Novikov P.Yu., *Sposob pererabotki othodov kalijnogo proizvodstva* (Method for processing waste from potash production): Patent No. 2497961 C1 Russian Federation, MPK C22B 11/00, C22B 7/00, B03B 7/00: zajavl. 02.10.2012, opubl. 10.11.2013.

18. Shishkov D.G., Korljakov K.N., Vasbieva M.T., Cema L.G., Smetannikov A.F., Jamaltdinova V.R., Ispol'zovanie produkta pererabotki K-Mg rud kak kompleksnoj meliorirujushhej dobavki na dernovo-podzolistoj tjazhelosuglinistoj pochve v Predural'e (Using the product of processing K-Mg ores as a complex reclamation additive on sod-podzolic heavy loamy soil in the Cis-Urals), *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra*, 2022, No. 4, pp. 26–34.

19. Shkol'nik M.Ya., *Mikrojelementy v zhizni rastenij* (Microelements in plant life), Leningrad: Nauka Leningradskoe otdelenie, 1974, 324 p.

20. Cuchiara C.C., Larre C.F., Peters J.A., The objective of this study was to evaluate the combined effects of copper (Cu) and zinc (Zn) on sweet potato plants based on morphological parameters, mineral profiles, and antioxidant metabolism, *Iheringia – Serie Botanica*, 2017, Vol. 72(1), pp. 142–149, DOI: [10.21826/2446-8231201772113](https://doi.org/10.21826/2446-8231201772113).

21. Irvine T.N., Baragar, W.R.A., A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, Vol. 8, Iss. 5, pp. 523–548, DOI: [10.1139/e71-055](https://doi.org/10.1139/e71-055).

22. Fernandes A.M., Soratto R.P., Silva B.L., Nutrient exstraction and exportation by potato cultivars: I – Macronutrients, *Revista Brasileira de Ciencia do solo*, 2011, Vol. 35(6), pp. 2039–2056, DOI: [10.1590/S0100-06832011000600020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600020).

23. Sharipova D.S., Aitbayev., Tazhibayev T.S. Nacheva E.K., The impact of nev and improved elements of agricultural technologies on potato productivity in the south-east of Kazakhstan, *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2016, Vol. 13(2), pp. 1031–1036, DOI: [10.13005/bbra/2129](https://doi.org/10.13005/bbra/2129).

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 120

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 25.09.2024 г.
Подписано в печать 25.09.2024 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 19 Тираж 75 экз. Заказ №

Цена договорная.

Отпечатано с готового макета по заказу
Почвенного института имени В.В. Докучаева
ИП Ерховой И.М. (ОГРНИП 319774600080241)
Тел. (495) 799-48-85
e-mail: apr-rpa@list.ru