

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2023

Том 6. Выпуск 1

ISSN 2618-6802 (online)

Зарегистрирован в Роскомнадзоре: ЭЛ № ФС 77 – 72325 – сетевое издание от 14.02.2018 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес издателя и редакции: 630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 8/2, тел.: +7(383) 363-90-35, E-mail: redactor@soils-journal.ru, сайт: <https://www.soils-journal.ru>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, директор ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Заместители главного редактора

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, зав. лабораторией агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии

Абакумов Евгений Васильевич – профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства (Улан-Удэ, Россия)

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амуриевна – доктор географических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам, ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ФГБОУ ВО Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Рожков Вячеслав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Почвенный институт им.В.В. Докучаева (Москва, Россия)

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (UNAM, Мехико, Мексика), ведущий научный сотрудник ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр СО РАН» (Тюмень, Россия)

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, зав. лабораторией рекультивации почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора по науке, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией генезиса почв и радиоэкологии, ФГБУН Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, руководитель Сибирского НИИ земледелия и химизации СФНЦА РАН (Новосибирск, Россия)

Шпедт Александр Артурович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Содержание

Органическое вещество и биохимия почв

- Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения e199

Почвенно-физические процессы, свойства и режимы

- Бабаева Г.Р., Рагимов Р.М. Вопросы валидации результатов при наземно-бортовом спектральном определении влажности почвы e202

Биогеохимия, загрязнение и ремедиация объектов окружающей среды

- Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Кирста Ю.Б., Ельчи니нова О.А., Трошкова И.А., Балыкин Д.Н., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В., Пеленева М.П. Микроэлементы в компонентах агроландшафтов Алтайского края e188

Поведение почв и экосистем в пространстве и во времени

- Лада Н.Ю., Миронычева-Токарева Н.П. Микробиоморфы дерново-солоди и погребенной органо-аккумулятивной квазиглееватой почвы лесостепи Западной Сибири e192

Обзоры, дискуссии, памятные даты

- Азаренко Ю.А., Бойко В.С. Памяти профессора Леонида Владимировича Березина e200



ПУЛЫ И ФРАКЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ: СТРУКТУРА, ФУНКЦИИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

© 2023 В. М. Семенов ¹, Т. Н. Лебедева ¹, В. О. Лопес де Гереню ¹, Л. А. Овсепян ¹,
М. В. Семенов ², И. Н. Курганова ¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – ФИЦ «Пуцинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, 2, Пушкино Московской области, 142290, Россия. E-mail: ikurg@mail.ru

²ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Пыжжевский пер. 7, стр. 2, Москва, 119017, Россия

Разделение почвенного органического вещества (ПОВ) на пулы и фракции позволяет понять природу и функции ПОВ, охарактеризовать его качество, состав и свойства. В работе представлен анализ подходов, методов и результатов определения различных пулов ПОВ на примере серой и агросерой почв контрастных типов землепользования (Московская область, Россия). Консервативные свойства и депонирующие функции ПОВ предложено оценивать гранулометрическими и денсиметрическими пулами, а динамические свойства и эмиссионные функции – микробным и потенциально-минерализуемым пулами. Показано, что соотношение различных пулов в составе почвенного органического вещества зависит от типа землепользования и контролируется составом и количеством поступающих в почву растительных материалов. Выделение структурных и процессных пулов, определение их размеров и соотношений следует считать обязательным этапом в программах мониторинга качества и функций почвенного органического вещества и процессов секвестрации углерода.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество; денсиметрическое фракционирование; органическое вещество твердых частиц; минерально-связанное органическое вещество; потенциально-минерализуемое органическое вещество; микробная биомасса

Цитирование: Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. e199. DOI: [10.31251/pos.v6i1.199](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199).

ВВЕДЕНИЕ

Тотальная рекарбонизация наземных экосистем – одно из стратегических направлений в решении проблемы избыточного содержания диоксида углерода в атмосфере наряду с глубокой декарбонизацией промышленности, энергетики, транспорта и сельского хозяйства. Рекарбонизация наземных экосистем достигается посредством залесения или залужения вырубков, неудобий и деградированных земель, использования в земледелии агролесомелиоративных технологий, предусматривающих проградационное накопление органического углерода (C_{org}) в почве до уровня ненарушенных или естественных экосистем (Lal et al., 2012; Lozano-García et al., 2020).

Углерод в почве содержится преимущественно в органической форме в составе почвенного органического вещества (ПОВ) и частично в неорганической форме в виде карбонатов. ПОВ представляет собой сложный, гетерогенный и полифункциональный континуум в конгломерате минеральных частиц почвы (Семенов. Когут, 2015). Запасы органического углерода в почве и его устойчивость к биодеградации зависят от сочетания внешних и внутренних детерминантов, контролирующих не только разложение, но и стабилизацию органического вещества (Курганова и др., 2019). Ключевыми факторами, влияющими на стабильность органического вещества в почвах, являются климат и тип растительности (землепользование). Подразделение ПОВ на пулы и фракции позволяет выявлять природу, состав, свойства, качество, функции и другие характеристики ПОВ. По новейшим представлениям ПОВ – это континуум от грубых твердых органических частиц размером 2–0,053 мм (Particulate Organic Matter, POM) до тонкодисперсных, связанных с минералами органических веществ размером <0,053 мм (Mineral-Associated Organic Matter, MAOM) (Lavallee et al., 2020). Пул POM состоит из свежих и разлагающихся органических остатков, либо незащищенных, либо включенных в агрегаты почвы со средним временем существования в почве от нескольких лет до десятилетий. Напротив, пул MAOM представлен в

основном тонкодисперсным органическим веществом из побочных продуктов микробного происхождения, связанных с минеральными частицами, среднее время существования которого оценивается от нескольких десятилетий до веков. Физико-химические взаимодействия органического вещества с минеральными частицами почвы обеспечивают наиболее прочную стабилизацию углерода и его длительную сохранность в почве (Cotrufo et al., 2013). Твердые органические частицы предположительно образуют лабильный пул ПОВ, а минерально-связанное органическое вещество – стабильный пул. Можно предположить, что РОМ характеризует стадию почвенной секвестрации углерода, а МАОМ – стадию запасаания (депонирования) углерода в почве. Оба эти пула относятся к группе структурных пулов ПОВ (рис. 1).

Секвестрированное органическое вещество в почве может быть более инертным и депонированным или биологически активным и трансформируемым (Baveye et al., 2020; Stockmann et al., 2013; Janzen, 2006). Поэтому программы рекарбонизации наземных экосистем, в том числе в рамках создания «Карбоновых полигонов» (Курганова и др., 2022) и программы ВИП ГЗ (Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг»), должны включать оценку не только структурного статуса ПОВ, но и его текущей функциональности, подразумевая под этим его способность участвовать в текущих почвенных процессах и поддерживать эко-биологические функции почвы (Hoffland et al., 2020).

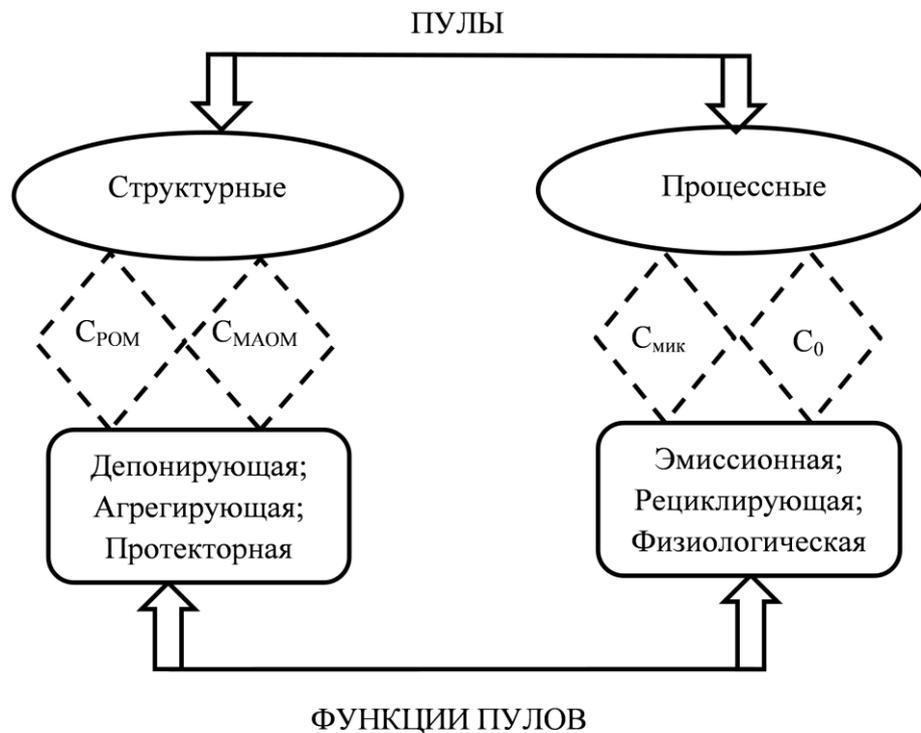


Рисунок 1. Пулы почвенного органического углерода и их функции.

Для оценки функциональности ПОВ в первую очередь следует определять процессные пулы ПОВ (см. рис. 1), к которым относят потенциально-минерализуемое органическое вещество (C_0) и углерод микробной биомассы ($C_{мик}$) (Ананьева и др., 2011; Семенов и др., 2006). Пулы ПОВ являются потенциальными источниками эмиссии диоксида углерода в атмосферу и резервуарами депонирования секвестрируемого углерода, тесно связанными с потоками углерода в экосистемах.

Цель представляемой работы состояла в теоретическом обосновании методов определения структурных и процессных пулов органического вещества и обобщении экспериментальных данных по фракционированию ПОВ на примере серой лесной и агросерой почв контрастных видов землепользования (лес, луг и агроценоз). Полевые и лабораторные исследования выполнялись в разные годы в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Настоящая работа представляет собой впервые выполненный в рамках одного исследования обзор методов и полученных с их помощью результатов разделения органического вещества почвы с использованием гравиметрического, денсиметрического и биокинетического фракционирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение структурных и процессных пулов органического вещества проводили в серой (Haplic Luvisols (Siltic)) и агросерой почвах контрастных видов землепользования (лес, луг и агроценоз) (рис. 2). Все экспериментальные участки расположены на автоморфных позициях правобережья реки Оки, принадлежащей к северным отрогам Средне-Русской возвышенности. Процесс почвообразования идет на покровных лессовидных породах, представленных средними и тяжелыми суглинками, легкими глинами, с преобладанием пылеватой фракции (Алифанов, 1995). Климат региона умеренно-континентальный со среднегодовой температурой воздуха 5,7 °С и годовым количеством осадков 640 мм (за период с 1991 по 2020 гг.). Среднемесячные температуры июля и января за тот же период составляют 18,8 и -7,2 °С, соответственно.

Лесной ценоз (54,8352 с.ш., 37,5728 в.д.) представляет собой вторичный лиственный лес, с преобладанием клена, липы, осины, единично встречается береза. В напочвенном травяном покрове доминируют зеленчук желтый (*Galeobdolon luteum* Huds.) и медуница неясная (*Pulmonaria obscura* Dumort.). Луговой ценоз (54,8351 с.ш., 37,57455 в.д.) представляет собой старосеянный (1979 г.) разнотравно-злаковой луг с преобладанием ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.) и вейника наземного (*Calamagrostis epigeos* L.), не косимый и не используемый для выпаса на протяжении более 35 лет на момент отбора образцов. В агроценозе 1 (54,8230 с.ш., 37,5651 в.д.) возделываются зерновые культуры и однолетние травы, а агроценоз 2 (54,8287 с.ш., 37,5684 в.д.) представляет собой бывшее опытное поле ИФХиБПП РАН, где в течение последних 25 лет поддерживается зерно-паровой севооборот (см. рис. 2). Объекты исследования располагаются друг от друга на расстоянии 0,5–0,8 км.

Гранулометрическое фракционирование (ГМФ). Для его проведения на участках под лесом, лугом и в агроценозе 1 в трех точках из верхнего слоя почвы (2–20 см) вырезали монолиты, которые затем высушивали до воздушно-сухого состояния, пропускали почву через сито с диаметром отверстий 2 мм и готовили смешанные образцы цельной почвы.



Рисунок 2. Местоположение точек отбора почвенных проб: 1 – лесной ценоз, 2 – луговой ценоз, 3 – агроценоз 1, 4 – агроценоз 2.

При гранулометрическом фракционировании почва подразделяется на твердые органические частицы (РОМ) размером 2–0,05 мм, распределенные в гранулометрической фракции песка, и тонкодисперсное минерально-связанное органическое вещество (МАОМ) в составе пыли и глины размером <0,05 мм. Для проведения ГМФ навеску почвы массой 10 г

диспергировали в 30 мл 0,5% раствора гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) на шейкере в течение 15 ч при скорости 180 об/мин (Cambardella, Elliott, 1992). Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0,05 мм. Остаток на сите несколько раз промывали дистиллированной водой, до получения прозрачной промывной жидкости, далее сушили в течение часа при 40 °С, после чего количественно переносили в емкость для высушивания и оставляли на сутки при 65 °С до полного высыхания. После высушивания измеряли массу РОМ, распределенную во фракции песка. В образцах РОМ определяли содержание углерода ($C_{\text{РОМ}}$) в трех повторениях на автоматическом CNHS-анализаторе Leco-932 (США). Определение РОМ является обязательной процедурой гранулометрического фракционирования ПОВ.

При необходимости выделяют также минерально-связанное органическое вещество (МАОМ) гранулометрических фракций пыли и глины. Для этого промывочную жидкость под ситом размером <0,05 мм количественно собирают в емкости. Накопленную суспензию в емкостях выдерживают до полного осаждения частиц, декантируют надосадочную жидкость, осадок центрифугируют в течение 30 мин со скоростью 2500 об/мин на центрифуге Janetzki K70D, после чего полученный осадок высушивают при 65 °С в течение суток. Массу МАОМ вычисляют по разнице между навеской почвы и массой РОМ. Как и в случае с РОМ, в образцах МАОМ измеряют содержание углерода ($C_{\text{МАОМ}}$).

Биокинетическое фракционирование (БКФ). Исследование ПОВ методом БКФ проводили на тех же участках, для ПОВ которых было выполнено ГМФ. С этой целью свежесобранные образцы почвы в процессе их доведения до воздушно-сухого состояния на открытом воздухе подразделяли на крупные и мелкие мегаагрегаты (10–5 и 5–2 мм), макроагрегаты (2–0,25 мм), микроагрегаты (<0,25 мм) и цельную массу, просеивая через сито с диаметром отверстий 2 мм с удалением видимых фрагментов органических остатков. В стеклянные флаконы емкостью 100 мл брали навески воздушно-сухой почвы по 10 г и помещали на сутки в термостат с температурой 65 °С для выравнивания образцов по влажности. После доведения прогретых образцов до комнатной температуры, почву во флаконе смачивали дистиллированной водой до влажности 25 массовых %, а затем флаконы герметично закрывали силиконовыми пробками. Инкубацию почвенных образцов проводили в термостате при температуре 22 °С. Влажность почвы поддерживали постоянной на протяжении всего времени инкубации образцов путем периодического взвешивания и добавления дистиллированной воды. Продолжительность инкубации была соизмерима с вегетационным периодом и составляла как минимум 160–180 суток. Первое измерение концентрации C-CO_2 в газовой фазе инкубируемых образцов проводили через 3–4 часа после увлажнения, затем в течение двух месяцев – через один, два, три дня, а начиная с 3-го месяца – один раз в неделю. После каждого отбора газовых проб флаконы с инкубируемой почвой интенсивно проветривали. Анализ газовых проб осуществляли на газовом хроматографе Кристалл-4000 (Россия). По результатам анализа рассчитывали скорость выделения (мг С/100 г в сутки) и кумулятивные величины продуцирования C-CO_2 (мг С/100 г) на протяжении всего периода инкубации.

Скорость выделения C-CO_2 (мг С/100 г в сутки) за время экспозиции рассчитывали по формуле 1:

$$\text{C-CO}_2 = (\Delta\text{CO}_2 \times 12 \times V \times 60 \times 24) / 22,4 \times \Delta t \times m \quad (1),$$

где ΔCO_2 – прирост CO_2 , объемные %; 12 – атомная масса углерода; V – объем воздуха во флаконе над почвой, мл; 60 – пересчет на час; 24 – пересчет эмиссии на сутки; 22,4 – объем грамм-молекулы CO_2 , мл; Δt – время экспозиции, мин; m – навеска почвы, г.

Кумулятивную величину продуцирования C-CO_2 (мг С/100 г) устанавливали путем прибавления количества выделившегося углерода в каждый срок измерения к сумме за предыдущие сроки. При расчете содержания углерода потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0) кривая кумулятивного продуцирования C-CO_2 за весь период инкубации аппроксимировалась однокомпонентным уравнением кинетики первого порядка (формула 2).

$$C_t = C_0 \times (1 - \exp(-k \times t)) \quad (2),$$

где C_t – кумулятивное количество C-CO_2 (мг С/100 г почвы) за время t (сутки); C_0 – содержание потенциально минерализуемого углерода ПОВ (мг С/100 г почвы); k – константа скорости минерализации ПОВ (сутки⁻¹);

Величина C_0 характеризует содержание потенциально-минерализуемого углерода до начала инкубации и дает общее представление о минерализационной способности ПОВ. Еще одним количественным показателем биологической активности органического вещества является время оборачиваемости (TT) углерода активного пула, которое оценивают по константе скорости минерализации, k ($TT = 1/k$).

Денсиметрическое фракционирование (ДМФ). Разделение органического вещества почвы по плотности проводили с использованием смешанных образцов серой и агросерой почв, отобранных из слоев 0–5 и 5–10 см на участках с лесной и луговой растительностью и в агроценозе 2. Для проведения ДМФ использовали растворы поливольфрамата натрия (плотность жидкостей 1,6 и 2,0 г/см³) в соответствии с методикой (John et al., 2005). Этот способ разделения ПОВ позволяет выделить следующие 3 фракции: свободную (free Particular Organic Matter, fPOM), окклюдированную (occluded Particular Organic Matter, oPOM) и органо-минеральную (mineral-Soil Organic Matter, mineral-SOM). Свободная фракция с плотностью ниже 1,6 г/см³ представлена слабо разложившимися остатками растительного и животного происхождения и микробной биомассой со временем оборачиваемости от нескольких суток до нескольких недель и соответствует легкой фракции ПОВ (Light Fraction). Окклюдированная фракция с плотностью 1,6–2,0 г/см³ включает гумифицированные вещества и частично продукты неполного разложения, время оборачиваемости составляет от нескольких месяцев до десятков лет. Органо-минеральную фракцию, называемую также тяжелой фракцией (Heavy Fraction) образуют связанные с минеральными частицами органические вещества с плотностью выше 2,0 г/см³ и с временем оборачиваемости в сотни и тысячи лет.

Для проведения ДМФ навеску воздушно-сухой почвы (4 г) помещали в мерную пробирку на 50 мл, вносили раствор поливольфрамата натрия плотностью 1,6 г/см³ (до метки 20–22 мл), аккуратно перемешивали содержимое до равномерного увлажнения пробы и центрифугировали в течение 1 часа (5000 г). Сконцентрированное на поверхности надосадочной жидкости органическое вещество свободной фракции (fPOM) отбирали пипеткой и отмывали от остатков поливольфрамата натрия. Затем, из пробирки сливали раствор поливольфрамата натрия низкой плотности (1,6 г/см³) и вносили раствор поливольфрамата натрия плотностью 2,0 г/см³, добавляли стеклянные шарики (диаметр \approx 5 мм) для лучшего разрушения агрегатов и высвобождения окклюдированной фракции, и затем пробирку встряхивали на шейкере в течение 16 часов (60 оборотов в минуту). Образец повторно центрифугировали 1 час (5000 г), пипеткой отбирали органическое вещество окклюдированной фракции (oPOM) и отмывали от остатков поливольфрамата натрия. Остатки почвы в пробирке отмывали от тяжелой жидкости плотностью 2,0 г/см³ и затем высушивали, получая органическое вещество минеральной фракции (mineral-SOM). В полученных в результате фракционирования образцах определяли содержание углерода на CNHS-анализаторе Лесо-932 (США). Содержание $C_{\text{орг}}$ фракций выражали в г С/кг почвы.

Микробная биомасса ($C_{\text{мик}}$) Содержание $C_{\text{мик}}$ в почве определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) в модификации (Ананьева и др., 2011). Метод основан на измерении первоначального выделения CO_2 из почвы, обогащенной глюкозой. Предполагается, что при отсутствии прироста новой биомассы внесенная глюкоза используется только на дыхание почвенных микроорганизмов. Образец воздушно-сухой почвы, пропущенной через сито с диаметром отверстий 2 мм массой 1 г, помещали во флакон емкостью 15 мл, увлажняли дистиллированной водой до 60% наименьшей влагоемкости и прединкубировали в течение 7 суток при 22 °С. Затем к образцу почвы добавляли 0,2 мл 5%-го раствора глюкозы, инкубировали в течение 3–4 ч при 22 °С, после чего отбирали газовую пробу из флакона и измеряли концентрацию C-CO_2 на газовом хроматографе Кристалл Люкс 4000М. $C_{\text{мик}}$ (мкг С/г почвы) рассчитывали по скорости СИД (мкл C-CO_2 /г почвы / ч), используя формулу 3:

$$C_{\text{мик}} = \text{СИД} \times 40,04 + 0,37 \quad (3).$$

Содержание $C_{\text{мик}}$ определяли в цельных образцах почв, отобранных в слое 2–20 см, ежемесячно в течение всего вегетационного сезона под лесом, лугом и в агроценозе 1. В почвах, отобранных из слоя 0–10 см в серой (лес, луг) и агросерой (агроценоз 2) почвах, определение $C_{\text{мик}}$ проводили в различных агрегатных фракциях (крупные макроагрегаты >2 мм; средние макроагрегаты 2–0,25 мм и микроагрегаты <0,25 мм)

Статистическая обработка. В таблицах и на графиках приведены средние значения \pm стандартная ошибка (SE). Вычисление биокинетических параметров C_0 и k проводили по

известным значениям S_t и t методом нелинейной оценки в программе STATISTICA 6. Коэффициенты уравнений с уровнем значимости $p > 0,05$ отвергались.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структурные пулы углерода в почве. Методами гранулометрического и денсиметрического фракционирования выделяются структурные пулы ПОВ, к которым относят твердые органические частицы (РОМ) и органическое вещество, связанное почвенными минералами (МАОМ). Главной особенностью пула твердых органических частиц (Particulate Organic Matter, РОМ), к которому относят фракцию размером 2–0,05 мм, является его обогащенность органическим углеродом. В образцах РОМ, выделенных в почве под лесом, лугом и в агроценозе 1 содержалось в 2,3–2,6 раза больше углерода, чем во всей массе почвы (табл. 1). Как следствие, отношение C/N в пуле РОМ, было шире, чем в цельной почве, что указывает на наличие в пуле твердых органических частиц фрагментов свежих растительных остатков. Система землепользования в значительной мере влияет на массу фракции РОМ. Так, в пахотной почве масса РОМ была в 1,8 и 2,6 раза меньше, чем под старосеянным лугом и вторичным лесом, соответственно. Если в почве под лесом на долю $S_{РОМ}$ приходилось 36% от ПОВ, то под лугом – 27%, а в пахотной почве – только 16% (см. табл. 1). Таким образом, пул твердых органических частиц является чувствительным индикатором количественных и качественных изменений в ПОВ, обусловленных видом землепользования, который в свою очередь определяет состав и свойства поступающих в почву растительных остатков.

Таблица 1

Размеры пула твердых органических частиц (РОМ) в серой и агросерой почвах разных видов землепользования

Вид землепользования	Масса РОМ, % от массы почвы	$S_{РОМ}$, % от массы фракции	$S_{РОМ}/N_{РОМ}$	$S_{РОМ}/C_{орг}$	$S_{РОМ}$, г/100 г почвы	$S_{РОМ}$, % от $C_{орг}$ почвы
Вторичный лес	15,6 ± 0,4	4,33 ± 0,10	13,6	2,3	0,68	36,0
Луговой ценоз	11,3 ± 1,2	3,80 ± 0,14	13,6	2,4	0,43	27,3
Агроценоз 1	6,0 ± 0,6	3,79 ± 0,28	13,2	2,6	0,23	15,9

Фракция РОМ представляет собой не гомогенную массу однородного вещества, а включает в себя твердые дискретные частицы разного размера и качества. Нами были выделены три субфракции РОМ: грубая (2–1 мм), средняя (1–0,25 мм) и тонкая (0,25–0,05 мм). В исследуемых почвах преобладала тонкая субфракция РОМ, при этом доля тонкого РОМ увеличивалась в ряду лес–луг–пашня, а доли среднего и грубого РОМ, наоборот, уменьшались (табл. 2). Грубому РОМ свойственно более высокое содержание $C_{орг}$ и более широкое отношение C/N, чем среднему и тонкому по размеру РОМ.

Таблица 2

Распределение органического углерода между крупной 2–1 мм, средней 1–0,25 мм и тонкой 0,25–0,05 мм субфракциями (СФ) пула твердых органических частиц (РОМ)

Тип землепользования	Размер СФ, мм	Доля СФ, % от массы РОМ	Содержание $C_{орг}$ в СФ, % от массы СФ	Отношение C/N	Доля углерода СФ, % от $S_{РОМ}$
Лес	2–1	13	7,99	20,5	16,8
	1–0,25	25	6,32	16,7	26,3
	0,25–0,05	62	5,42	15,7	56,8
Луг	2–1	11	6,31	18,4	15,7
	1–0,25	21	5,68	17,2	27,0
	0,25–0,05	68	3,71	12,6	57,4
Пашня	2–1	2	16,91	29,3	9,3
	1–0,25	11	7,39	17,2	21,4
	0,25–0,05	87	3,19	13,0	71,4

Различия между субфракциями РОМ по массе были более рельефными, чем по содержанию в них углерода, поэтому самая большая по массе тонкая субфракция содержала от 57 до 71% от всего $S_{РОМ}$ в почве, возрастая в ряду: лес < луг < пашня. Вклад средней и грубой субфракций в $S_{РОМ}$ почвы составлял 21–27 и 9–17% и изменялся в обратном порядке, уменьшаясь в ряду: лес ≥

луг > пашня. При разделении POM на две субфракции (2–0,25 и 0,25–0,053 мм), как это предложено в работе (Six et al., 2000), соотношение тонкой субфракции к грубой по массе составляло 1,6, 2,1 и 6,7 для лесной, луговой и пахотной почвы, соответственно. Полученные нами данные указывают, что грубая фракция POM представлена еще не фрагментированными или частично фрагментированными растительными остатками, а тонкая – разложившимися до отдельных частиц.

Денсиметрическое фракционирование ОВ в рамках нашего исследования было проведено только в верхних слоях изученных почв (0–5 и 5–10 см), в которых содержание $C_{\text{орг}}$ было обычно выше 1,3–1,5%. Пулы органического вещества почв плотностью ниже 2,0 г/см³, представляют собой углерод свободной ($\rho < 1,6$ г/см³) и окклюзированной фракций ($1,6 < \rho < 2,0$ г/см³). Эти пулы состоят из макроорганических веществ растительного и животного происхождения и древесного угля (Christensen, 1992). Фракция ПОВ с плотностью выше 2,0 г/см³ включает в себя органо-глинистые комплексы и минеральные зерна, покрытые органическим веществом (Christensen, 1992), и представляет собой стабильное почвенное органическое вещество с низкой скоростью минерализации и значительным по длительности периодом оборачиваемости (von Lützw et al., 2008).

Содержание $C_{\text{орг}}$ свободной фракции (fPOM) с учетом ее массы в слое 0–5 см в серой лесной почве под лугом (рис. 3) было примерно в 1,5 раз выше по сравнению с почвой агроценоза 2, в то время как в почве под лесом содержание $C_{\text{орг}}$ во фракции fPOM превышало таковое в пахотной почве более, чем в 2 раза.

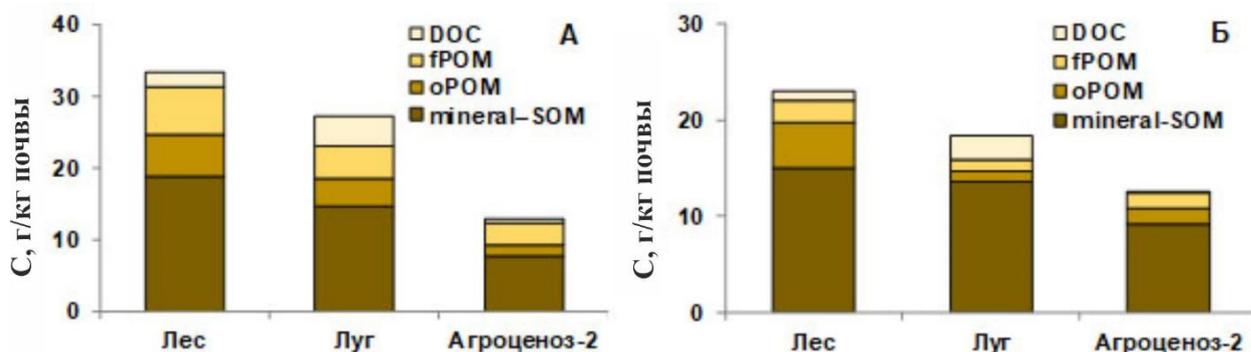


Рисунок 3. Содержание углерода различных фракций в общем пуле $C_{\text{орг}}$ в слоях 0–5 (А) и 5–10 см (Б) серой и агросерой почв при разных видах землепользования. DOC – растворенный углерод, fPOM – углерод свободной фракции ($< 1,6$ г/см³); oPOM – углерод окклюзированной фракции ($1,6–2,0$ г/см³); mineral-SOM – углерод минеральной фракции ($> 2,0$ г/см³).

Содержание $C_{\text{орг}}$ окклюзированной фракции (oPOM) с учетом ее массы в слое 0–5 см серой лесной почвы естественных ценозов превышало таковое на пашне в 1,5–3,8 раза, составляя 1,6 г C/kg на пашне против 3,9–5,9 г C/kg в почвах лугового и лесного ценозов. Содержание углерода фракции плотностью $> 2,0$ г/см³ (mineral-SOM) самым высоким было в лесной почве (18,8 г C/kg), чуть ниже в почве под лугом (14,6 г C/kg) и в почве агроценоза 2 составляло 7,7 г C/kg. Выявленные различия в распределении ПОВ по денсиметрическим фракциям в самом верхнем слое серой лесной почвы обусловлены в первую очередь разным количеством и качеством поступающего в почву растительного материала. В почвах леса масса поступающего листового опада выше, чем в луговом ценозе, а в почве пашни свежий растительный материал поступает в почву в незначительном количестве, поскольку изымается с урожаем (Kurganova et al., 2007). Микробная и ферментативная активность пахотных почв также существенно снижена по сравнению с почвами естественных ценозов (Kurganova et al., 2018, 2021; Ovsepyan et al., 2019, 2020). Для слоя 5–10 см общие закономерности в распределении ПОВ по денсиметрическим фракциям в целом сохраняются, но различия выражены менее рельефно (см. рис. 3), поскольку поступление в этот слой свежего органического материала происходит в существенно меньшем количестве. Активность микробного сообщества в этом слое также более низкая, что приводит к замедлению процессов минерализации органических субстратов.

Процессные пулы углерода в почве. Запасы органического углерода в почве являются ключевым индикатором деградационно-проградационных изменений качества и экологии почвы,

ее способности быть источником и стоком климатически активных газов (Пулы и потоки ..., 2007; Семенов, Когут, 2015). Однако вариабельность значений $C_{орг}$, получаемых большинством аналитических методов, зачастую выше статистически достоверных различий. Кроме того, значимому разложению и минерализации подвергается только некоторая часть почвенного органического вещества, слагающая его активный пул. Поэтому более точным предиктором секвестрирующей емкости и эмиссионного потенциала почвы следует считать запасы не валового органического углерода, а только его активного (потенциально-минерализуемого) пула. Потенциально-минерализуемое органическое вещество относится к группе процессных пулов ПОВ, в которых осуществляется синтез, деструкция и трансформация органических веществ и соединений. Потенциально-минерализуемое органическое вещество, или, по-другому, биологически активное органическое вещество, ответственно за многие био-физико-химические процессы в почве, включая эмиссию климатически активных газов (Семенов и др., 2018). Применимость биокинетического метода базируется на следующих положениях (Семенов и др., 2006). Во-первых, все органические вещества потенциально способны разлагаться микроорганизмами, но с разной скоростью. Поэтому, чтобы учесть участие в обороте как быстроразлагаемых соединений, так и медленно разлагаемых, требуется продолжительная инкубация почвенных образцов с количественным измерением $C-CO_2$. Во-вторых, скорость выделения $C-CO_2$ одновременно характеризует и минерализующую активность микроорганизмов, и минерализационную способность самого органического субстрата. В-третьих, в биокинетическом способе агентом фракционирования ПОВ выступают аборигенные микроорганизмы, почва инкубируется при стабильной температуре и влажности, исключаются стрессовые воздействия, способные видоизменить доступность соединений микроорганизмам или активность самих микроорганизмов. В-четвертых, при определении минерализационного потенциала почв или органических материалов, находящихся в естественном состоянии увлажнения, существует вероятность недоучета быстро оборачиваемых соединений с продолжительностью существования в течение нескольких часов и суток, которые быстро и непрерывно утилизируются микроорганизмами. Поэтому при лабораторной диагностике биологического качества органического вещества первоначально нужно приостановить микробную деятельность, прогрев образцы при температуре, вызывающей лишь обезвоживание, но не гибель микробных клеток, после чего увлажнить их до оптимальной влажности и начинать инкубацию, измеряя поток $C-CO_2$.

Способность органического вещества минерализоваться микроорганизмами хорошо иллюстрируется тремя показателями: содержанием потенциально-минерализуемого органического вещества ($mg\ C_0/100\ г$), его долей в общем содержании ПОВ ($C_0, \% \text{ от } C_{орг}$) и константой скорости минерализации ($k, \text{сут}^{-1}$).

Среди исследуемых экосистем максимальное содержание потенциально-минерализуемого органического вещества свойственно серой лесной почве под вторичным лесом, а минимальное – длительно обрабатываемой почве агроценоза (табл. 3).

Таблица 3

Влияние землепользования на размеры потенциально-минерализуемого пула почвенного углерода, скорость его минерализации и время оборачиваемости

Вид землепользования	Содержание потенциально-минерализуемого ОВ				Константа скорости минерализации, $k\ \text{сут}^{-1}$		Время оборачиваемости (TT), сут	
	6 мес.		12 мес.		6 мес.	12 мес.	6 мес.	12 мес.
	$mg/100\ г$	$\% \text{ от } C_{орг}$	$mg/100\ г$	$\% \text{ от } C_{орг}$				
Лесной ценоз	128	6,8	169	9,0	0,029	0,013	34,5	76,9
Луговой ценоз	112	7,1	154	9,8	0,023	0,011	43,5	90,9
Агроценоз 1	77	5,4	107	7,4	0,016	0,008	62,5	125

За полгода наблюдений минерализовалось две трети углерода, учтенного за год. Это обусловлено разнокачественностью ПОВ и указывает на преимущественное разложение и минерализацию менее защищенных и наиболее доступных микроорганизмам соединений. Судя по доле потенциально-минерализуемого углерода от валового его содержания и константам скорости минерализации, органическое вещество в почве под лесом и лугом более подвержено минерализации, чем в старопахотной почве.

На примере почв под лесом и в агроценозе 1 было проведено биокинетическое фракционирование различных структурно-агрегатных фракций, включающих крупные и мелкие мегаагрегаты, макроагрегаты и микроагрегаты. Наши исследования показали, что низкое содержание C_0 свойственно крупным мегаагрегатам (10–5 мм) и микроагрегатам (<0,25 мм), а высокое – мелким мегаагрегатам (5–2 мм) и макроагрегатам (2–0,25 мм) (табл. 4). По фактическим запасам C_0 агрегаты разных размеров с учетом их массы образовывали следующие последовательности: 5–2 > 2–0,25 > 10–5 > меньше 0,25 мм – в почве под лесом и 2–0,25 > 5–2 > 10–5 > меньше 0,25 мм – в пахотной почве. В целом, с учетом массы структурно-агрегатных отдельностей, основным резервуаром C_0 в лесной почве являются мегаагрегаты и в меньшей мере макроагрегаты, составляя в сумме 62 и 31% от C_0 в цельном образце, соответственно. В пахотной почве вклад этих классов агрегатов примерно одинаковый: 40 и 44% от C_0 в цельном образце. При одинаковых условиях температуры и влажности, поддерживаемых в инкубационном эксперименте, органическое вещество разных по размеру агрегатов, мало отличается по минерализационной способности и зависит в большей мере от вида землепользования (см. табл. 4).

Таблица 4

Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0) в почвенных агрегатах разного размера

Тип землепользования	Размер агрегатов, мм	Содержание C_0 , мг/100 г агрегатов	Содержание C_0 , % от $C_{орг}$ в агрегатах	Доля C_0 в агрегатах, % от C_0 в целом образце почвы
Лесной ценоз	10–5	115 ± 13	6,4	17
	5–2	142 ± 1	7,0	45
	2–0,25	153 ± 2	7,3	31
	<0,25	118 ± 1	6,3	12
Агроценоз 1	10–5	60 ± 1	4,5	15
	5–2	75 ± 7	5,1	25
	2–0,25	81 ± 2	5,2	44
	<0,25	64 ± 0	4,5	11

Следовательно, различия между мега-, макро- и микро- агрегатами по содержанию C_0 определяются в первую очередь количеством поступающего в агрегаты свежего органического вещества и долей агрегатов в массе почвы. Это предположение хорошо подтверждается корреляцией C_0 с содержанием $C_{орг}$ ($r = 0,996$, $p < 0,001$) и $C_{РОМ}$ ($r = 0,654$, $p = 0,040$). Изменение доли РОМ, вызванное образованием из разлагающихся растительных остатков, может быть причиной вариабельности содержания $C_{орг}$ и C_0 в разных по размеру агрегатах почвы. Таким образом, разложение растительных остатков является одновременно фактором образования почвенных агрегатов и формирования пулов внутри- и межагрегатного органического вещества.

Микробный пул углерода представляет группу процессных пулов ПОВ. Преобразование растительных остатков микроорганизмами в РОМ и микробной некромы в МАОМ, называемый «микробным насосом», обеспечивает непрерывную трансформацию органического вещества в почве (Liang, 2020; Никитин и др., 2022). Содержание углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) и отношение $C_{мик}/C_{орг}$ являются предикторами ранних изменений качества ПОВ (Sparling, 1992). Согласно нашим данным в гумусовом горизонте (2–20 см) серой лесной почвы под лесом содержалось в 1,5 и 2,4 раз больше микробной биомассы, чем под лугом и пашней, соответственно (табл. 5).

В почве естественных ценозов отчетливо проявляется летний пик содержания $C_{мик}$, обусловленный, по-видимому, максимальным поступлением в почву растительных экссудатов и прогреванием почвы. В пахотной удобренной почве агроценоза 1 из-за низкой продуктивности сельскохозяйственных культур летний прирост $C_{мик}$ был незначителен. Динамика содержания $C_{мик}$ в почве в разных землепользований тесно коррелировала с содержанием общего $C_{орг}$ ($r = 0,959$, $p < 0,001$), указывая, с одной стороны, на участие почвенных микроорганизмов в трансформации органического углерода, и с другой стороны, на значимость углерода для микроорганизмов как источника питания и энергии. Если в почве под лесом микробный пул углерода составлял в среднем 8,5% от $C_{орг}$, то в пахотной почве всего 1,3%.

Таблица 5

Влияние вида землепользования на размеры микробного пула почвенного углерода в серой и агросерой почвах разного землепользования

Срок отбора	С _{мик} , мг/100 г почвы			С _{мик} , % от С _{орг}		
	Лесной ценоз	Луговой ценоз	Агроценоз 1	Лесной ценоз	Луговой ценоз	Агроценоз 1
22.IV	129	79	11	6,1	4,9	1,0
3.VI	147	111	17	7,2	6,9	1,5
22.VII	212	100	14	10,1	6,1	1,2
2.IX	207	107	14	9,8	6,8	1,3
11.X	195	104	13	9,2	6,5	1,2
<i>Среднее</i>	<i>178</i>	<i>100</i>	<i>14</i>	<i>8,5</i>	<i>6,2</i>	<i>1,3</i>

Размер агрегатов почвы оказывает значительное влияние на величину микробной биомассы, структуру микробных сообществ и дыхание почвы (Gupta, Germida, 2015; Yang et al., 2019). Считается, что самые высокие значения С_{мик} характерны для агрегатов размером 1–2 мм (Jiang et al., 2011). В слое 0–10 см пахотной почвы (агроценоз 2) содержание С_{мик} практически одинаково во всех агрегатных фракциях и составляет 40–49 мг С/100 г почвы. В почвах лесного и лугового ценозов содержание С_{мик} самое низкое в микроагрегатах (рис. 4). С учетом распределения агрегатных фракций, доля микроагрегатов в формировании общего пула С_{мик} в почвах лесного и лугового ценоза минимальна и составляет 12–17%, в то время как доля крупных и средних макроагрегатов примерно одинакова (41–47%). В почве агроценоза 2 половина общего пула С_{мик} содержится в средних макроагрегатах, а другая половина практически поровну распределена между микроагрегатами (26%) и микроагрегатами (24%).

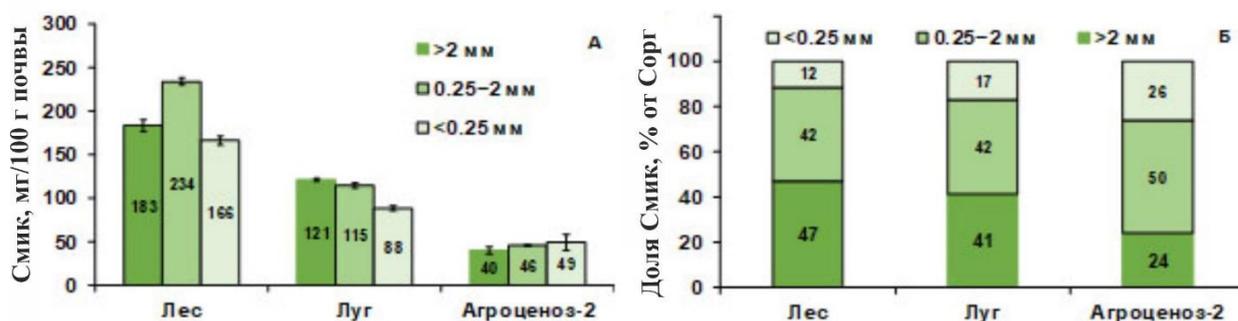


Рисунок 4. Содержание углерода микробной биомассы в различных агрегатных фракциях (А) и доля агрегатных фракций (Б) в формировании общего пула С_{мик} в слое 0–10 см серой и агросерой почв при разных видах землепользования.

Таким образом, микробная биомасса представляет собой динамичный пул органического углерода в почве, характеризую степень биологической активности почвенного органического вещества. Различные агрегатные фракции в зависимости от вида землепользования вносят разный вклад в формирование общего пула С_{мик}. Пахотная почва отличается низким содержанием С_{мик}, она обеднена также и органическим веществом, которое представлено преимущественно биологически стабильными компонентами. Рекарбонизация пахотных почв путем залужения или залесения приведет к реальной секвестрации углерода с накоплением его в биологически активной форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение органического углерода по различным пулам и фракциям почвенного органического вещества, определяемым с помощью методов гранулометрического, денсиметрического и биокинетического фракционирования, позволяет получить важную информацию о механизмах секвестрации и депонирования углерода в почвах. Соотношение различных пулов в составе почвенного органического вещества зависит от типа землепользования и претерпевает направленные изменения в ходе постагрогенного развития. Выделение структурных и процессных пулов, определение их размеров и соотношений следует считать

обязательным этапом в программах мониторинга качества и функций почвенного органического вещества и потоков углерода в наземных экосистемах

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке ВИП ГЗ НОЦ 4 «Углерод в экосистемах: Мониторинг».

ЛИТЕРАТУРА

- Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушино: ОНТИ, 1995. 320 с.
- Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333. <https://doi.org/10.1134/S1064229311030021>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>.
- Курганова И.Н., Семенов В.М., Кудяров В.Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 489. № 6. С. 646–650. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896646-650>.
- Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020095>.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский и др.; отв. ред. Г.А. Заварзин. Москва: Наука, 2007. 315 с.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В. Структурно–функциональное состояние органического вещества почвы // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Москва: Наука, 2006. С. 230–247.
- Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X>.
- Yang C., Liu N., Zhang Y. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration // Geoderma. 2019. Vol. 337. P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>
- Baveye P.C., Schnee L.S., Boivin P., Laba M., Radulovich R. Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions // Frontiers in Environmental Science. 2020. Vol. 8. Art. No. 579904. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>
- Cambardella C.A., Elliott E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // Soil Science Society of America Journal. 1992. Vol. 56. No. 3. P. 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Christensen B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // Advances Soil Science. 1992. Vol. 20. P. 1–90. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // Global Change Biology. 2013. Vol. 19. No. 4. P. 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Gupta V.V.S.R., Germida J.J. Soil aggregation: influence on microbial biomass and implications for biological processes // Soil Biology and Biochemistry. 2015. Vol. 80. P. A3–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Hoffland E., Kuypers T.W., Comans R.N.J., Creamer R.E. Eco-functionality of organic matter in soils // Plant and Soil. 2020. Vol. 455. P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Janzen H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38 (3). P. 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.008>
- Jiang X., Wright A.L., Wang J., Li Z. Long-term tillage effects on the distribution patterns of microbial biomass and activities within soil aggregates // Catena. 2011. Vol. 87 (2). P. 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.011>

- John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma*. 2005. Vol. 128 (1–2). P. 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>
- Kurganova I., Yermolaev A., Lopes de Gerenyu V., Larionova A., Kuzyakov Y., Keller T., and Lange S. Carbon balance in soils of abandoned lands in Moscow region // *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40 (1). P. 51–58. <https://doi.org/10.1134/S1064229307010085>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. Effect of Reforestation on Microbial Activity in Postagrogenic Soils in European Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11. P. 704–718. <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
- Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J. Research and Development Priorities Towards Recarbonization of the Biosphere. In book: *Recarbonization of the Biosphere*. Lal R., Lorenz K., Hüttl R., Schneider B., von Braun J. (eds). Springer: Dordrecht, 2012. P. 533–544. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4159-1_25
- Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26 (1). P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Liang C. Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal // *Soil Ecology Letters*. 2020. Vol. 2 (4). P. 241–254. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4>
- Lozano-García B., Francaviglia R., Renzi G., Doro L., Ledda L., Benítez C., González-Rosado M., Parras-Alcántara L. Land use change effects on soil organic carbon store. An opportunity to soils regeneration in Mediterranean areas: Implications in the 4p1000 notion // *Ecology Indicators*. 2020. Vol. 119. Art. No 106831. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106831>
- Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Ya. Recovery of organic matter and microbial biomass after abandonment of degraded agricultural soils: the influence of climate // *Land Degradation and Development*. 2019. Vol. 30 (15). P. 1861–1874. <https://doi.org/10.1002/ldr.3387>
- Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Ya. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 743. 140829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140829>
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture // *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32 (14). P. 2099–2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Sparling G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter // *Australian Journal of Soil Research*. 1992. Vol. 30 (2). P. 195–207. <https://doi.org/10.1071/SR9920195>
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford, J.W. Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Courcelles V.R., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2008. Vol. 171 (1). P. 111–124. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700047>

Поступила в редакцию 20.01.2023

Принята 06.02.2023

Опубликована 08.02.2023

Сведения об авторах:

Семенов Вячеслав Михайлович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН –

обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); v.m.semenov@mail.ru

Лебедева Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); tanyaniko@mail.ru

Лопес де Гереню Валентин Овидиович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); vlopes@mail.ru

Овсепян Лилит Арменовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); lill.ovsepyan@gmail.com

Семенов Михаил Вячеславович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева» (Москва, Россия); mikhail.v.semenov@gmail.com

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

POOLS AND FRACTIONS OF ORGANIC CARBON IN SOIL: STRUCTURE, FUNCTIONS AND METHODS OF DETERMINATION

© 2023 V. M. Semenov ¹, T. N. Lebedeva ¹, V. O. Lopes de Gerenyu ¹, L. A. Ovsepyan ¹,
M. V. Semenov ², I. N. Kurganova ¹

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia. E-mail: ikurg@mail.ru*

²*Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The separation of soil organic matter (SOM) into pools and fractions allows to understand the nature and functions of SOM as well as to characterize its quality, composition and properties. The study presents an analysis of approaches, methods and results of determining various pools and fractions of SOM using the gray and agrogray soils (Haplic Luvisol) under contrasting types of land use (Moscow region, Russia). Conservative properties and storage functions of SOM were proposed to be estimated by its granulometric and densimetric pools, and dynamic properties and emission functions were proposed to be estimated by microbial and potentially mineralizable pools. It was shown that the ratio of different pools in the SOM composition depends on the type of land use and it is controlled by the composition and amount of plant materials entering into soil. The microbial biomass is a dynamic pool of organic carbon in the soil and determines the degree of biological activity of soil organic matter. Different aggregate fractions make different contributions to the formation of the total C_{mic} pool depending on the type of land use. The arable soil is characterized by a low content of C_{mic}; the soil is also depleted in organic matter, which is represented mainly by biologically stable components. The recarbonization of arable soils by grassing or reforestation will lead to real carbon sequestration with its accumulation in a biologically active form. We conclude that the separation of structural and process pools, the determination of their sizes and ratios should be considered an essential component of the programs for monitoring the quality and functions of SOM and carbon sequestration processes.

Key words: soil organic matter; density fractionation; particulate organic matter; mineral-associated organic matter; potentially mineralizable organic matter; microbial biomass

How to cite: *Semenov V.M., Lebedeva T.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N. Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(1). e199. DOI: 10.31251/pos.v6i1.199. (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

- Alifanov V.M. Paleocryogenesis and modern soil formation. Pushchino: ONTI, 1995. 320 p. (in Russian).
- Ananyeva N. D., Susyan E. A., Gavrilenko E. G. Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No. 11. P. 1215–1221. <https://doi.org/10.1134/S1064229311030021>.
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation. *The Journal of Soils and Environment*. 2022. Vol. 5 (2). e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>. (in Russian).
- Kurganova I.N., Semenov V.M., Kudryarov V N. Climate and Land Use as Key Factors of the Stability of Organic Matter in Soils. *Doklady Biological Sciences*. 2019. Vol. 489. No. 1. P. 189–192. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896646-650>.
- Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological indicators of soil ecological functions: a review. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 2. P. 221–234. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020090>.
- Pools and carbon fluxes in terrestrial ecosystems in Russia / V.N. Kudryarov, G.A. Zavarzin, S.A. Blagodatskiy et al.; G.A. Zavarzin (ed.). Moscow: Nauka, 2007. 315 p. (in Russian).
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V. Structural-functional status of soil organic matter. In book: *Soil Processes and Spatiotemporal Organization of Soils*. Moscow: Nauka, 2006. P. 230–247. (in Russian).
- Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moscow: GEOS, 233 p. (in Russian).
- Semenov V.M., Zinyakova N.B., Lebedeva T.N., Tulina A.S. Kogut B.M., Masyutenko N.P., Malyukova L.S. Biologically Active Organic Matter in Soils of European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 4. P. 434–447. <https://doi.org/10.1134/S1064229318040117>.
- Yang C., Liu N., Zhang Y. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. *Geoderma*. 2019. Vol. 337. P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>
- Baveye P.C., Schnee L.S., Boivin P., Laba M., Radulovich R. Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. Art. No. 579904. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>
- Cambardella C.A., Elliott E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*. 1992. Vol. 56. No. 3. P. 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Christensen B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances Soil Science*. 1992. Vol. 20. P. 1–90. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*. 2013. Vol. 19. No. 4. P. 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Gupta V.V.S.R., Germida J.J. Soil aggregation: influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 80. P. A3–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Hoffland E., Kuyper T.W., Comans R.N.J., Creamer R.E. Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant and Soil*. 2020. Vol. 455. P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Janzen H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. Vol. 38 (3). P. 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.008>
- Jiang X., Wright A.L., Wang J., Li Z. Long-term tillage effects on the distribution patterns of microbial biomass and activities within soil aggregates. *Catena*. 2011. Vol. 87 (2). P. 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.011>
- John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*. 2005. Vol. 128 (1–2). P. 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>

- Kurganova I., Yermolaev A., Lopes de Gerenyu V., Larionova A., Kuzyakov Y., Keller T., and Lange S. Carbon balance in soils of abandoned lands in Moscow region. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40 (1). P. 51–58. <https://doi.org/10.1134/S1064229307010085>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. Effect of Reforestation on Microbial Activity in Postagrogenic Soils in European Russia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11. P. 704–718. <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
- Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J. Research and Development Priorities Towards Recarbonization of the Biosphere. In book: *Recarbonization of the Biosphere*. Lal R., Lorenz K., Hüttl R., Schneider B., von Braun J. (eds). Springer: Dordrecht, 2012. P. 533–544. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4159-1_25
- Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26 (1). P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Liang C. Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal. *Soil Ecology Letters*. 2020. Vol. 2 (4). P. 241–254. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4>
- Lozano-García B., Francaviglia R., Renzi G., Doro L., Ledda L., Benítez C., González-Rosado M., Parras-Alcántara L. Land use change effects on soil organic carbon store. An opportunity to soils regeneration in Mediterranean areas: Implications in the 4p1000 notion. *Ecology Indicators*. 2020. Vol. 119. Art. No 106831. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106831>
- Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Ya. Recovery of organic matter and microbial biomass after abandonment of degraded agricultural soils: the influence of climate. *Land Degradation and Development*. 2019. Vol. 30 (15). P. 1861–1874. <https://doi.org/10.1002/ldr.3387>
- Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Ya. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 743. 140829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140829>
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32 (14). P. 2099–2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Sparling G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*. 1992. Vol. 30 (2). P. 195–207. <https://doi.org/10.1071/SR9920195>
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford, J.W. Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Courcelles V.R., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2008. Vol. 171 (1). P. 111–124. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700047>

Received 20 January 2023

Accepted 06 February 2023

Published 08 February 2023

About the authors:

Semenov Vyacheslav Mikhailovich – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); v.m.semenov@mail.ru

Lebedeva Tat'yana Nikolaevna – Candidate of Biological Sciences, Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); tanyaniko@mail.ru

Lopes de Gerenuy Valentin Ovidovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); vlopes@mail.ru

Ovsepyan Lilit Armenovna – Candidate of Biological Sciences, Principal Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); lill.ovsepyan@gmail.com

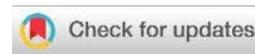
Semenov Mikhail Vyacheslavovich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of Laboratory of Soil Carbon and Microbial Ecology, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); mikhail.v.semenov@gmail.com

Kurganova Irina Nikolaevna – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ВОПРОСЫ ВАЛИДАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ НАЗЕМНО-БОРТОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

© 2023 Г. Р. Бабаева , Р. М. Рагимов 

Национальное аэрокосмическое агентство, ул. С.С. Ахундова, стр. 1, г. Баку, AZ1115, Азербайджанская Республика. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

Контактные точечные полевые измерения почвенной влажности отличаются невысокой производительностью; их реальной альтернативой, обеспечивающей высокую эффективность мониторинга, являются дистанционные методы определения. Известные микроволновые методы дистанционного определения влажности почвы имеют низкое пространственное разрешение, являются дорогостоящими и непригодными для использования в целях сельского хозяйства. В статье для определения влажности почвы предлагается наземно-бортовой комплекс, включающий в себя бортовой пассивный измеритель отраженного от почвы оптического сигнала и наземный контактный измеритель, функцию которого может выполнять либо автоматическая измерительная сеть, либо оператор, проводящий контактные измерения. Авторами сформулирована и решена задача оценки точности валидации результатов бортового измерения влажности почвы в системе наземно-бортовых измерений. В качестве бортового измерителя используется спектрометр пассивного излучения почвы, освещенной Солнцем, а в качестве наземного – контактный измеритель, с помощью которого оценивается влажность почвы при разных пространственных шагах. Проанализированы валидационные показатели наземных измерений и их взаимосвязь с величиной влажности почвы. Сопоставление результатов наземных и бортовых измерений позволило определить взаимосвязь между влажностью почвы, измеренной с борта, и погрешностью наземных измерений в виде погрешности валидации.

Ключевые слова: почва; влажность; наземно-бортовые измерения; спектрометр; валидация

Цитирование: Бабаева Г.Р., Рагимов Р.М. Вопросы валидации результатов при наземно-бортовом спектральном определении влажности почвы // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. e202. DOI: [10.31251/pos.v6i1.202](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.202).

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что влажность почвы является важным фактором, стимулирующим высокую продуктивность растениеводства. Это обуславливает необходимость принятия технических мер по повышению достоверности методов, применяемых для измерения почвенной влажности. Такие измерения традиционно проводились в полевых условиях, используя различные контактные методы, к которым, в первую очередь, следует отнести гравиметрические, рефлектометрические и радиочастотные (емкостные) методы. Вместе с тем, контактные точечные полевые измерения отличаются невысокой производительностью. Реальной альтернативой, обеспечивающей высокую эффективность мониторинга, являются дистанционные методы определения влажности почвы. Известные микроволновые методы дистанционного определения влажности имеют низкое пространственное разрешение и являются дорогостоящими и непригодными для использования в целях сельского хозяйства. Как было показано в ряде работ (Heathman et al., 2012; Merlin, Jacob et al., 2012; Merlin, Rudiger et al., 2012), в среднем инфракрасном диапазоне, в пределах 1,5÷2,5 мкм, могут быть проведены достаточно информативные дистанционные измерения влажности почвы. Однако, по трудозатратам такие измерения уступают методам зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В диапазоне электромагнитных волн 950 нм происходит их поглощение влагой, имеющейся в почве, что позволяет проводить дистанционное зондирование для определения влажности почвы. В целом, понятие «дистанционное зондирование» включает комплекс мер, предназначенных для получения достоверных оценок какого-либо физического процесса или параметра, находящегося вне досягаемости измерителя. К таким мерам относятся (Jackson et al., 2018; Das et al., 2019):

- ✓ Правильный выбор зондирующего сигнала. Для электромагнитного сигнала это означает выбор длины волны, мощности, длительности импульса и др.;
- ✓ Проведение калибровочных и валидационных измерений;
- ✓ Разработка алгоритма дешифровки результата зондирования и его сопоставления с результатом валидационных измерений.

Используемый для определения влажности почвы наземно-бортовой комплекс включает в себя бортовой пассивный измеритель отраженного от почвы оптического сигнала и наземный контактный измеритель, функцию которого может выполнять либо автоматическая измерительная сеть, либо оператор, проводящий контактные измерения. Общая схема наземно-бортовых измерений влажности почвы приведена на рисунке 1.

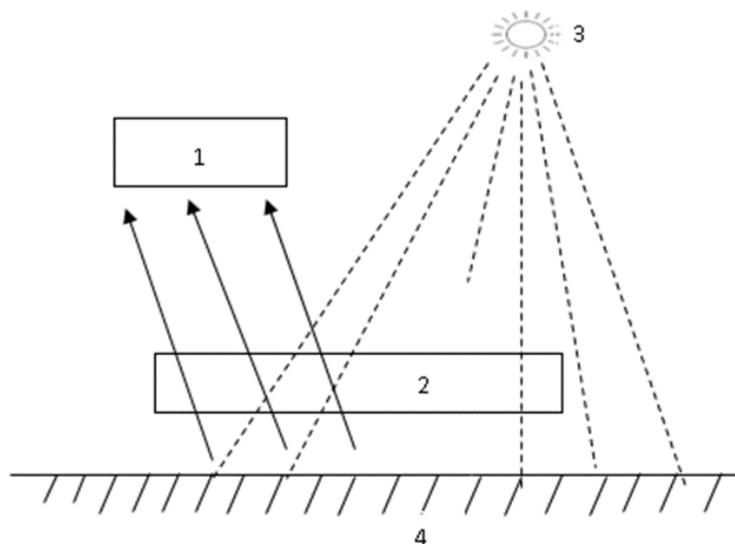


Рисунок 1. Общая схема проведения наземно-бортовых измерений влажности почвы. Цифрами обозначены: 1 – бортовой измеритель; 2 – наземный измеритель; 3 – внешний излучатель (Солнце); 4 – Земля.

Главной функцией спектрометрического устройства, установленного на борту носителя (1), является максимально информативное использование формируемого спектра отражения для дистанционной оценки содержания влаги в почве. Так, например, согласно Е. Muller, Н. Decamps (2001), существует следующая экспоненциальная зависимость между сигналом отражения от влажной почвы и количеством влаги в почве:

$$\rho(\lambda) = \rho_0(\lambda) \exp(a_\lambda \cdot M), \quad (1)$$

где $\rho(\lambda)$ – отраженный сигнал от почвы с длиной волны λ ; $\rho_0(\lambda)$ – отраженный сигнал от почвы при сухой погоде; a_λ – коэффициент ослабления почвой сигнала отражения из-за наличия в почве влаги; M – объемное содержание влаги в почве.

Из выражения (1) получим:

$$M = \frac{1}{a_\lambda} \ln\left(\frac{\rho(\lambda)}{\rho_0(\lambda)}\right) \quad (2)$$

Как отмечается в работе А.-К. Ahlmer et al. (2018), влажность почвы изменяется как по вертикали, так и по горизонтали, а, следовательно, изменяется по объему самой почвы. Все это влияет на выбор метода измерения. Некоторые методы дистанционного зондирования позволяют определить влажность только поверхностного слоя почвы, а в качестве меры влагосодержания используется отношение объема влаги к объему почвы. Методы дистанционного зондирования выгодны тем, что позволяют охватить большие участки исследуемой территории. Вместе с тем, относительно низкое пространственное и временное разрешение, а также возможность блокирования сигнала облачным покрытием, ограничивают сферу применения методов дистанционного зондирования в гидрологических целях. Важнейшим показателем при проведении гидрологических измерений методами дистанционного зондирования является вопрос о достоверности полученных результатов. Следовательно, возникает следующий вопрос: при какой величине влажности почвы результаты дистанционного зондирования оказываются наиболее достоверными? Для решения данного вопроса нами предлагается метод сопоставления результатов наземных и бортовых измерений.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

В качестве данных наземных экспериментальных измерений воспользуемся данными, изложенными в работе J.S. Famiglietti et al. (2008), где результаты наземных измерений влажности почвы представлены в виде коэффициента вариации, определяемого как

$$CV = \frac{\sigma}{M} \quad (3)$$

где CV – коэффициент вариации; σ – среднее квадратическое отклонение; M – влажность почвы в единицах объемного содержания влаги в образце.

Согласно J.S. Famiglietti et al. (2008), между CV и M была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$CV = k_1 \cdot \exp(-k_2 M) \quad (4)$$

где k_1, k_2 – модельные параметры.

Следует отметить, что наземные измерения в исследовании R.S. Dunbar et al. (2018) были проведены с различным пространственным шагом, величина которого изменялась в пределах 2,5 м ÷ 50 км. Значения k_1 и k_2 , в зависимости от пространственного шага, приведены в таблице (Famiglietti et al., 2008).

Таблица

Значения k_1 и k_2 в зависимости от пространственного шага (Famiglietti et al., 2008)

Пространственный шаг измерений	k_1	k_2
2,5 м	0,7803	9,0607
16 м	0,7287	7,3796
100 м	0,8941	8,0774
800 м	0,8840	5,8070
1,6 км	1,2070	7,1128
50 км	1,0429	5,2212

Как видно из данных таблицы, с ростом пространственного шага k_1 имеет общую тенденцию роста, в то время как k_2 имеет тенденцию к уменьшению.

Графики вычисленных значений коэффициента вариации (CV) приведены на рисунке 2 (Famiglietti et al., 2008).

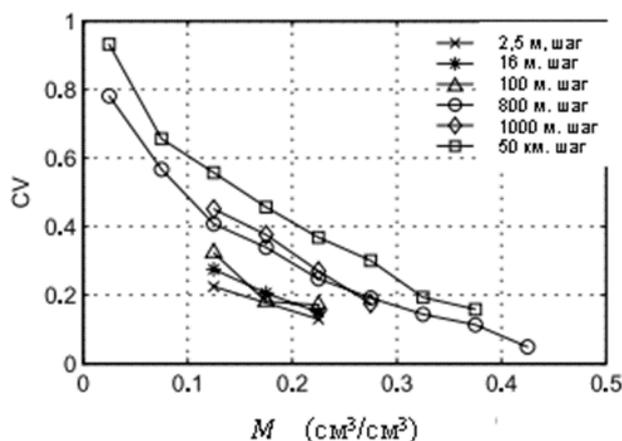


Рисунок 2. Графики значений коэффициента вариации (CV), вычисленных при разных величинах пространственного шага (Famiglietti et al., 2008).

С учетом (3) и (4) получим:

$$CV = k_1(r) \exp\left(-k_2(r) \frac{\sigma}{CV}\right) \quad (5)$$

где CV – коэффициент вариации; k_1, k_2 – модельные параметры; r – пространственный шаг; σ/CV – объемное содержание влаги в почве.

Логарифмируя (5) получаем:

$$\ln CV = \ln k_1(r) - k_2(r) \frac{\sigma}{CV} \quad (6)$$

Из (6) находим:

$$k_2(r) \frac{\sigma}{CV} = \ln \frac{k_1(r)}{CV} \quad (7)$$

или

$$\sigma = \frac{CV}{k_2(r)} \ln \frac{k_1(r)}{CV} \quad (8)$$

Исследуем (8) на экстремум от CV имеем:

$$\sigma'_{CV} = \ln \frac{k_1(r)}{CV} - CV \quad (9)$$

Из (9) получаем:

$$\ln \frac{k_1}{CV} = 1$$

или

$$\frac{k_1(r)}{CV} = e, \quad \text{где } e \approx 2,73 \quad (10)$$

С учетом (3) и (10) находим:

$$\frac{k_1(r)M}{\sigma} = e \quad (11)$$

или

$$M = \frac{\sigma e}{k_1(r)} \quad (12)$$

Следовательно, при выполнении условия (12) значение σ достигает максимума, т.е. составляет:

$$M = \frac{\sigma_{max} e}{k_1(r)} \quad (13)$$

Если принять $\frac{e}{k_1(r)} \approx const$, то, согласно (12), с ростом σ значение M , при котором σ достигает максимальной величины будет смещаться вправо. Эта картина хорошо прослеживается на графиках, представленных на рисунке 3 (Famiglietti et al., 2008).

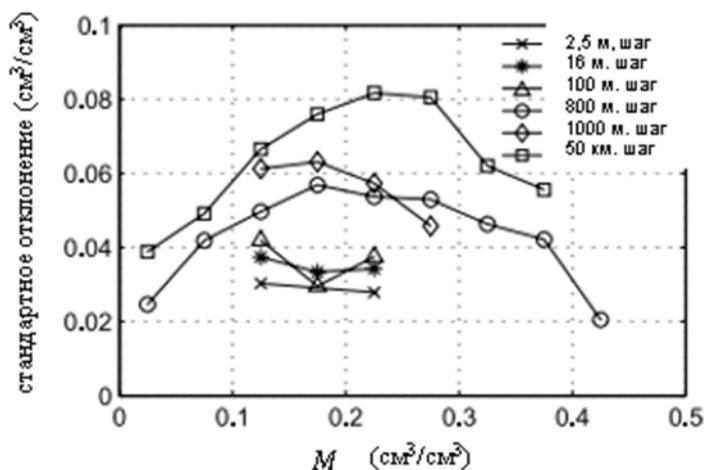


Рисунок 3. Зависимость среднеквадратического отклонения (σ) от объемного содержания влаги в почве (M) при разных значениях пространственного шага (Famiglietti et al., 2008).

С учетом вышеизложенного рассмотрим вопрос о том, при каких значениях $k_1(r)$ или r , значение $\gamma = \frac{\rho(\lambda)}{\rho_0(\lambda)}$ может иметь максимальную величину среднеквадратического отклонения при сопоставлении результатов проведенных дистанционных и наземных измерений влажности почвы. С учетом выражений (2) и (12) получим:

$$\frac{\sigma_{max} e}{k_1(r)} = \frac{1}{a_\lambda} \ln \gamma \quad (14)$$

Из (14) находим:

$$\sigma_{max} = \frac{k_1(r)}{ea_\lambda} \ln \gamma \quad (15)$$

Отметим, что уравнение (14) подразумевает проведение наземно-бортовых измерений влажности почвы при условии, что валидация результатов бортовых измерений по формуле (2) осуществляется по методике, изложенной в работе N.N. Das et al. (2019), т.е. используя полученную здесь формулу (12). Смысл уравнения (15) заключается в том, что при выполнении этого условия показатель γ будет иметь максимальное среднеквадратическое отклонение сопоставления результатов бортовых и наземных измерений, в зависимости от значения $k_1(r)$ при $a_\lambda = \text{const}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено решение задачи оценки точности валидации результатов бортового измерения влажности почвы. В качестве бортового измерителя используется спектрорадиометр пассивного излучения почвы, освещенной Солнцем, а валидация результатов дистанционных измерений осуществляется с помощью наземного контактного измерителя, при проведении измерений с разным пространственным шагом. Проанализированы статистические показатели точности наземных измерений и установлена их взаимосвязь с дистанционно измеренной величиной влажности почвы. Сопоставление результатов наземных и бортовых измерений позволило определить погрешность валидации, осуществляемой при помощи системы наземно-бортовых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- Ahlmer A.-K., Cavalli M., Hansson K., Koutsouris A.J., Crema S., Kalantari Z. Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure // *Environmental Earth Sciences*. 2018. 77. 533. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7704-z>.
- Das N.N., Entekhabi D., Dunbar S., Chaubell J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W.T., O'Neill P.E., Walker J., Berg A., Bosch D., Caldwell T., Cosh M., Collins C.H., LopezBaeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. 111380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.
- Dunbar R.S., Kim S., Yueh S., Colliander A., O'Neill P. E., Jackson T., Jagdhuber T., Chen F., et al. SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC: Boulder, CA, USA, 2018.
- Famiglietti J.S., Ryu D., Berg A.A., Rodell M., Jackson T.J. Field observations of soil moisture variability across scales // *Water resources research*. 2008. Vol. 44. W01423. DOI: 10.1029/2006WR005804. <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>.
- Heathman G.C., Cosh M.H., Han E., Jackson T.J., McKee L.G., McAfee S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks // *Geoderma*. 2012. Vol. 170. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>.
- Merlin O., Jacob F., Wigneron J.P., Walker J.P., Chehbouni G. Multidimensional disaggregation of land surface temperature using high-resolution red, near-infrared, shortwave-infrared and microwave-L bands // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1864–1880. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2169802.
- Merlin O., Rudiger C., Bitar A., Richaume A. Disaggregation of SMOS soil moisture in Southeastern Australia // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1556–1571. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175000.
- Muller E., Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 76. Iss. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00198-X).
- Jackson T., O'Neill P., Chan S., Bindlish R., Colliander A., Chen F., Dunbar S., Piepmeier J., Misra S., Cosh M., Caldwell T., Walker J., Wu X., Berg A., Rowlandson T., Pacheco A., McNairn H., Thibeault M., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Lopez-Baeza E., Udall F., Seyfried M., Bosch D., Starks P., Holifield C., Prueger J., Su Z., van der Velde R., Asanuma J., Palecki M., Small E., Zreda M., Calvet J., Crow W., Kerr Y., Yueh S., Entekhabi D. Soil Moisture Active Passive (SMAP) Project: Calibration and Validation for the L2/3_SM_P Version 5 and L2/3_SM_P_E Version 2 Data Products. Jet Propulsion Laboratory California Institute of

Technology, National Aeronautics and Space Administration. Vol. JPL D-56297. Pasadena: California Institute of Technology, 2018. 44 p.

Поступила в редакцию 07.02.2023

Принята 29.03.2023

Опубликована 30.03.2023

Сведения об авторах:

Бабаева Гюльшен Рауф гызы – старший научный сотрудник Национального аэрокосмического агентства (г. Баку, Азербайджанская Республика); gulshen.babayeva@gmail.com

Рагимов Рауф Махмуд оглы – кандидат технических наук, главный научный сотрудник Национального аэрокосмического агентства (г. Баку, Азербайджанская Республика); rauffmahmud@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ASSESSING THE ACCURACY INDICATORS OF THE GROUND-BASED SPECTRAL ESTIMATION OF SOIL MOISTURE

© 2023 G. R. Babaeva , R. M. Rahimov 

National Aerospace Agency, AZ 1145, S.S. Akhundov str. 1., Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

Contact point field measurements of soil moisture are characterized by low productivity. High efficiency of determining and monitoring soil moisture can be achieved remote sensing. The known microwave methods for remote determination of soil moisture have low spatial resolution, are expensive and hence unsuitable for the use in agriculture. For estimating soil moisture content, the article proposes the ground-based on-board complex, which includes an on-board passive meter of the optical signal reflected from the soil and a ground contact meter. Operation of the latter can be performed either by an automatic measuring network or by an operator conducting contact measurements. The authors formulated and solved the problem related to assessing the accuracy of validation of the on-board measurement of soil moisture content. As an on-board meter, a passive radiation spectroradiometer of the soil illuminated by the Sun is used, and as a ground meter, a contact meter is used for estimating soil moisture at different spatial increments. The accuracy indicators of ground measurements and their relationship with the estimated values were analyzed. Comparison of the results obtained by the ground and on-board measurements allowed to determine the relationship between the moisture content measured from the board and the error of ground measurements as a validation error.

Key words: *moisture content; ground-based measurements; validation; soil; spectroradiometer*

How to cite: *Babaeva G.R., Rahimov R.M. Assessing the accuracy indicators of the ground-based spectral estimation of soil moisture // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(1). e202. DOI: [10.31251/pos.v6i1.202](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.202). (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

Ahlmer A.-K., Cavalli M., Hansson K., Koutsouris A.J., Crema S., Kalantari Z. Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure. *Environmental Earth Sciences*. 2018. 77. 533. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7704-z>.

Das N.N., Entekhabi D., Dunbar S., Chaubell J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W.T., O'Neill P.E., Walker J., Berg A., Bosch D., Caldwell T., Cosh M., Collins C.H., LopezBaeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. 111380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.

Dunbar R.S., Kim S., Yueh S., Colliander A., O'Neill P. E., Jackson T., Jagdhuber T., Chen F., et al. SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC: Boulder, CA, USA, 2018.

Famiglietti J.S., Ryu D., Berg A.A., Rodell M., Jackson T.J. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water resources research*. 2008. Vol. 44. W01423. <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>.

Heathman G.C., Cosh M.H., Han E., Jackson T.J., McKee L.G., McAfee S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. *Geoderma*. 2012. Vol. 170. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>.

Merlin O., Jacob F., Wigneron J.P., Walker J.P., Chehbouni G. Multidimensional disaggregation of land surface temperature using high-resolution red, near-infrared, shortwave-infrared and microwave-L bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1864–1880. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2169802.

Merlin O., Rudiger C., Bitar A., Richaume A. Disaggregation of SMOS soil moisture in Southeastern Australia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1556–1571. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175000.

Muller E., Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 76. Iss. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00198-X).

Jackson T., O'Neill P., Chan S., Bindlish R., Colliander A., Chen F., Dunbar S., Piepmeier J., Misra S., Cosh M., Caldwell T., Walker J., Wu X., Berg A., Rowlandson T., Pacheco A., McNairn H., Thibeault M., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Lopez-Baeza E., Udall F., Seyfried M., Bosch D., Starks P., Holifield C., Prueger J., Su Z., van der Velde R., Asanuma J., Palecki M., Small E., Zreda M., Calvet J., Crow W., Kerr Y., Yueh S., Entekhabi D. Soil Moisture Active Passive (SMAP) Project: Calibration and Validation for the L2/3_SM_P Version 5 and L2/3_SM_P_E Version 2 Data Products. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, National Aeronautics and Space Administration. Vol. JPL D-56297. Pasadena: California Institute of Technology, 2018. 44 p.

Received 07 February 2023

Accepted 29 March 2023

Published 30 March 2023

About the authors:

Babaeva Gulshen Rauf gizi – Senior Researcher, National Aerospace Agency (Baku, Azerbaijan Republic); gulshen.babayeva@gmail.com

Rahimov Rauf Mahmud oglu – Candidate of Science in Technical, Principal Researcher, National Aerospace Agency (Baku, Azerbaijan Republic); rauffmahmud@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В КОМПОНЕНТАХ АГРОЛАНДШАФТОВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

© 2023 А. В. Пузанов ¹, Т. А. Рождественская ¹, Ю. Б. Кирста ¹, О. А. Ельчинова ¹,
И. А. Трошкова ¹, Д. Н. Балыкин ¹, С. Н. Балыкин ¹, А. В. Салтыков ¹, С. В. Бабошкина ¹,
И. В. Горбачев ², М. П. Пеленева ¹

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, ул. Молодежная, 1, г. Барнаул, 656038, Россия.
E-mail: rtamara@iwep.ru

²АО «ЦЭНКИ», ул. Ткацкая, д. 7, Москва, 105318, Россия. E-mail: giv1980@yandex.ru

Цель исследования. Эколого-биогеохимическая и санитарно-гигиеническая оценка пахотных почв Алтайского края и произведенного на них зерна яровой пшеницы.

Место и время проведения. Репрезентативные участки пашины расположены в различных агроэкологических зонах Алтайского края: Кулундинской – сухая степь на каштановых почвах Кулундинской низменности; Рубцовской – засушливая степь на чернозёмах южных Приобского плато; Заринской – лиственные леса и остепнённые луга на чернозёмах выщелоченных Бие-Чумышской возвышенной равнины и на чернозёмах оподзоленных и тёмно-серых лесных почвах Предгорий Салаира; Предгорной – луговая степь на чернозёмах Предалтайской равнин; Приобской – колючая степь на чернозёмах обыкновенных Приобского плато; Алейской – умеренно засушливая степь на чернозёмах обыкновенных Приобского плато; Бийской – лесостепь на чернозёмах выщелоченных и серых лесных почвах Бие-Чумышской возвышенной равнины. Исследования проведены в 2018 г.

Методы. Содержание микроэлементов в почвах и зерне пшеницы определено методом атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии согласно ПНД Ф 14.1:2:4. 139; 140-98; НСАМ №450С; РД 52.24.479-95.

Основные результаты. Установлено, что необходимые для растений, животных, человека элементы в пахотных почвах Алтайского края содержатся в оптимальных количествах (среднее содержание Mn составило 714, Zn – 65, Cu – 25,7, Co – 12,3 мг/кг), при которых живые организмы функционируют нормально. Концентрации большинства токсичных элементов находятся на уровне средних содержаний в почвах мира, данных для незагрязнённых почв Западной Сибири и не превышают ПДК (ОДК). Средняя концентрация Cd в исследованных почвах составила 0,089, Pb – 13,6, As – 5,0, Hg – 0,037 мг/кг. Биогеохимической провинции ни по одному из элементов не выделено. Почвы обладают довольно высокой буферной способностью по отношению к тяжёлым металлам. Содержание элементов в зерне яровой пшеницы – основной возделываемой в Алтайском крае культуры – соответствует мировым данным для зерна. Количество нормируемых элементов (свинца, кадмия, ртути, мышьяка) отвечает отечественным нормам и требованиям Технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна».

Заключение. Пахотные почвы Алтайского края не загрязнены тяжёлыми металлами. Микроэлементы (марганец, цинк, медь, кобальт) в изученных почвах содержатся в оптимальных для живых организмов количествах. Однако при использовании полученного на них зерна в качестве моно корма возможен дефицит кобальта у животных. Уровень содержания химических элементов обусловлен исходным содержанием элементов в почвообразующих породах. Степень буферирования тяжёлых металлов в изученных пахотных почвах в зависимости от элемента варьировала от средней до высокой.

Ключевые слова: пахотные почвы; зерно; химические элементы; эколого-биогеохимическая и санитарно-гигиеническая оценка

Цитирование: Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Кирста Ю.Б., Ельчинова О.А., Трошкова И.А., Балыкин Д.Н., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В., Пеленева М.П. Микроэлементы в компонентах агроландшафтов Алтайского края // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. е188. DOI: [10.31251/pos.v6i1.188](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.188).

ВВЕДЕНИЕ

В числе основных задач в Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 30 января 2010 года №120, обозначено обеспечение безопасности пищевых продуктов, поэтому разработка научных основ производства сельскохозяйственной продукции, качество которой должно соответствовать отечественным и мировым общегигиеническим и токсикологическим нормативам и не оказывать негативного влияния на здоровье людей и животных – важнейшая задача науки. Оценка качества зерна должна включать не только общепринятые показатели (белок, клейковина и др.), но и анализ содержания химических элементов, многие из которых необходимы для животных и человека, но в высоких концентрациях токсичны. Так, количество в зерне тяжелых металлов не должно превышать ПДК и отвечать физиологическим нормам.

Наиболее распространенной зерновой сельскохозяйственной культурой во многих странах мира является пшеница, получившая широкое применение при изготовлении различных видов продуктов питания, косметических, лекарственных препаратов, кормов для сельскохозяйственных животных. Изделия из зерна пшеницы занимают важное место в питании человека, являясь доступным источником микроэлементов, белков, углеводов и витаминов. С растительной пищей в организм человека поступает основное количество тяжелых металлов. Химический состав культурных растений обусловлен их биологическими особенностями и, в определенной мере, содержанием элементов в пахотных почвах, особенно в условиях их недостатка или избытка (Школьник, 1967; Власюк, 1969; Авцын и др., 1991; Гамзикова, Барсукова, 1996; Пугаев, 2013; Кондратенко и др., 2015).

Алтайский край является одним из крупнейших сельскохозяйственных регионов Российской Федерации, а яровая пшеница – важнейшей возделываемой культурой, при этом значительная доля производимого зерна идет на экспорт. На территории края сложилась непростая эколого-геохимическая обстановка, обусловленная разнообразием почвенного покрова и ландшафтно-геохимических условий, влиянием ракетно-космической деятельности, значительной аграрной нагрузкой, наличием и разработкой многочисленных месторождений, загрязнением радиоактивными веществами в результате испытаний ядерных устройств на Семипалатинском полигоне (Казахстан) и полигоне Лобнор (Китай) (Мальгин и др., 1993; Горюнова, 1999; Бурлакова и др., 2001; Пузанов и др., 2002; Бабошкина и др., 2006; Пузанов и др., 2012). Увеличивающийся уровень антропогенной нагрузки, связанный с возрастающей урбанизацией и воздействием техногенных факторов, негативно влияет на агробиоценозы. Почвы подвергаются значительному антропогенному влиянию, что отражается на их составе и свойствах. Накопление в окружающей среде ксенобиотических элементов является одним из наиболее опасных результатов такого воздействия. Тяжёлые металлы по пищевым цепям через растения попадают в организм животных и человека, аккумулируются в органах и тканях, вызывая различные патологии, поэтому исследование растительной продукции на содержание тяжёлых металлов весьма актуально.

Цель работы – эколого-биогеохимическая и санитарно-гигиеническая оценка пахотных почв Алтайского края и произведенного на них зерна яровой пшеницы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвенные разрезы были заложены на репрезентативных участках во всех агроэкологических зонах Алтайского края, в соответствии с районированием В.А. Рассыпнова (2012): Кулундинской – сухая степь на каштановых почвах (Haplic Kastanozems Chromic) Кулундинской низменности; Рубцовской – засушливая степь на чернозёмах южных (Haplic Chernozems Pachic) Приобского плато; Заринской – лиственные леса и остепнённые луга на чернозёмах выщелоченных (Voronich Chernozems Pachic) Бие-Чумышской возвышенной равнины и чернозёмах оподзоленных и тёмно-серых лесных почвах Предгорий Салаира; Предгорной – луговая степь на чернозёмах (Voronich Chernozems Pachic) Предалтайской равнины; Приобской – колючая степь на чернозёмах обыкновенных (Voronich Chernozems Pachic) Приобского плато; Алейской – умеренно засушливая степь на чернозёмах обыкновенных Приобского плато; Бийской – лесостепь на чернозёмах выщелоченных и серых лесных почвах (Voronich Chernozems Pachic) Бие-Чумышской возвышенной равнины. Сопряженно с почвенными разрезами и прикопками отбирали растительный материал – зерно пшеницы (рис. 1).

Содержание микроэлементов в почвах и зерне пшеницы определили в лаборатории изотопно-геохимических методов анализа Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН) методом атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии ПНД Ф 14.1:2:4. 139; 140-98; НСАМ №450С; РД 52.24.479-95.

Навеску материала подвергали кислотному озолению концентрированной азотной кислотой при нагревании. Полученный раствор фильтровали, количественно переносили в мерную колбу, доводили объём до метки дистиллированной водой и определяли содержание элементов.

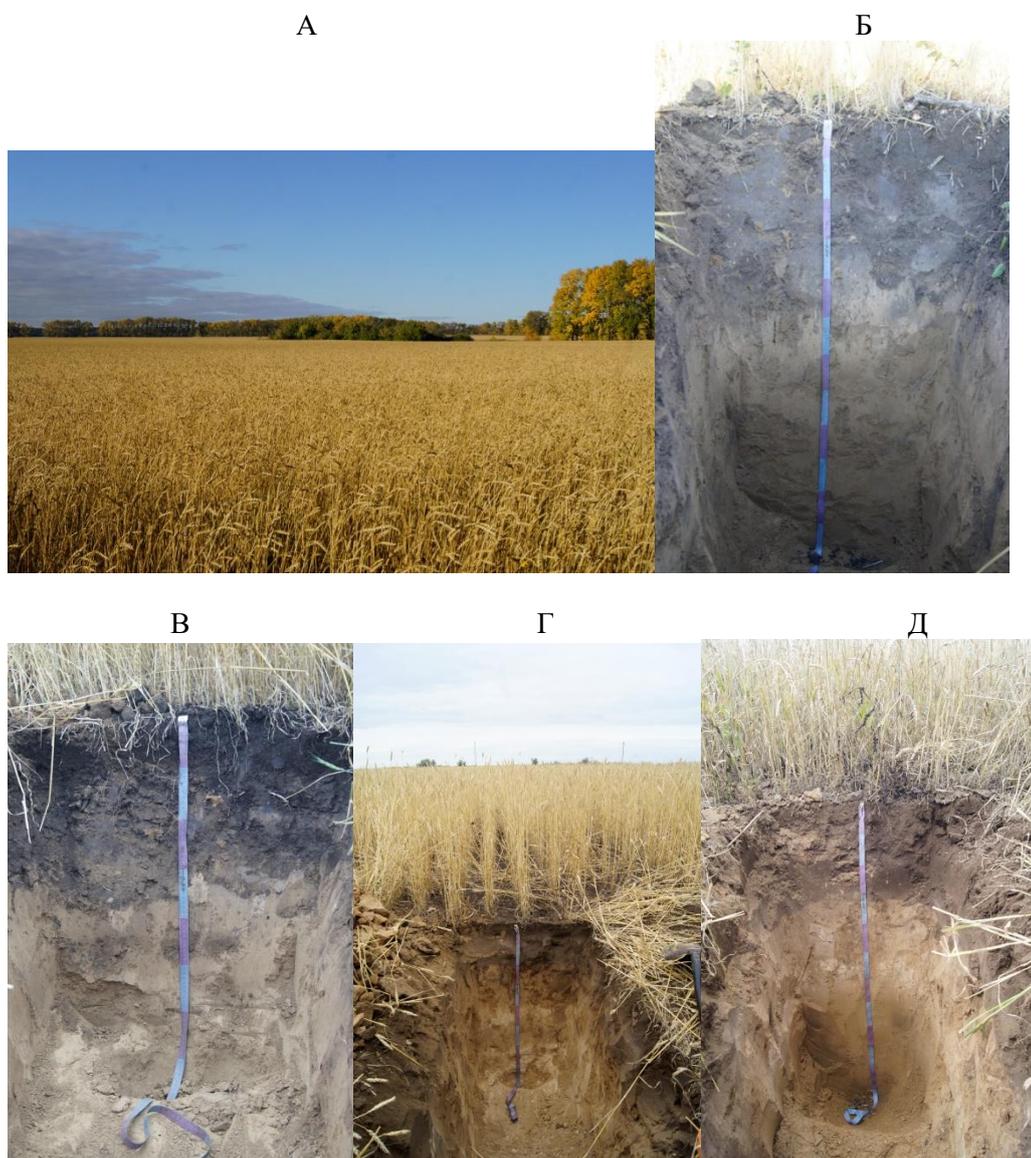


Рисунок 1. А, Б – пшеничное поле на чернозёме обыкновенном, Алейская зона (разрез Р-12-Ф-18); В – чернозём выщелоченный, Бийская зона (Р-5-Ф-18); Г – чернозём южный, Рубцовская зона (Р-9-Ф-18); Д – тёмно-каштановая почва, Кулундинская зона (Р-10-Ф-18).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В почвах и растениях определены как элементы, содержание которых нормируется, так и элементы, имеющие важное экологическое и физиологическое значение. Из всей гаммы химических элементов особое внимание привлекают Hg, As, Pb, Cu, Zn, Cd. Это связано с тем, что на значительной части территории края в почвообразующих породах и почвах районов полиметаллических месторождений, добычи и переработки руд наблюдается повышенное содержание рудных и сопутствующих им элементов.

Количество гумуса в пахотных горизонтах исследуемых почв изменяется в широких пределах – от 2,6% в Рубцовской зоне до 7,9% в Предсалаирье и Приобье. Содержание физической глины увеличивается с 17% в почвах Кулунды до 53% – в почвах предгорий Салаира. Большинство почв характеризуется мощными карбонатными системами (до 21% карбонатов в горизонте Вк).

Анализ пахотных почв Алтайского края на содержание микроэлементов (при высоких концентрациях в среде относящихся к тяжелым металлам) показал, что биогенные элементы Mn, Zn, Cu, Co в почвах содержатся в оптимальных количествах, при которых у живых организмов не может быть отклонений в процессах жизнедеятельности.

Концентрации большинства токсичных элементов в исследованных почвах находятся на уровне кларков в почвах мира, данных для незагрязненных почв Западной Сибири и согласуются с полученными ранее данными для отдельных районов Алтайского края (табл. 1, 2).

Так как на Алтае существуют геохимические провинции с повышенным валовым содержанием мышьяка в почве, наблюдается небольшое превышение уровня содержания этого элемента в почвах Алейской и Предгорной агроэкологических зон (см. табл. 1) над кларком в почвах и земной коре. Это обусловлено фосфоритностью горных пород Алтае-Саянской горной страны (Фосфоритность..., 1968), к которой пространственно тяготеют указанные зоны; известно, что мышьяк обладает геохимическим сродством к фосфору. Выявлено превышение уровня ОДК мышьяка в почвах лёгкого гранулометрического состава (разрезы Р-6-Ф-18 и Р-10-Ф-18), но это, вероятно, связано с несовершенством норматива – ОДК этого элемента меньше его кларка в почвах.

Несколько выше фона содержание хрома и ванадия в почвах тяжелого гранулометрического состава Алейской, Предгорной, Бийской и Заринской зон. Однако это не свидетельствует о каком-либо загрязнении, повышенные концентрации наследуются от почвообразующих пород.

Выявлены достоверные отличия уровня концентрации тяжёлых металлов в почвах всех агроэкологических зон от среднего содержания в пахотных почвах в целом ($P < 0,05$), что обусловлено разными почвообразующими породами и генетической принадлежностью почв. Исключение составляет элементы с низкими кларками (кадмий и ртуть). Значения коэффициентов вариации содержаний большинства элементов, как в совокупности исследованных почв, так и почв каждой агроэкологической зоны менее 30%, что свидетельствует об однородности выборок и, следовательно, отсутствии значимого загрязнения, которое, как правило, приводит к увеличению размаха вариации.

Из всех исследованных элементов только концентрация кадмия в пахотных горизонтах достоверно выше, чем в нижележащих слоях ($t_f = 3,92$ при $t_{st} = 2,66$ и $\alpha = 0,01$). Это, вероятно, связано с большой подвижностью Cd в зоне гипергенеза и использованием минеральных удобрений, содержащих этот токсикант. Кадмий – обычный компонент фосфорных удобрений, поэтому продолжительное их внесение является причиной загрязнений почв элементом (Морозова, Колесниченко, 2019; Kabata-Pendias, 2010; Овчаренко, 1995; Europe's..., 1995, Davister, 1996, Сладкова, 2016). Среднее содержание кадмия в фосфорных удобрениях – 1,0-2,0 мг/кг (Davister, 1996). Удобрения, полученные из фосфорных горных пород, дают значительный вклад в загрязнение почв кадмием – от 0,3 до 38 г/га ежегодно (Jensen, Bro-Rasmussen, 1990). При содержании элемента в суперфосфате из Кольского апатита в количестве 0,7 мг/кг и дозе внесения 100 кг P_2O_5 поступление Cd составит 0,35 г/га, а с суперфосфатом из фосфорита Каратау, с содержанием кадмия 2,2 мг/кг при той же дозе – 1,1 г/га (Ринькис и др., 1989).

Кадмий содержится и в других удобрениях – так, среднее содержание кадмия в азотных удобрениях 0,2 мг/кг, калийных – 0,3 мг/кг и органических удобрениях – 0,55 мг/кг (Овчаренко, 1995). По данным Т.С. Морозовой и Е.Ю. Колесниченко (2019), при внесении минеральных удобрений в дозе $N_{120}P_{120}K_{120}+N_{30}$ на фоне последействия 80 т/га навоза отмечается увеличение концентрации кадмия в 3 раза за 18 лет.

В условиях Алтайского края для улучшения фосфорного питания яровой пшеницы, как правило, вносится до 60 кг действующего вещества фосфорных удобрений на гектар (Олешко и др., 2015), что в пересчете на суперфосфат составляет около 230 кг/га. При глубине обработки почвы в регионе в последние десятилетия 10-15 см и с учётом приведённых выше концентраций кадмия в фосфорных удобрениях, внесение только этого вида туков может увеличить содержание кадмия в пахотном горизонте на 0,004 мг/кг почвы за 10 лет. При использовании полного минерального и органических удобрений эта величина, очевидно, возрастет.

Таблица 1

Содержание химических элементов в пахотных почвах агроэкологических зон, мг/кг

Разрез, почва, зона	Горизонт, глубина, см	Глубина образца, см	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cr	V	Co
Р-5-Ф-18 Чернозем выщелоченный (Vergonic Chernozems Pachic), Бийская зона	Апах (0–24)	0–10	38500	920	80	31	13	0,13	2,6	0,031	47	106	120	15
		10–20	39200	870	80	30	13	0,12	5,6	0,037	50	130	120	15
	АВ(24–33)	24–33	41900	800	79	29	13	0,063	5,2	0,035	56	100	130	16
	Вк (33–52)	35–45	42000	790	78	30	13	0,063	5,7	0,038	51	110	130	16
	ВСк (52–62)	52–62	38600	730	77	30	13	0,10	5,1	0,022	45	100	120	15
	Ск (62–...)	62–72	36700	750	67	27	12	0,094	5,1	0,019	41	97	110	14
Р-6-Ф-18 Чернозем обыкновенный (Vergonic Chernozems Pachic), Приобская зона	Апах к (0–28)	0–12	22400	550	49	17	12	0,15	3,6	0,019	22	52	74	7,9
		15–25	22800	580	47	17	13	0,089	3,3	0,016	22	47	74	7,9
	Ак (28–52)	30–40	24700	630	54	20	12	0,10	3,2	0,016	25	56	80	8,6
		40–50	22800	560	48	18	12	0,095	3,1	0,019	19	37	73	8,2
	Ак (52–65)	55–65	22300	520	44	17	10	0,076	1,7	0,016	25	52	74	8,0
	АВк (65–80)	67–77	23300	510	46	16	11	0,062	3,9	0,022	22	59	76	7,7
	Вк (80–102)	85–95	21400	420	39	17	11	0,044	3,4	0,025	23	49	71	7,5
Ск (140–...)	140–150	22400	470	39	16	11	0,048	2,9	0,016	21	51	74	7,5	
Р-9-Ф-18 Черноземужный (Haplic Chernozems Pachic), Рубцовская зона	Апах к (0–20)	0–6	29400	750	64	24	13	0,13	4,8	0,025	29	80	99	12
		10–20	29700	750	65	25	15	0,11	4,7	0,025	29	72	97	12
	АВк (20–30)	20–30	33600	720	69	28	16	0,085	5,3	0,031	39	84	110	13
	Вк (30–42)	30–40	31400	590	63	25	15	0,077	5,6	0,028	43	72	110	12
	Вк (42–60)	45–55	26500	550	50	20	13	0,090	4,0	0,016	30	68	93	10
	ВСк (60–70)	60–70	24700	520	47	19	13	0,083	3,9	0,015	30	63	86	9
		70–80	24100	510	45	21	12	0,064	5,3	0,030	30	61	78	10
Ск (80–90)	80–90	33800	730	68	29	15	0,073	6,2	0,040	48	84	110	13	
Р-10-Ф-18 Темно-каштановая почва (Haplic Kastanozems Chromic), Кулундинская зона	Апах (0–29)	0–14	26200	670	57	23	14	0,095	4,7	0,065	31	61	80	10
		15–25	26400	670	55	22	14	0,080	4,3	0,075	32	62	81	10
	АВк (29–40)	30–40	27700	540	44	22	12	0,050	5,5	0,094	37	66	90	9
	Вк (40–52)	40–52	26300	520	50	23	12	0,064	6,1	0,072	35	54	87	10
	Вк (52–60)	52–60	22600	470	41	19	11	0,064	6,0	0,056	28	49	76	8
ВСк (60–99)	65–75	19400	480	34	14	11	0,053	4,4	0,037	24	43	67	8	

Разрез, почва, зона	Горизонт, глубина, см	Глубина образца, см	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cr	V	Co
		85–95	21400	500	37	16	11	0,047	4,1	0,045	25	47	71	8
	Ск (99–...)	105–115	18400	480	32	13	12	0,048	3,5	0,050	23	38	61	7
Р-14-Ф-18 Чернозем обыкновенный (Voronich) Chernozems Pachic, Предгорная зона	Апах к (0–27)	0–10	38800	930	89	36	20	0,16	6,4	0,028	50	84	120	15
		10–20	40700	980	93	40	19	0,14	6,5	0,022	53	92	125	16
	Ак (27–36)	27–36	41200	1010	88	36	15	0,11	7,1	0,022	55	94	126	17
	АВк (36–52)	40–50	39100	920	82	34	14	0,11	7,2	0,019	52	89	120	15
	Вк (52–75)	60–70	39400	890	82	33	14	0,096	6,7	0,020	51	92	120	15
	ВСк (75–...)	100–110	39900	820	85	34	13	0,081	6,7	0,011	51	93	120	15
135–145		36400	880	75	31	13	0,081	6,3	0,082	46	81	110	15	
Кларк в почвах (Ярошевский, 2006)			38000	500	60	23,0	20,0	0,16	6,00	0,1	20,0	60	90	9,00
ПДК с учетом фона (кларка) (СанПиН 1.2.3685-21)			–	1500	–	–	–	–	–	2,1	–	–	150	–
ОДК с учетом фона (кларка) (СанПиН 1.2.3685-21)			–	–	55^а/110^б /220^в	33^а/66^б /132^в	32^а/65^б /130^в	0,5^а/1^б /2^в	2^а/5^б /10^в	–	20^а/40^б /80^в	–	–	–
Нижняя пороговая концентрация в почве (Ковальский, Андрианова, 1970)			–	до 400	до 30	<6-15	–	–	–	–	–	–	–	<2-7
Верхняя пороговая концентрация в почве (Ковальский, Андрианова, 1970)			–	>3000	>70	>60	–	–	–	–	–	–	–	>30

Примечание. Прочерк – нет данных. а – песчаные и супесчаные; б – кислые (суглинистые и глинистые), рНКС< 5,5; в – близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), рНКС> 5,5.

Таблица 2

Статистические параметры содержания химических элементов в почвенном профиле (n=58)

Параметр	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cr	V	Co
X±x	31674±887	714±21	65±2	25,7±0,8	13,6±0,3	0,089±0,004	5,0±0,2	0,037±0,003	39±1	79±3	101±3	12,3±0,4
lim	18400–42000	420–1010	32–93	13–40	10–20	0,028–0,16	1,7–7,3	0,011–0,11	19–60	37–130	61–130	7–17
V, %	21	22	25	25	15	34	24	61	28	28	19	24

Примечание. n – число проб, lim – пределы колебаний, X±x – средняя арифметическая и ее ошибка, V – коэффициент вариации.

Таким образом, несмотря на наличие на территории края многочисленных полиметаллических месторождений, ореолов их рассеяния и предприятий по переработке полиметаллических руд, пахотные почвы исследуемого региона не загрязнены тяжелыми металлами. Уровень содержания химических элементов обусловлен исходным содержанием элементов в почвообразующих породах.

Буферная способность почв позволяет успешно противостоять действию внешних факторов, реализовать защитные возможности почвы, влияющие на подвижность химических элементов. Чем выше буферность почвы, тем большее количество металлов она в состоянии переводить в слабоподвижные соединения, тем самым, ограничивая миграцию избыточного количества химических элементов по пищевой цепочке и в сопредельные среды (Лебедев и др., 2011).

Согласно шкале В.Б. Ильина и А.И. Сысо (2001), основными показателями, учитываемыми при оценке буферной способности почв, являются гранулометрический состав, степень гумусированности и водородный показатель ($pH_{водн}$); в инактивации избыточных ионов также участвуют полоторные оксиды и карбонаты. Степень буферности большинства исследуемых пахотных почв довольно высокая (табл. 3). В случае загрязнения почв тяжелыми металлами последние будут переводиться в малодоступную для растений форму. Согласно данным (Ильин, 1995), при средней степени буферности чернозема выщелоченного Приобского плато количество свинца в почвах, с которого начнется накопление металла в листьях пшеницы, – 400–500 мг/кг, что в 25–30 раз превышает концентрацию в пахотных почвах Алтайского края.

Таблица 3

Степень буферности пахотных почв по отношению к тяжелым металлам

Разрез	Количество баллов, полученных за счет					Сумма баллов	Степень буферности
	гумуса	физической глины	R ₂ O ₃	карбонатов	pH		
P-5-Ф-18	6,5	15	7	1,0	10,0	39,5	повышенная
P-6-Ф-18	3,5	5	4	1,0	7,5	21,0	средняя
P-9-Ф-18	3,5	10	4	3,5	12,5	33,5	повышенная
P-10-Ф-18	5,0	5	4	1,0	10,0	25,0	средняя
P-14-Ф-18	5,0	10	4	9,5	15,0	43,5	высокая

Качество и экологическая безопасность сельскохозяйственной продукции в значительной степени зависят от содержания в ней тяжелых металлов. Ценность хлебных продуктов связана с качеством зерна. Так, согласно (Guttieri et al., 2015), 50% содержащегося в зерне кадмия поступает в муку, тогда как, в муке остаётся только 31% цинка и 22% железа от их исходного содержания в зерне.

Проведенные исследования показали, что содержание нормируемых элементов (свинца, кадмия, ртути, мышьяка) в образцах зерна яровой пшеницы, выращенной в Алтайском крае, отвечает отечественным нормам и требованиям Технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна», остальных элементов – находится в пределах нормальных для растений диапазонов (табл. 4).

Несмотря на то, что содержание микроэлементов в зерне разных агроэкологических зон несколько различается, эти флуктуации находятся в пределах нормы. Варьирование содержания микроэлементов (Mn, Zn, Cu, Fe) незначительное (11–20%), так как элементный химический состав репродуктивных органов находится под строгим генетическим контролем и мало подвержен изменению под влиянием факторов окружающей среды (Ильин, Сысо, 2001). Концентрации элементов, не являющихся биогенными, варьируют в более широких пределах (40–55%).

Микроэлементы содержатся в растениях в незначительных количествах. Однако недостаток, как и избыток многих микроэлементов, вызывает, неблагоприятные последствия для роста и продуктивности растений, что сказывается на обеспечении человека и животных полноценным питанием определенного качественного состава. В связи с этим проблема снабжения растений микроэлементами все больше приобретает общебиологическое значение. К микроэлементам, необходимым организмам животных, относятся цинк, медь, кобальт, йод, марганец, молибден, бор. Согласно мнению некоторых авторов (Bouis, 1995; Morgunov et al., 2007; Velu et al., 2018;

Таблица 4

Содержание химических элементов в зерне пшеницы, мг/кг воздушно-сухого вещества

Разрез (прикопка)	Pb	As	Cd	Hg	Mn	Zn	Cu	Fe	Co	V	Ni
P-2-Ф-18	0,057	<0,05	0,010	<0,005	54	51	6,1	78	<0,01	0,069	0,12
P-5-Ф-18	0,062	<0,05	0,023	<0,005	63	62	6,7	90	<0,01	0,25	0,28
P-6-Ф-18	0,093	<0,05	0,024	<0,005	48	31	4,5	73	<0,01	<0,02	0,23
P-8-Ф-18	0,22	<0,05	0,010	<0,005	58	46	6,4	57	0,081	<0,02	0,43
P-9-Ф-18	0,22	<0,05	0,033	<0,005	63	43	6,3	75	0,049	0,041	0,44
P-10-Ф-18	0,28	<0,05	0,032	<0,005	66	43	6,1	77	0,057	<0,01	0,32
P-12-Ф-18	0,21	<0,05	0,010	<0,005	58	37	6,0	62	0,097	0,041	0,33
T.6	0,22	<0,05	0,024	<0,005	71	31	6,6	53	0,11	<0,01	0,76
P-14-Ф-18	0,16	<0,05	0,026	<0,005	57	36	4,7	56	0,088	<0,01	0,27
T.11	0,13	<0,05	0,030	<0,005	55	26	3,8	51	0,048	<0,01	0,19
Допустимый уровень в продовольственном зерне*	0,5	0,2	0,1	0,03	–	–	–	–	–	–	–
ПДУ в зерне, поставляемом на пищевые цели**	0,5	0,2	0,1	0,03	–	–	–	–	–	–	–
Нижняя пороговая концентрация в кормах (Ковальский и др., 1971)	–	–	–	–	до 20	до 20–30	до 3–5	до 25	до 0,1– 0,25	–	–
Верхняя пороговая концентрация в кормах (Ковальский и др., 1971)	–	–	–	–	60–70 и выше	60–100 и выше	20–40 и выше	–	1 и выше	–	–
Мордовия, черноземы выщелоченные (Пугаев, 2013)	0,08	–	–	–	9,0	–	2,1	–	–	–	–
Башкирия, степь и лесостепь (Чернов, Гусманов, 2013)	0,01–0,37	–	0,01–0,11	–	–	21,66– 46,69	3,07–9,89	–	–	–	–
Оренбургская область (Лебедев и др., 2011)	0,155– 0,300	0,061– 0,083	не обнаруж ено– 0,009	–	–	18,86– 25,02	4,18–4,80	–	–	–	–
Окрестности г. Красноярска (Берсенева, 2018)	<0,1– 0,25	<0,02	<0,05– 0,71	<0,001	–	21,2–44,5	–	–	–	–	–
Гродненская область, Беларусь (Самусик, Головатый, 2021)	0,11–0,33	–	0,04–0,07	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Прочерк – нет данных. *(СанПиН 2.3.2.1078-01). **Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 015/2011 О безопасности зерна. Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 874.

Guttieri et al., 2015), считающих концентрацию цинка в зерне современных сортов пшеницы до 42 мг/кг низкой, в половине исследуемых образцов количество элемента недостаточное. Тем не менее, по данным (Wang et al., 2020), содержание цинка в зерне пшеницы в разных странах варьирует от 25,1 мг/кг в Европе до 33,9 мг/кг в Северной Америке, что ниже большинства полученным нами данных. Рассматривая зерно, выращенное в Алтайском крае, в качестве корма для животных, отметим, что содержание кобальта в 90% образцов меньше нижней пороговой концентрации элемента в кормах (Ковальский и др., 1971). Самые низкие концентрации элемента (ниже предела обнаружения метода определения) выявлены в зерне предгорий Салаира и Приобья. В условиях дефицита кобальта при откорме на зерне следует внимательно относиться к пищевому рациону животных, у которых микроэлемент участвует в синтезе витамина В12. Остальные из исследованных элементов содержатся в зерне в оптимальных для животных количествах.

ВЫВОДЫ

1. Пахотные почвы Алтайского края не загрязнены тяжелыми металлами. Необходимые для растений, животных, человека элементы – марганец, цинк, медь, кобальт – в почвах содержатся в оптимальных для живых организмов количествах. Уровень содержания химических элементов обусловлен исходным содержанием элементов в почвообразующих породах.

2. Степень буферности исследуемых пахотных почв по отношению к тяжелым металлам находится в пределах от средней до высокой.

3. Содержание элементов в зерне яровой пшеницы – основной возделываемой в крае зерновой культуры – соответствует мировым данным для зерна. Количество нормируемых элементов (свинца, кадмия, ртути, мышьяка) отвечает отечественным нормам и требованиям Технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна».

4. При использовании зерна в качестве моноорма возможен дефицит кобальта у животных.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН по проекту FUFZ-2021-0003, при поддержке гранта РФФИ 18-45-220019.

ЛИТЕРАТУРА

Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементы человека: этиология, классификация, органопатология. Москва: Медицина, 1991. 496 с.

Бабошкина С.В., Горбачев И.В., Пузанов А.В., Рождественская Т.А. Аэрогенная и водная миграция микроэлементов в условиях техногенных ландшафтов // Ползуновский вестник. 2006. № 2-1. С. 255–259. https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2006_02_1/pdf/255baboshkina.pdf

Берсенева, М. Л. Содержание некоторых тяжелых металлов в зерне пшеницы // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (137). С. 266–272. http://www.kgau.ru/vestnik/2018_2/content/40.pdf

Бурлакова Л.М., Антонова О.И., Деев Н.Г., Морковкин Г.Г. Экоотоксиканты в системе «почва-растения-животные» (на примере отдельных зон Алтайского края). Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2001. 236 с.

Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Институт физиологии растений АН УССР. Киев: Наук. Думка, 1969. 516 с.

Гамзикова О.И., Барсукова В.С. Изменение устойчивости пшеницы к тяжелым металлам // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1996. № 2. С. 13–15.

Горюнова Т.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях районов полиметаллических месторождений // Геохимическая экология и биогеохимическое районирование биосферы (посвящается 70-летию организации В.И. Вернадским биогеохимической лаборатории и 100-летию со дня рождения В.В. Ковальского). Материалы Второй российской школы, 1999. С. 81–83.

Ильин В.Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 1995. № 13. С. 109–113.

Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: СО РАН, 2001. 231 с.

Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. Москва: Наука, 1970. 179 с.

- Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Т.И. Микроэлементы в растениях и кормах. Москва: Колос, 1971. 235 с.
- Кондратенко Е.П., Константинова О.Б., Соболева О.М., Ижмулкина Е.А., Вербицкая Н.В. Оценка уровня накопления макро- и микроэлементов зерном озимых культур, выращенных на юго-востоке Западной Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 6. С. 18–20.
- Лебедев С.В., Родионова Г.Б., Сальникова Е.В., Кудрявцева Е.А. Оценка содержания тяжелых металлов в зерновых культурах Оренбургской области // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 12 (131). С. 407–409.
- Мальгин М.А., Пузанов А.В., Ельчиногова О.А., Горюнова Т.А. Цезий-137 в почвах // Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. материалы научных исследований. Комитет администрации Алтайского края по ликвидации последствий многолетнего воздействия ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне. Барнаул, 1993. С. 52–64.
- Морозова Т.С., Колесниченко Е.Ю. Агрэкологическая оценка систематического применения удобрений на накопление кадмия и свинца в черноземе типичном // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 4 (24). С. 226–235.
- Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 4. С. 8–16.
- Олешко В.П., Литвинцев П.А., Часовских Д.В. Эффективность применения минеральных удобрений на различных сортах яровой мягкой пшеницы в условиях Алтайского Приобья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 6 (128). С. 3–17.
- Пугаев С.В. Содержание тяжелых металлов в зерне озимой и яровой пшеницы, произрастающей в разных экологических условиях // Вестник Мордовского университета. 2013. № 3–4. С. 89–93.
- Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В. Особенности миграции тяжелых металлов в природно-техногенных аномалиях Северо-западного Алтая // Геохимия. 2012. № 4. С. 393–402.
- Пузанов А.В., Мальгин М.А., Горюнова Т.А., Ельчиногова О.А. Микроэлементы в почвах и растениях средней части Кулундинской депрессии // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Сборник докладов международной научно-практической конференции. Министерство образования и науки Республики Казахстан, 2002. С. 134–143.
- Рассыпнов В.А. Агрэкологическое районирование территории на основе бонитировки почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 12 (98). С. 39–41.
- Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А. Система оптимизаций и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1989. 195 с.
- Самусик Е.А., Головатый С.Е. Тяжелые металлы в почвах и в растениях пшеницы в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021. № 4. С. 76–88.
- Сладкова Н.А. Распределения цинка и кадмия в системе торфяная почва – растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений. Диссертация... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2016. 180 с.
- Фосфоритность древних отложений Алтае-Саянской складчатой области. Труды ГосНИИ горно-химического сырья. Вып. 12. Москва, 1968. С. 44–51.
- Чернов О.В., Гусманов Р.У. Экономико-экологический метод оценки зерновых культур в Республике Башкортостан // Агропродовольственная политика России. 2013. № 2 (14). С. 72–74.
- Школьник М.Я. Микроэлементы в питании растений. Физиология сельскохозяйственных растений. М.: Изд-во МГУ, 1967. Т. 2. С. 128–203.
- Ярошевский А.А. Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. 2006. № 1. С. 54–62. DOI: 10.1134/S001670290601006X.
- Bouis H. Enrichment of Food Staples through Plant Breeding: a New Strategy for Fighting Micronutrient Malnutrition // Nutrition Reviews. 1996. Vol. 54, Iss. 5. P. 131–137. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1996.tb03915.x>.
- Davister A. Studies and Research on Processes for the elimination of cadmium from phosphoric acid. OECD Proceeding / Fertilizers as a Source of Cadmium. IOMC. Paris, 1996. P. 21–30.
- Jensen A., Bro-Rasmussen F. Review of Environmental Fate and Exposure of Cadmium in the European Environment // EEC contract NO. Final report. 1990. № 5. 122 p.

Guttieri M.J., Seabourn B.W., Liu C., Baenziger P.S., Waters B.M. Distribution of Cadmium, Iron, and Zinc in Millstreams of Hard Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2015. Vol. 63. Iss. 49. P. 10681–10688. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04337>.

Europe's Environment, Statistical Compendium for the Dobris Assessment. Brussels. Eurostat, European Commission, 1995. 455 p.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. 548 p.

Morgunov A., Gomez-Becerra H.F., Abugalieva A.I., Dzhunusova M., Yessimbekova M.A., Muminjanov H., Zelenskiy Y., Ozturk L., Cakmak Y. Iron and Zinc Grain Density in Common Wheat Grown in Central Asia // Euphytica. 2007. Vol. 155. P. 193–203. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9321-2>.

Velu G., Crespo-Herrera L., Huert J., Payne T., Guzman C., Singh R.P. Assessing Genetic Diversity to Breed Competitive Biofortified Wheat With Increased Grain Zn and Fe Concentrations // Frontiers in Plant Science. 2018. Vol. 9. P. 1971. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01971>.

Wang J.W., Kong F., Liu R., Fan Q., Zhang X. Zinc in Wheat Grain, Processing, and Food // Frontiers in Nutrition. 2020. Vol. 7. P. 124. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00124>.

Поступила в редакцию 19.10.2022

Принята 28.03.2023

Опубликована 04.04.2023

Сведения об авторах:

Пузанов Александр Васильевич – профессор, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); puzanov@iwerp.ru

Рождественская Тамара Анатольевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); rtamara@iwerp.ru

Кирста Юрий Богданович – профессор, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); kirsta2007@mail.ru

Ельчинова Ольга Анатольевна – доктор сельскохозяйственных наук, доцент Горно-Алтайского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН (с. Кызыл-Озек, Россия); gafiver@mail.gorny.ru

Трошкова Ирина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); egorka_iren@mail.ru

Балыкин Дмитрий Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); balykindn@yandex.ru

Балыкин Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); SNBalykin@yandex.ru

Салтыков Алексей Владимирович – научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); saltykovAV@yandex.ru

Бабошкина Светлана Вадимовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); arsenida@rambler.ru

Горбачев Иван Владимирович – АО «ЦЭНКИ» (Москва, Россия); giv1980@yandex.ru

Пеленева Мария Петровна – ведущий технолог лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул, Россия); kuroi_t@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

MICROELEMENTS IN THE AGRICULTURAL LANDSCAPES OF THE ALTAI REGION

© 2023 A. V. Puzanov ¹, T. A. Rozhdestvenskaya ¹, Y. B. Kirsta ¹, O. A. Elchinina ¹, I. A. Troshkova ¹, D. N. Balykin ¹, S. N. Balykin ¹, A. V. Saltykov ¹, S. V. Baboshkina ¹, I. V. Gorbachev², M. P. Peleneva ¹

¹Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia. E-mail: rtamara@iwep.ru

²Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure NII PM, Moscow, Russia. E-mail: giv1980@yandex.ru

The aim of the study was to assess ecological, biogeochemical and sanitary-hygienic aspects of arable soils of the Altai region and spring wheat grain produced there.

Location and time of the study. The representative study sites of arable land were located in various agroecological zones of the Altai region: Kulundinskaya (dry steppe on chestnut soils of the Kulunda lowland), Rubtsovskoye (arid steppe on chernozems of the southern Priobskoye plateau), Zarinskaya (deciduous forests and steppe meadows on leached chernozems of the Bie-Chumyshskaya elevated plain and podzolized chernozems and dark gray forest soils of the Salair Foothills), Piedmont (meadow steppe on the chernozems of the Prealtai Plain), Priobskaya (split steppe on ordinary chernozems of the Priobsky plateau), Aleiskaya (moderately arid steppe on ordinary chernozems of the Priobsky plateau), Biyskaya (forest steppe on leached and gray forest soils of the Bie-Chumysh Upland). The research was carried out in 2018.

Methods. The content of trace elements in soils and wheat grain was determined by atomic emission and atomic absorption spectrometry according to PND F 14.1:2:4. 139; 140-98; HCAM №450C; ПД 52.24.479-95.

Results. It was found that in the arable soils of the Altai region the elements, necessary for plants, animals, and humans, were contained in optimal quantities (average content of Mn 714, Zn 65, Cu 25.7, Co 12.3 mg/kg), maintaining the normal functioning of living organisms. Most toxic elements were found at the levels, comparable with average concentrations in soils of the world and with the data for uncontaminated soils in West Siberia, not exceeding the maximal permissible concentrations. The average concentrations of Cd, Pb, As and Hg in the studied soils were 0.089, 13.6, 5.0, 0.037 mg/kg, respectively. No biogeochemical province had been identified for any of the elements. The studied soils have a fairly high buffering capacity for heavy metals. The chemical elements' content in the spring wheat grain, the main crop in the region, was close to the corresponding world data for grain. The amount of regulated substances (lead, cadmium, mercury, arsenic) meets domestic standards and the requirements of the Technical Regulations of the Customs Union "On Grain Safety".

Conclusions. The arable soils of the Altai region are not contaminated with heavy metals. Trace elements such as manganese, zinc, copper, cobalt are contained in soils in optimal quantities for living organisms. However, using the grain as monofeed can result in Co deficiency in animals. The content of chemical elements in soils resulted from the initial content of elements in soil-forming parent rocks. The degree of heavy metals' buffering by the studied arable soils, depending of the metal, ranged from medium to high.

Key words: arable soils; grain; chemical elements; ecological and biogeochemical assessment of soils; sanitary and hygienic assessment of soils.

How to cite: Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A., Kirsta Y.B., Elchinina O.A., Troshkova I.A., Balykin D.N., Balykin S.N., Saltykov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V., Peleneva M.P. Microelements in the agricultural landscapes of the Altai region // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(1). e188. DOI: [10.31251/pos.v6i1.188](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.188) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Avtsyn A. P., Zhavoronkov A. A., Rish M. A., Strochkova L. S. Human trace elements: etiology, classification, organopathology. Moscow: Medicine, 1991. 496 p. (in Russian).
- Baboshkina S.V., Gorbachev I.V., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. Aerogenic and water migration of trace elements in technogenic landscapes. *Polzunovskiy vestnik*. 2006. No. 2–1. P. 255–259. (in Russian). https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2006_02_1/pdf/255baboshkina.pdf
- Berseneva M.L. The content of some heavy metals in wheat grain. *Bulletin of Krasnoyarsk agrarian University* 2018. No. 2 (137). P. 266–272. (in Russian). http://www.kgau.ru/vestnik/2018_2/content/40.pdf

- Burlakova L.M., Antonova O.I., Deev N.G., Morkovkin G.G. Ecotoxicants in the system "soil-plants-animals" (on the example of individual zones of the Altai Territory). Barnaul: Altai State Agrarian University, 2001. 236 p. (in Russian).
- Vlasyuk P.A. Biological elements in the vital activity of plants. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Plant Physiology. Kiev: Nauk. Dumka, 1969. 516 p.
- Gamzikova O.I., Barsukova B.C. Change in wheat resistance to heavy metals. Doklady of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 1996. No. 2. P. 13–15. (in Russian).
- Goryunova T.A. Heavy metals in soils and plants of areas of polymetallic deposits. Geochemical ecology and biogeochemical zoning of the biosphere (Dedicated to the 70th anniversary of the organization of the Biogeochemical Laboratory by V.I. Vernadsky and the 100th anniversary of the birth of V.V. Kovalsky). Materials of the Second Russian School. 1999. P. 81–83. (in Russian).
- Ilyin V.B. Evaluation of soil bufferability in relation to heavy metals. Agrokhimia. 1995. No. 13. P. 109–113. (in Russian).
- Ilyin V.B., Syso A.I. Microelements and heavy metals in soils and plants of Novosibirsk region. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2001. 231 p. (in Russian).
- Kovalsky V.V., Andrianova G.A. Microelements in soils of the USSR. Moscow: Nauka Publ., 1970. 179 p. (in Russian).
- Kovalsky V.V., Rajetskaya Yu.I., Gracheva T.I. Microelements in plants and forages. Moscow: Kolos Publ., 1971. 235 p. (in Russian).
- Kondratenko E.P., Konstantinova O.B., Soboleva O.M., Izmulkina E.A., Verbitskaya N.V. Assessment of the level of accumulation of macro- and microelements by grain of winter crops grown in the south-east of Western Siberia. The Journal of Science and Technology of AICis. 2015. Vol. 29. No. 6. P. 18–20. (in Russian).
- Lebedev S.V., Rodionova G.B., Salnikova E.V., Kudryavtseva E.A. Assessment of the content of heavy metals in grain crops in the Orenburg region. Vestnik of the Orenburg State University. 2011. No. 12 (131). P. 407–409. (in Russian).
- Malgin M.A., Puzanov A.V., Yelchinina O.A., Goryunova T.A. Cesium-137 in soils. Nuclear tests, environment and health of the population of the Altai Territory. materials of scientific research. The Committee of the Administration of the Altai Territory for the elimination of the consequences of the long-term effects of nuclear explosions at the Semipalatinsk test site. Barnaul, 1993. P. 52–64. (in Russian).
- Morozova T.S., Kolesnichenko E.Yu. Agri-environmental impact assessment of systematic application of fertilizers on the accumulation of cadmium and lead in the typical chernozem. Innovations in agriculture: problems and prospects. 2019. No. 4 (24). P. 226–235. (in Russian).
- Ovcharenko M.M. Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system. Chemistry in agriculture. 1995. No. 4. P. 8–16. (in Russian).
- Oleshko V.P., Litvintsev P.A., Chasovskikh D.V. The effectiveness of mineral fertilizers on various varieties of spring soft wheat in the conditions of the Altai Ob region. Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2015. No. 6 (128). P. 3–17. (in Russian).
- Pugaev S.V. Content of heavy metals in the grain and winter wheat growing in different environmental conditions. Mordovia University Bulletin. 2013. No. 3–4. P. 89–93. (in Russian).
- Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V. Characteristics of heavy metal migration in the natural-anthropogenic anomalies of the North-Western Altai. Geochemistry International. 2012. Vol. 50. No. 4. P. 358–366.
- Puzanov A.V., Malgin M.A., Goryunova T.A., Yelchinina O.A. Trace elements in soils and plants of the middle part of the Kulunda depression. Heavy metals and radionuclides in the environment. collection of reports of the international scientific and practical conference. Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 2002. P. 134–143. (in Kazakhstan).
- Rassyynov V.A. Agro-ecological zoning based on soil evaluation. Bulletin of Altai State Agrarian University. 2012. No. 12 (98). P. 39–41. (in Russian).
- Rinkis G.Ya., Ramane H.K., Paegle G.V., Kunitskaya T.A. Optimization system and diagnostic methods of mineral nutrition of plants. Riga: Zinatne, 1989. 195 p.
- Samusik E.A., Golovaty S.E. Heavy metals in soils and wheat plants in the area of influence of a building materials enterprise. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2021. No. 4. P. 76–88. (in Belarus).

- Sladkova N.A. Distribution of zinc and cadmium in the peat soil – plant system under the influence of phosphorus and potash fertilizers. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. St. Petersburg, 2016. 180 p. (in Russian).
- Phosphorization of ancient deposits of the Altai-Sayan folded region. Proceedings of the State Research Institute of Mining and Chemical Raw Materials. Vol. 12. Moscow, 1968. P. 44–51. (in Russian).
- Chernov O.V., Gusmanov R.U. Economic and ecological method of evaluation of grain crops in the Republic of Bashkortostan. Agro-food policy in Russia. 2013. No. 2 (14). P. 72–74. (in Russian).
- Shkolnik M.Ya. Trace elements in plant nutrition. Physiology of agricultural plants. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1967. Vol. 2. P. 128–203. (in Russian).
- Yaroshevsky A.A. Abundances of chemical elements in the earth's crust. *Geochemistry International*. 2006. Vol. 44. No. 1. P. 48–55. DOI: 10.1134/S001670290601006X.
- Bouis H. Enrichment of Food Staples through Plant Breeding: a New Strategy for Fighting Micronutrient Malnutrition. *Nutrition Reviews*. 1996. Vol. 54. Iss. 5. P. 131–137. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1996.tb03915.x>.
- Davister A. Studies and Research on Processes for the elimination of cadmium from phosphoric acid. OECD Proceeding / Fertilizers as a Source of Cadmium. IOMC. Paris, 1996. P. 21–30.
- Jensen A., Bro-Rasmussen F. Review of Environmental Fate and Exposure of Cadmium in the European Environment. EEC contract NO. Final report. 1990. No. 5. 122 p.
- Guttieri M.J., Seabourn B.W., Liu C., Baenziger P.S., Waters B.M. Distribution of Cadmium, Iron, and Zinc in Millstreams of Hard Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2015. Vol. 63. Iss. 49. P. 10681–10688. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04337>.
- Europe's Environment, Statistical Compendium for the Dobris Assessment. Brussels. Eurostat, European Commission, 1995. 455 p.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. 548 p.
- Morgunov A., Gomez-Becerra H.F., Abugalieva A.I., Dzhunusova M., Yessimbekova M.A., Muminjanov H., Zelenskiy Y., Ozturk L., Cakmak Y. Iron and Zinc Grain Density in Common Wheat Grown in Central Asia. *Euphytica*. 2007. Vol. 155. P. 193–203. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9321-2>.
- Velu G., Crespo-Herrera L., Huert J., Payne T., Guzman C., Singh R.P. Assessing Genetic Diversity to Breed Competitive Biofortified Wheat with Increased Grain Zn and Fe Concentrations. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. P. 1971. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01971>.
- Wang J.W., Kong F., Liu R., Fan Q., Zhang X. Zinc in Wheat Grain, Processing, and Food. *Frontiers in Nutrition*. 2020. Vol. 7. P. 124. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00124>.

FUNDING

The article was prepared within the framework of the state task of the IWEP SB RAS (project No. FUFZ-2021-0003). The research was supported by RFBR (RFBR grant No. 18-45-220019).

Received 19 October 2022

Accepted 28 March 2023

Published 04 April 2023

About the author(s):

Puzanov Alexander Vasilyevich – Professor, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); puzanov@iwep.ru

Rozhdestvenskaya Tamara Anatolyevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); rtamara@iwep.ru

Kirsta Yuri Bogdanovich – Professor, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); kirsta2007@mail.ru

Yelchinina Olga Anatolyevna – Doctor of Agricultural Sciences, Docent, Gorno-Altai Branch of Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Kyzyl-Ozek, Russia); gafivep@mail.gorny.ru

Troshkova Irina Aleksandrovna – Junior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); egorka_iren@mail.ru

Balykin Dmitry Nikolaevich – Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); balykindn@yandex.ru

Balykin Sergey Nikolaevich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); SNBalykin@yandex.ru

Saltykov Alexey Vladimirovich – Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); saltykovAV@yandex.ru

Baboshkina Svetlana Vadimovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); arsenida@rambler.ru

Gorbachev Ivan Vladimirovich – Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure NII PM, (Moscow, Russia); giv1980@yandex.ru

Peleneva Maria Petrovna – Leading technologist, Laboratory of Biogeochemistry, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia); kuroi_t@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



МИКРОБИОМОРФЫ ДЕРНОВО-СОЛОДИ И ПОГРЕБЁННОЙ ОРГАНО-АККУМУЛЯТИВНОЙ КВАЗИГЛЕЕВАТОЙ ПОЧВЫ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 Н. Ю. Лада , Н. П. Миронычева-Токарева 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: n.lada@issa-siberia.ru

Цель исследования: реконструкция условий формирования почв лесостепной зоны с использованием характеристик почв и микробиоморфного анализа.

Место и время проведения. Изучен педокомплекс берёзового колка в пределах Новосибирской области, представляющий собой современную дерново-солодь, а также погребённую почву. Образцы для исследования отобраны в 2014 г.

Методы. Для выявления особенностей профиля колочного педокомплекса использовали микробиоморфный анализ и сравнительно-аналитические методы почвоведения.

Основные результаты. Выявлены несколько пиков максимального накопления фитоцитов в микробиоморфном профиле дерново-солоди. Наибольшее количество фитоцитов приурочено к элювиальному горизонту. Значительную долю составляли фитоциты степных злаковых растений и удлинённые палочковидные формы двудольных трав (разнотравье, бобовые и др.). Диатомовые водоросли присутствовали во всей толще почвенного профиля, включая погребённую почву; при этом спикулы губок единичны.

Заключение. На первом этапе своего формирования погребённая почва прошла степную стадию развития (преобладание степных злаков) с зарастанием лугово-лесной растительностью на современном этапе развития (увеличение доли лесных и луговых злаков). Наличие панцирей диатомовых водорослей характерно для почв, на поверхности которых происходит застаивание вод. Их накопление связано с сезонным затоплением берёзового колка. Зимой здесь накапливается много снега, весной и в начале лета долго стоит вода. В периоды влажных лет, когда уровень грунтовых вод поднимается и поверхность зарастает тростником, наблюдается появление форм фитоцитов, характерных для тростника, спикул губок и других индикаторов повышенного увлажнения. Таким образом, микробиоморфный состав погребённой органо-аккумулятивной почвы отражает её формирование.

Ключевые слова: почвы; фитоциты; микробиоморфный метод; дерново-солодь; лесостепь; Кулунда

Цитирование: Лада Н.Ю., Миронычева-Токарева Н.П. Микробиоморфы дерново-солоди и погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почвы лесостепи Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. с192. DOI: [10.31251/pos.v6i1.192](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.192)

ВВЕДЕНИЕ

Микробиоморфные комплексы консервируются в почве на протяжении длительного времени и остаются в пределах изучаемой территории. Так как микробиоморфы отражают те условия, в которых сформировалась почва в прошлом, их можно охарактеризовать термином «почва-память» (Targulyan, Sokolova, 1996). Фитоциты, панцири диатомовых водорослей, спикулы губок и другие кремнеземистые образования обладают высокой устойчивостью и сохранностью. В палеоэкологических исследованиях широко применяют фитоцитный анализ, который является частью микробиоморфного метода. Фитоциты, образующиеся в результате окремнения клеток растений, имеют диагностическое значение, и могут использоваться при реконструкции экологических и климатических условий формирования почв (Lu, Liu 2003; Piperno, 2006; Гольева, 2008б; Lisztes-Szabó et al., 2014; Blinnikov et al., 2021).

Исследование фитоцитного состава профилей различных фитоценозов степных и таёжных почв Западной Сибири в различные годы проводили Г.В. Добровольский и С.А. Шоба (1978), Д.А. Гаврилов и С.В. Лойко (2016), М.Ю. Соломонова с соавторами (2018). В луговых почвах Среднеамурской низменности на основании анализа валового состава и микробиоморфного анализа Г.В. Харитонов с соавторами (2013) выявили преобладание луговых форм фитоцитов злаков по всему почвенному профилю. Фитоцитный состав лесостепи России изучали достаточно подробно в европейской части (Gol'eva, Aleksandrovskii, 1999). Фитоцитный состав чернозёмов

лесостепной зоны юга Западной Сибири описан в наших работах (Лада, 2017а, б). Однако фитолитный состав солодей и осолоделых почв исследован только в почвах европейской части России (Гольева, 2008а).

Целью данного исследования являлась реконструкция условий формирования почв лесостепной зоны с использованием характеристик почв и микробиоморфного анализа Кулундинской лесостепи на примере дерново-солоди и выявление особенностей распределения фитолитов по профилю.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лесостепь Кулундинской равнины является одним из самых сложных регионов Западно-Сибирской низменности с точки зрения исследования эволюции почв и почвенного покрова. Для данной территории свойственно чередование высоких грив и разделяющих их понижений и микрозападин (Абрамович, 1960).

Общей тенденцией пространственного распределения почв в озёрных впадинах является экспозиционная дифференциация ксероморфных и мезоморфных почв на склонах и смена их почвами гидроморфного ряда на нижних гипсометрических уровнях (Хмелев, Танасиенко, 2009). На протяжении десятилетий ведутся дискуссии по поводу происхождения, взаимовлияния, направленности и стадильности развития лесостепных почв (Тюрин, 1965; Ахтырцев, 1992; Aleksandrovskii et al., 1997).

В отрицательных формах рельефа – блюдцеобразных западинах, занятых берёзовыми и берёзово-осиновыми колками или же луговой и болотной растительностью формируются педокомплексы солоди. Почвообразующими породами служат покровные суглинки или делювиальные отложения (Угланов, 1981). Установлено, что почвы микрозападин юга Западной Сибири формируются в сложных динамических условиях (Сапрыкин и др., 2020). Одним из свидетельств этого является наличие погребённых почв.

Исследования проводили на территории Северо-Кулундинской озёрно-аллювиальной равнины, расположенной в южной части Западно-Сибирской низменности в пределах Обь-Иртышского междуречья. Климат местности характеризуется как умеренно тёплый и недостаточно увлажнённый. Среднегодовое количество выпадающих осадков составляет 270–300 мм. Территория отличается недостаточным увлажнением (коэффициент увлажнения равен 0,7–0,8), высоким дефицитом влажности воздуха летом и частыми засухами и суховеями (Почвы..., 1966).

Объект исследования – педокомплекс дерново-солоди на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве представлен разрезом с координатами 53°54'17,96" с.ш. и 77°09'09,68" в.д., располагающийся в микропонижении берёзового колка (рис. 1).

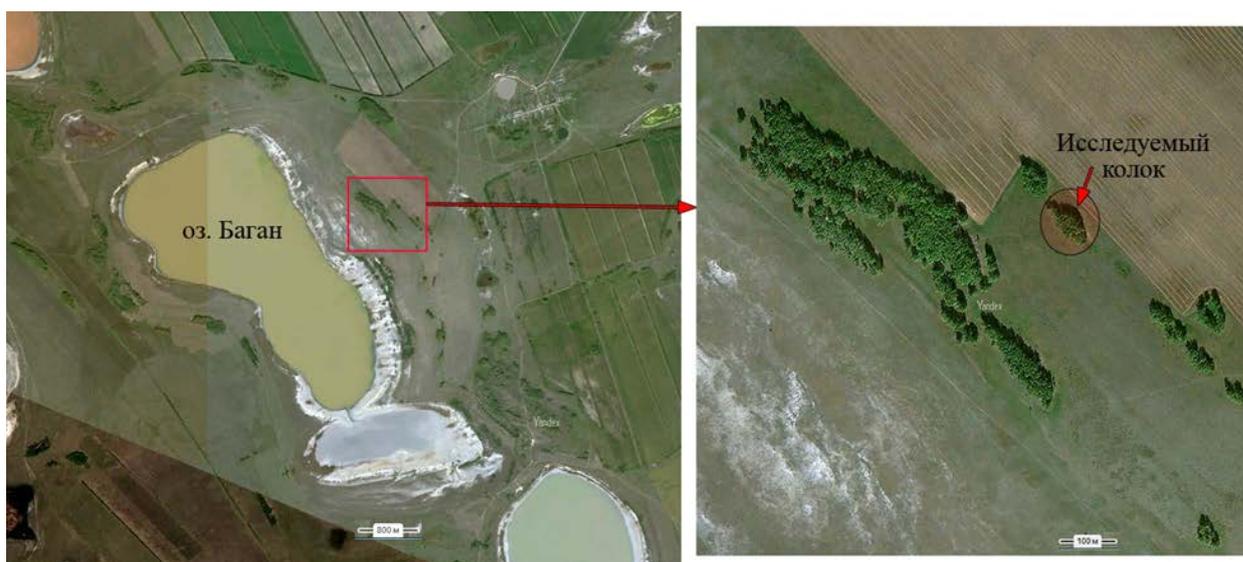


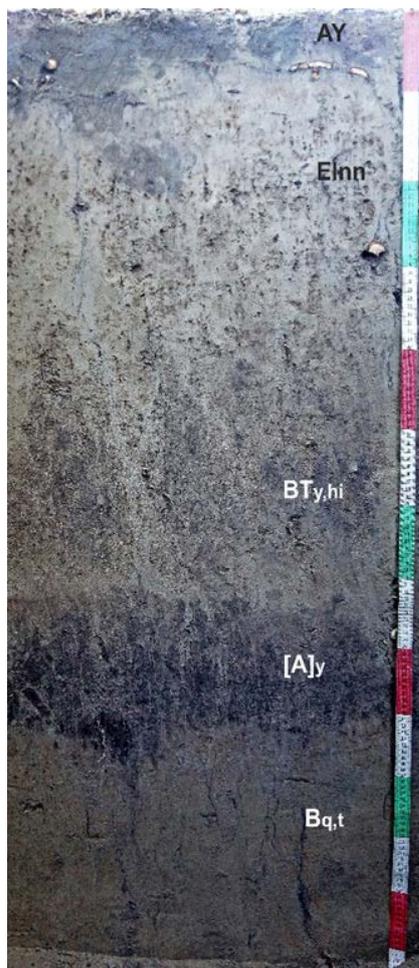
Рисунок 1. Месторасположение объекта исследования.

Древесный ярус представлен берёзой повислой (*Betula pendula*), сомкнутость крон составляет 0,5–0,2. Кустарниковый ярус представлен небольшими куртинами шиповника (*Rosa acicularis*), спиреи (*Spiraea crenata*), кизильника (*Cotoneaster melanocarpus*). Проективное покрытие травяного яруса колеблется в пределах 50–60%, основу травостоя образуют злаки: вейник наземный (*Calamagrostis epigeios*), коротконожка перистая (*Brachypodium pinnatum*) мятлик луговой (*Poa pratensis*), кострец безостый (*Bromopsis inermis*), горошек тонколистный (*Vicia tenuifolia*) и осока ранняя (*Carex praecox*).

На рисунке 2 представлено фото профиля дерново-солоди сегрегационно-отбелённой (конкреционной) на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве и дано его морфологическое описание (Классификация..., 2004), проведённое Б.А. Смоленцевым в 2014 году.

Для аналитических исследований образцы почв отбирали из профиля колонкой снизу вверх по генетическим горизонтам. Для микробиоморфного анализа отбор проб производили через каждые 10 см с соблюдением границ горизонтов. Образцы укладывали в полиэтиленовые пакеты с пометкой на этикетке места и даты отбора, номера почвенного разреза, горизонта и глубины. Высушенную почву растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 или 0,25 мм (в зависимости от предполагаемого анализа).

Показатели химического состава в почвенных образцах определили по стандартным методикам: содержание органического углерода – мокрым сжиганием в сернокисло-хромовой смеси по методу И.В. Тюрина; рН водной суспензии – потенциометрическим методом; количество CO₂ карбонатов – методом Шейблера с помощью кальциметра по прописи, представленной А.В. Петербургским (Аринушкина, 1970); гранулометрический состав – по Н.А. Качинскому (1958). Содержание обменных катионов (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) в почвенных образцах определили по методу Каппена (ГОСТ 27821-2020), полученные значения рассчитывали на воздушно-сухую навеску.



AY (0–8) – серогумусовый (дерновый) горизонт. Серый, свежий, суглинистый, мелко-комковатый, слабо уплотнен, сильно переплетён корнями растений, много корней древесной растительности диаметром до двух см. Переход ясный по окраске, граница волнисто-карманная.

Elnn (8–44) – элювиальный (осолоделый) горизонт. На общем белёсом фоне мелкие чёрно-ржавые пятнышки (3–5 мм). Свежий, супесчаный. Комковато-плитчатый, наблюдается горизонтальная делимость агрегатов. Слабо уплотнен. Новообразования в виде обильной кремнезёмистой присыпки и железисто-марганцевых конкреций в виде дробовин размером до 5 мм в диаметре, занимающих более 20 % площади горизонта. Встречаются корни древесной растительности и мелкие корни травянистой. Отдельные корни уходят в нижние горизонты, вертикально пронзают их. По ходам корней вниз проникает кремнезёмистая присыпка, образуя белёдые затёки и языки. Переход заметный по окраске, граница перехода волнисто-затёчная.

BTy,hi (44–73) – текстурный горизонт. Окраска неоднородная пятнистая: на общем буром фоне серые пятна и вертикально вниз направленные белёдые языки шириной до 7 см. Свежий, лёгкий суглинок, непрочной комковато-ореховатой структуры, уплотнён. Обильная кремнезёмистая присыпка в белёсых затёках и языках. Гумусовая пропитка некоторых агрегатов. Переход ясный по окраске и гранулометрическому составу, граница перехода ровная.

[A]y (73–92) – погребённый гумусовый горизонт. Окраска неоднородная, очень пестрая, создаваемая узором тёмно-серых пятен с многочисленными белёсыми прожилками. Увлажнён, тяжёлый суглинок. Крупичато мелко-комковатый, уплотнён, липкий, корни растений, кремнезёмистая присыпка по языкам и прожилкам. Переход ясный по окраске, граница перехода волнисто-языковатая.

[Bq,t] (92–120) – бурый с ржавыми и оливковыми пятнами, серыми вертикальными узкими прожилками, влажный, липкий, средний суглинок, комковатый. Новообразования в виде пятен окисного и закисного железа. Плёнки гумуса и полугорных окислов. Редкие корни растений. Граница перехода постепенная по окраске, слабо волнистая.

[BCsa] (120–150) – палевый, пронизан узкими вертикальными серыми прожилками, средний суглинок сильно опесчаненный, влажный. Структура не прочно не ясно комковатая. Единичны корни растений. В нижней части наблюдается слабое вспучивание от 10% HCl.

Фото Б.А. Смоленцева

Рисунок 2. Профиль дерново-солоди на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве и его морфологическое описание.

Для выявления изменений растительного покрова в условиях почвообразования осолоделых почв использовали микробиоморфный метод, включающий в себя фитоолитный метод, метод диатомовых водорослей и спикул губок, проводимых по единой методике (Гольева, 2008а). Так как микробиоморфы являются индикаторами особенностей функционирования почв, не влияя на функционирование вмещающей их среды (Гольева, 2001), их можно использовать для определения экологических условий формирования почвенного покрова изучаемой территории.

Брали навеску нерастёртой почвы, кипятили в 10% HCl. Затем отмучивали (10–20 повторностей) до полного удаления илистой фракции. Пылеватую фракцию высушивали и центрифугировали в тяжелой жидкости (KI+CdI, $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$) при 1000 об/мин. Далее высушенную пробу исследовали под микроскопом ($\times 400$) (МИКМЕД-6, «ЛОМО», Россия). Микробиоморфы определяли и подсчитывали с использованием Международного кода номенклатуры фитоолитов (Neumann et al., 2019) и экологической классификации А.А. Гольевой (2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели гранулометрического и химического состава почвы. Дерново-солодь сегрегационно-отбелённая (конкреционная) на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве сформирована в центре микрозападины берёзового колка. Гранулометрический состав исследованного профиля показывает его двучленное строение. Верхняя часть профиля, представленная дерново-солодью, имеет более легкий гранулометрический состав по сравнению с погребённым профилем органо-аккумулятивной почвы. Гранулометрический состав дерново-солоди изменяется от среднесуглинистого в поверхностном горизонте до супесчаного – в элювиальном. Преобладающими фракциями являются пылеватая и песчаная. На долю ила приходится 6,6–13,4%. Гранулометрический состав погребённой почвы средне- и тяжелосуглинистый. Последний наблюдается в органо-аккумулятивном горизонте, где преобладают пылеватая и илистая фракции. Вниз по профилю погребённой почвы значения илистой фракции изменяются незначительно, но резко снижается количество пыли и растёт доля песка.

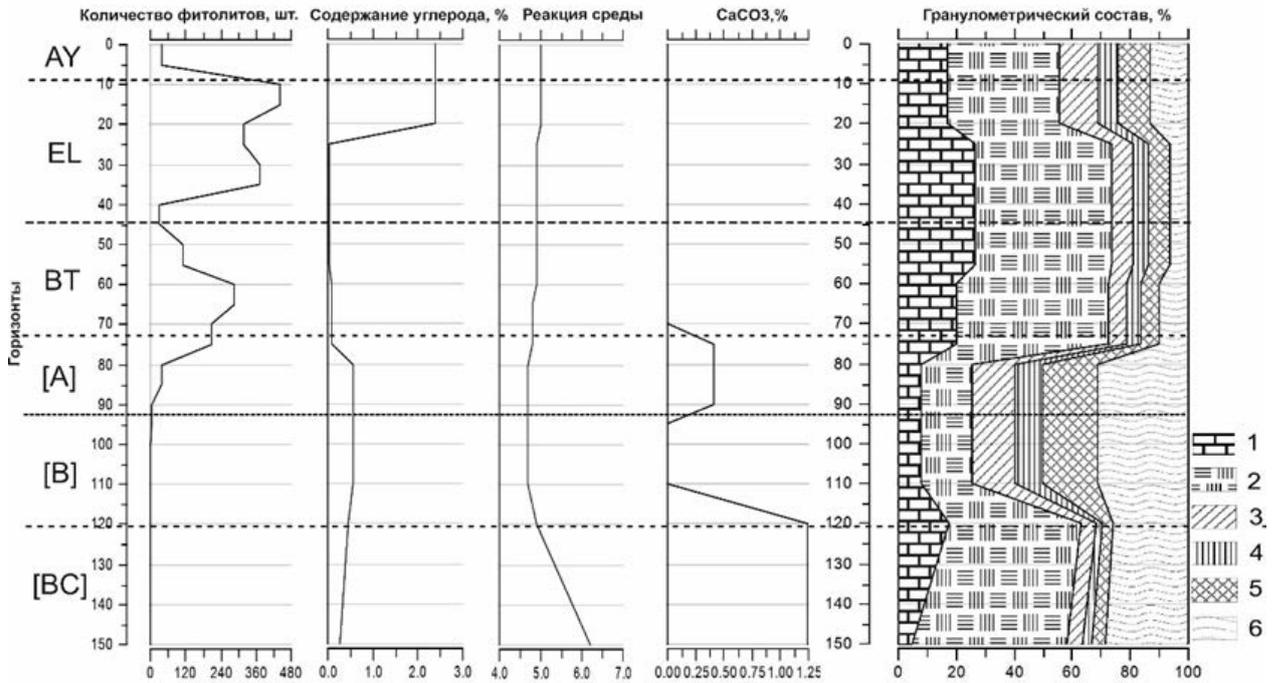
С результатами гранулометрического состава согласуются химические свойства почвы. В распределении органического углерода по профилю дерново-солоди зафиксировано несколько пиков наибольшего его накопления: в серогумусовом горизонте – 2,4% с уменьшением вниз по профилю до 0,26–0,45%, затем некоторое увеличивается до 0,56% в погребённом гумусовом горизонте с последующим снижением. Реакция среды по профилю среднекислая ($\text{pH}_{\text{вод}} = 4,7\text{--}5,0$); слабокислая – в самом низу почвенного профиля ($\text{pH}_{\text{вод}} = 6,2$) (рис. 3). В составе обменных оснований преобладает кальций. Сумма обменных катионов возрастает с 5,1 мг-экв в текстурном горизонте до 19,2 мг-экв/100 г почвы в переходном к почвообразующей породе горизонте ВС (140–150 см) (таблица). Повышенное содержание обменного натрия во всех горизонтах исследованного профиля свидетельствует о том, что погребённая и дневная почвы развиваются по солонцовому типу почвообразования.

Таблица

Показатели химического состава дерново-солоди

Горизонт	Глубина, см	Обменные катионы			Сумма обменных катионов	Na ⁺ , % от суммы обменных катионов
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺		
		мг-экв/100 г почвы				
AУ	0–8	8,76	1,97	0,37	11,1	3,3
ELnn	8–44	3,42	1,77	0,33	5,5	6,0
BТу,hi	44–73	3,00	1,77	0,37	5,1	7,2
[A]y	73–92	10,2	6,00	1,03	17,2	6,0
[Bq,t]	92–120	9,84	5,12	0,87	15,8	5,5
[BCca]	120–150	12,31	5,81	1,03	19,2	5,4

Микробиоморфный анализ почвы. По микробиоморфным данным в серогумусовом горизонте АУ солоди (0–8 см) доминируют степные злаки (42%) (рис. 4). Это соответствует продуцируемым фитолитам в составе современного растительного сообщества. Подобные морфотипы формируются преимущественно у ксерофитов и мезофитов, отмечены в фитолитных комплексах степных злаков (Сперанская и др., 2016, 2018; Лада, Гаврилов, 2016).



Фракции гранулометрического состава, мм: 1 – 1–0,25; 2 – 0,25–0,05; 3 – 0,05–0,01; 4 – 0,01–0,005; 5 – 0,005–0,001; 6 – <0,001.

Рисунок 3. Количество фитолитов, содержание органического углерода, реакция среды, количество карбонатов и гранулометрический состав в горизонтах дерново-солоди на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве.

Также в верхних слоях профиля содержится 10% крупных форм фитолитов (BULLIFORM FLABELLATE), являющихся диагностическими морфотипами для тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), выступающего в качестве индикатора повышенного увлажнения. В существующем на настоящий момент времени растительном сообществе присутствует тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) в небольшом количестве. Обнаружены диатомовые водоросли – 7% от общего числа микробиоморф. Наличие диатомовых водорослей говорит о повышенном гидроморфизме в верхних горизонтах дерново-солоди, что типично для почв микростади в определённые периоды года (Сапрыкин, 2021).

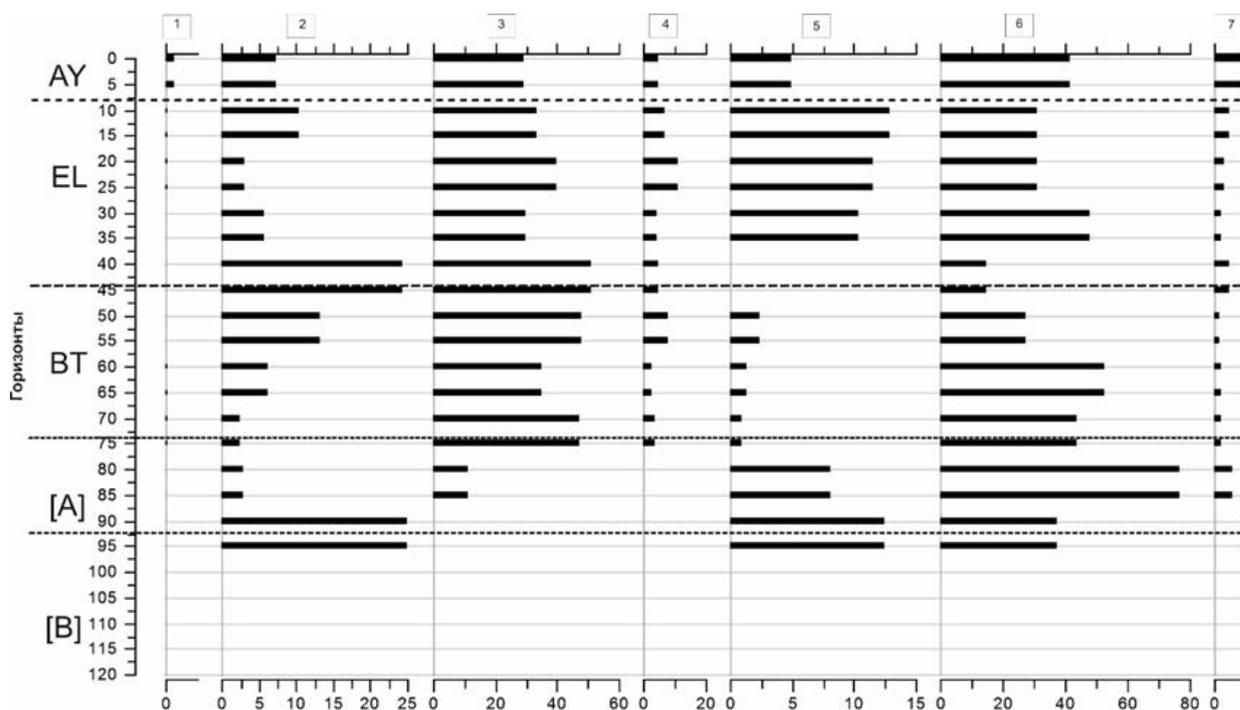


Рисунок 4. Распределение фитоцитов в дерново-солоди на погребённой органо-аккумулятивной квазиглееватой почве (%): 1 – спикулы губок, 2 – диатомовые водоросли, 3 – двудольные (ELONGATE ENTIRE – название по ICPN.2.0, здесь и далее в скобках), 4 – лесные злаки (ACUTE VULBOSUS with large base), 5 – луговые (ACUTE VULBOSUS with small base, VILOBATE, ELONGATE SINUATE, POLYLOBATE), 6 – степные (RONDEL conical, RONDEL trapeziform), 7 – тростник (BULLIFORM FLABELLATE).

В элювиальном EL (8–44 см) горизонте накопление фитоцитов максимальное. По верхней его границе фитоцитный состав по сравнению с вышележащим горизонтом практически не меняется, лишь увеличилось количество луговых (ACUTE VULBOSUS with small base) и лесных злаков (ACUTE VULBOSUS with large base). Фитоциты ACUTE VULBOSUS формируются в значительном числе у мезофильных злаков (Гольева, 2001; Сперанская и др., 2018, Solomonova et al., 2018). В нижней части горизонта EL происходит обеднение фитоцитного состава, а 24% встреченных микробиоморф составляют диатомовые водоросли. Следовательно, имело место сильное увлажнение на границе с текстурным горизонтом.

В текстурном горизонте BT происходит количественное возрастание фитоцитов. Количество удлиненных форм фитоцитов составляет 35–48% от всех выделенных форм. Данная форма является основным морфотипом двудольных растений (Гольева, 2001). А также они образуются у многих растений различных семейств (Wallis, 2001; Лада, Гаврилов, 2016). Доля фитоцитов, относящихся к лесным злакам, снижается до полного отсутствия в нижних горизонтах профиля.

В гумусовом погребённом горизонте зафиксировано резкое снижение количества фитоцитов. Доминируют формы фитоцитов, относящихся к степным злакам, составляющие 73%. Отсутствуют фитоциты лесных злаков. Возможно, в прошлые стадии почвообразования в составе растительности доминировали представители степных сообществ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ценотического состава фитоцитов и соотношения форм по профилю дерново-солоди позволил оценить особенности его формирования. В верхнем серогумусовом горизонте (0–8 см) доминируют фитоциты степных злаков, а также формы двудольных трав. Зафиксированы крупные формы фитоцитов тростника.

Элювиальный горизонт (8–44 см) разделяется на два слоя. На глубине 10–15 см фиксируется пик наибольшего накопления микробиоморф в профиле исследуемой почвы. Возрастает количество форм фитоцитов лесных и луговых злаков. На глубине 25 см количество диатомовых водорослей снижается на фоне общего уменьшения количества микробиоморф. Ниже, на глубине

35 см, фиксируется возрастание количества степных форм при снижении форм двудольных трав и лесных злаков.

В текстурном горизонте на глубине 65 см отмечается третий пик максимального накопления фитолитов, 50% из всех форм фитолитов составляют степные злаки. Сравнительный анализ микробиоморфных профилей дерново-солоди, чернозёмов, стратозёмов и солонцов на исследуемой территории (Лада, Смоленцев, 2015; Лада, 2017б) показал, что изученные почвы имеют общий набор морфотипов фитолитов. В их гумусовых горизонтах преобладают фитолиты степных злаков. Пик распределения микробиоморф отмечается на глубине 10–15 см. Это объясняется тем, что проникновение фитолитов в почву с глубиной связано с её гранулометрическим составом. Предположительно, чем легче гранулометрический состав почв, тем глубже проникновение фитолитов, в более тяжёлых горизонтах микробиоморфы выносятся в меньшей степени (Гольева, 2001; Аристовская, Кутузова, 1968).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На разной глубине профиля выявлены различия по ряду специфических морфотипов фитолитов, необходимых для расшифровки почвенных фитолитных спектров. Общее количество микробиоморф вниз по профилю снижается неравномерно. Наибольшее количество фитолитов в дерново-солоди приурочено к элювиальному горизонту. Несколько максимумов в почвенном профиле формировались, когда имело место регулярное поступление органического материала (травяного и листового опада) на поверхность с последующим его погребением и консервацией.

Значительное количество обнаруженных форм составляют фитолиты двудольных трав (разнотравье, бобовые и др.). Увеличение длинных частиц (ELONGATE ENTIRE) в спектрах связано чаще всего с увеличением количества разнотравья в исходном сообществе (Гольева, 2001). Что отражает наибольшую роль этих растений в современном растительном покрове осолоделых почв, а также в составе фитоценозов в прошлые стадии осадконакопления и почвообразования.

Полученные результаты гранулометрического и химического состава фиксируют изменения в погребённом гумусовом горизонте изученного почвенного профиля. Зафиксированы возрастающие показатели в распределении органического углерода в этом горизонте и обменных оснований в нижней части профиля, что согласуется с данными фитолитного анализа почвы.

Микробиоморфный состав погребённой органо-аккумулятивной почвы показал, что на первом этапе почва прошла степную стадию развития (преобладание степных злаков) с зарастанием лугово-лесной растительностью на современном этапе (увеличение доли лесных и луговых злаков). Наличие панцирей диатомовых водорослей характерно для почв, на поверхности которых происходит застаивание вод. В нашем случае диатомовые водоросли присутствуют по всей толще почвенного профиля. Их накопление связано с сезонным затоплением берёзового колка. Зимой здесь накапливается много снега, весной и в начале лета долго стоит вода. В периоды влажных лет, когда уровень грунтовых вод поднимается, наблюдается появление форм фитолитов, характерных для тростника, спикул губок и других индикаторов повышенного увлажнения.

Состав микробиоморф и их распределение по профилю позволяют предположить, что причиной смены условий почвообразования на фоне изменения условий осадконакопления являлись сезонные изменения, во время которых происходило переувлажнение слоёв почвы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамович Д.И. Воды Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1960. 214 с.
- Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Издание 2-е, перераб. и доп. Москва: Издательство Московского университета, 1970. 487 с.
- Аристовская Т.В., Кутузова Р.С. О микробиологических факторах мобилизации кремния из труднорастворимых природных соединений // Почвоведение. 1968. № 12. С. 59–66.
- Ахтырцев Б.П. К истории формирования серых лесных почв Среднерусской лесостепи // Почвоведение. 1992. № 3. С. 5–18.

- Гаврилов Д. А., Лойко С. В. Фитолиты почв темнохвойных гемибореальных лесов юго-востока Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2016. Вып. 1 (3). С. 41–53.
- Гольева А.А. Фитолиты и их информационная роль в изучении природных и археологических объектов. Москва-Сыктывкар-Элиста: Полтекс, 2001. 140 с.
- Гольева А.А. Микробиоморфные комплексы природных и антропогенных ландшафтов: генезис, география, информационная роль. Москва: Издательство ЛКИ, 2008а. 240 с.
- Гольева А.А. Микробиоморфная память почв // Память почв: Почвы как отражение биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий. Москва: Изд-во ЛКИ, 2008б. С. 500–529.
- ГОСТ 27821-2020. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Москва: Стандартинформ, 2020. 9 с.
- Добровольский Г. В., Шоба С. А. Растровая электронная микроскопия почв. Москва: МГУ, 1978. 132 с.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Москва: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Лада Н.Ю. Условия формирования микробиоморфных спектров степных приозерных ландшафтов северной Кулунды // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2016. Т. 7. № 1. С. 85–92.
- Лада Н.Ю. Микробиоморфные комплексы естественных и агрогенно-преобразованных почв приозерных ландшафтов кулундинской степи (Западная Сибирь). Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2017а. 20 с.
- Лада Н.Ю. Диагностика почв с различным хозяйственным использованием по данным фитолитного анализа // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции (Барнаул, 5–8 июня 2017 г.) / А.И. Шмаков, Т.М. Копытина (отв. ред.). Барнаул: Издательство АлтГУ, 2017б. С. 205–208.
- Лада Н.Ю., Смоленцев Б.А. Фитолитный анализ генезиса стратозема светлогумусового (на примере приозерной территории озера Баган) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 1 (29). С. 16–27. DOI: [10.17223/19988591/29/2](https://doi.org/10.17223/19988591/29/2).
- Лада Н.Ю., Гаврилов Д.А. Анализ фитолитного состава основных растений степных экосистем Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2016. № 2 (34). С. 53–68. DOI: [10.17223/19988591/34/4](https://doi.org/10.17223/19988591/34/4).
- Почвы Новосибирской области / под ред. Р.В. Ковалёва. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1966. 422 с.
- Сапрыкин О.И. Разнообразие почв микрозападин юго-восточной части Западной Сибири. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2021. 19 с.
- Сапрыкин О.И., Конарбаева Г.А, Смоленцев Б.А. Сравнительная характеристика агрохимических свойств почв в агроландшафтах с западным микрорельефом // Агрохимия. 2020. № 10. С. 15–19.
- Соломонова М.Ю., Сперанская Н.Ю., Силантьева М.М., Елесова Н.В. Фитолиты лесов Северного Алтая // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2018. № 17. С. 309–312.
- Сперанская Н.Ю., Соломонова М.Ю., Гейнрих Ю.В. Диагностические формы фитолитов луговых и степных фитоценозов Алтайского края // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2016. Т. 7. № 1 (13). С. 148–154.
- Сперанская Н. Ю., Соломонова М. Ю., Силантьева М. М., Гейнрих Ю. В., Блинников М. С. Фитолиты злаков Северного Алтая // Ukrainian Journal of Ecology. 2018. № 8 (1). С. 762–771. DOI: [10.15421/2018_278](https://doi.org/10.15421/2018_278).
- Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. Москва: Наука, 1965. С. 190–208.
- Угланов И.Н. Мелиорируемая толща почв и пород юга Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1981. 193 с.
- Харитоновна Г.В., Манучаров А.С., Матюшкина Л.А., Стенина А.С., Тюгай З., Коновалова Н.С., Комарова В.С., Чижикова Н.П. Биоморфный кремнезем в луговых почвах Среднеамурской низменности // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 1. С. 37–45.
- Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.

- Aleksandrovskii A.L., Gol'eva A.A., Gunova V.S. Reconstruction of paleolandscape conditions of the early scythian soils in the Stavropol region // *Eurasian Soil Science*. 1997. Vol. 30. No. 5. P. 461–471.
- Blinnikov M.S., Hoffman B.R., Salova Yu.A.. Modern analog assemblages of phytoliths under various plant communities of the middle Volga and their applicability for archaeological reconstructions // *The Volga river region archaeology*. 2021. Vol. 4 (38). P. 217–234. DOI: [10.24852/pa2021.4.38.217.234](https://doi.org/10.24852/pa2021.4.38.217.234).
- Gol'eva A.A., Aleksandrovskii A.L. The application of phytolith analysis for solving problems of soil genesis and evolution // *Eurasian Soil Science*. 1999. Vol. 32. No. 8. P. 884–891.
- Lisztes-Szabó Z., Kovács S., Pető Á. Phytolith analysis of *Poa pratensis* (Poaceae) leaves // *Turkish Journal of Botany*. 2014. No. 38. 13 p.
- Lu H., Liu K.-b. Phytoliths of common grasses in the coastal environments of southeastern USA // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2003. No. 58. P. 587–600.
- Neumann K., Strömberg C.A.E., Ball T., Albert R.M., Vrydaghs L., Cummings L.S. International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0. // *Annals of Botany*. 2019. Vol. 124(2). P. 189–199. DOI: [10.1093/aob/mcz064](https://doi.org/10.1093/aob/mcz064).
- Piperno D.R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. Lanham: Alta Mira Press, 2006. 237 p.
- Targulian V.O., Sokolova T.A. Soil as a biotic/abiotic natural system: a reactor, memory, and regulator of biospheric interactions // *Eurasian Soil Science*. 1996. Vol. 29. No. 1. P. 30–41.
- Solomonova M. Y., Speranskaya N. Y., Blinnikov M. S., Kharitonova E. Y., Pechatnova Y. V., Silantieva M. M. Cyperaceae Juss. and Juncaceae A. Rich ex Kunt. phytoliths of Western Siberia // *Ukrainian Journal of Ecology* 2018. No. 8 (4). P. 332–334.
- Wallis L.A. Environmental history of northwest Australia based on phytolith analysis at Carpenter's Gap 1 // *Quaternary International*. 2001. Vol. 83–85. P. 103–117.

Поступила в редакцию 21.11.2022

Принята 22.02.2023

Опубликована 01.03.2023

Сведения об авторах:

Лада Наталья Юрьевна – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); n.lada@issa-siberia.ru

Мироснычева-Токарева Нина Петровна – кандидат биологических наук, доцент, заведующая лабораторией биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); mirtok@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

MICROBIOMORPHS OF THE SODDY SOLODIC PLANOSOL AND BURIED ORGANO-ACCUMULATIVE QUASI-CLAY SOIL IN THE FOREST-STEPPE OF WEST SIBERIA

© 2023 N. Y. Lada , N. P. Mironycheva-Tokareva 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: lada@issa-siberia.ru

The purpose of the study. Reconstruction of the conditions of solodic soils formation in the forest-steppe zone using soil characteristics and microbiomorphic analysis.

Location and time of the study. The study was conducted in the forest-steppe zone (Kulunda, Novosibirsk region, Russia) where in the birch grove a pedocomplex consisting of a surface turf soddy soil and a buried soil. Soil samples were collected in 2014.

Methods. Phytolith and some other microbiomorphs morphology, composition and relative abundance were analysed and their soil profile changes accessed.

Results. Several peaks of the maximum accumulation of phytoliths were found in the microbiomorphic profile of the soddy solodic planosol. The largest number of phytoliths was found in the eluvial horizon. Phytoliths of

steppe gramineous plants and elongated forms of dicotyledonous grasses (forbs, legumes, etc.) accounted for a significant proportion. Diatoms were present throughout the entire soil profile; sponge spicules were rare.

Conclusion. *At the first stage of its formation the buried soil went through the steppe stage of development (predominance of steppe grasses), followed by overgrowing of the steppe soil with meadow-forest vegetation at the current stage (increased share of forest and meadow grasses). The presence of diatomic shells is typical for soils experiencing recurrent (seasonal) flooding of the birch groves: a lot of snow usually accumulates there, and after the snowmelt water stays for a long time in summer. During wet years, when the groundwater level rises and merges with the surface waters, the phytolith forms characteristic of reeds, sponge spicules, and other indicators of increased moisture increased. Thus, the microbiomorphic composition of the buried organo-accumulative soil reflected its formation.*

Key words: *soils; phytoliths; microbiomorphic method; sodic planosol; forest-steppe; Kulunda*

How to cite: *Lada N.Y., Mironycheva-Tokareva N.P. Microbiomorphs of the sodic sodic planosol and buried organic-accumulative quasi-clay soil of West Siberia // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(1). e192. DOI: 10.31251/pos.v6i1.192 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 121031700309-1.

REFERENCES

- Abramovich D.I. Waters of the Kulunda steppe. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1960. 214 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soils. 2nd edition, revised and supplementary. Moscow: Moscow University Press, 1970. 487 p. (in Russian).
- Aristovskaya T.V., Kutuzova R.S. On microbiological factors of silicon mobilization from difficult-to-dissolve natural compounds. *Pochvovedenie*. 1968. No. 12. P. 59–66. (in Russian).
- Akhtyrtsev B.P. On the history of the formation of gray forest soils of the Central Russian forest-steppe. *Pochvovedenie*. 1992. No. 3. P. 5–18. (in Russian).
- Gavrilov D.A., Loiko S.V. Phytoliths in soils of hemiboreal dark coniferous forest in southeast of West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2016. No. 1 (3). P. 41–53. (in Russian).
- Gol'eva A.A. Phytoliths and their information role in natural and archeological objects. Moscow-Sykt'yvkar-Elista, Polteks Publ., 2001. 140 p. (in Russian).
- Gol'eva A.A. Microbiomorphic complexes of natural and anthropogenic landscapes: genesis, geography, informational role. Moscow: LKI Publ., 2008a. 240 p. (in Russian).
- Gol'eva A.A. Microbiomorphic soil memory. In book: *Soil memory: Soils as a reflection of biosphere-geosphere-antroposphere Interactions*. Targulian V.O., Goryachkin S.V. (editors). Moscow: LKI Publ., 2008b. P. 500–529. (in Russian).
- GOST 27821-2020. Soils. Determination of base absorption sum by Kappen method. Moscow: Standartinform, 2020. 9 p. (in Russian).
- Dobrovolsky G.V., Shoba S.A. Scanning electron microscopy of soils. Moscow: MSU Publ., 1978. 132 p. (in Russian).
- Kachinsky N.A. Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1958. 191 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of Soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Lada N.Yu. Conditions of microbiomorphic spectrum formation in steppe littoral catena of Northern Kulunda. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2016. Vol. 7. No.1. P. 85–92. (in Russian).
- Lada N.Yu. Microbiomorphic complexes of natural and agrogenically transformed soils of lakeside landscapes of the Kulunda steppe (Western Siberia). Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2017a. 20 p. (in Russian).
- Lada N.Yu. The diagnostic of soils with different agriculture use according to phytolith analysis. In book: *Problems of Botany of South Siberia and Mongolia: Proceedings of the Scientific Conference XVI International* (Barnaul,

- June 5–8, 2017). A.I. Shmakov, T.M. Kopytin (ed.). Barnaul: Publishing House of AltSU, 2017. P. 205–208. (in Russian).
- Lada N.Yu., Smolentsev B.A. Phytolith analysis of light-humus stratozem genesis (the case of the Bagan lakeside territory). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2015. No. 1 (29). P. 16–27. DOI: [10.17223/19988591/29/2](https://doi.org/10.17223/19988591/29/2). (in Russian).
- Lada N.Yu., Gavrilov D.A. Analysis of phytolith composition of the main plant steppe ecosystems of Western Siberia. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2016. No. 2 (34). P. 53–68. DOI: [10.17223/19988591/34/4](https://doi.org/10.17223/19988591/34/4). (in Russian).
- Soils of the Novosibirsk region / R.V. Kovalev (ed.). Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 1966. 422 p. (in Russian).
- Saprykin O.I. Soil diversity in microdepressions of the southeastern part of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2021. 19 p. (in Russian).
- Saprykin O.I., Konarbaeva G.A., Smolentsev B.A. Comparative Description of Soil Agrochemical Properties in agricultural landscapes with microdepressions. *Agriculture*. 2020. No. 10. P. 15–19. (in Russian).
- Solomonova M.Yu., Speranskaya N.Yu., Silantieva M.M., Yelesova N.V. Phytoliths of forests Northern Altai. *Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia*. 2018. No. 17. P. 309–312. (in Russian).
- Speranskaya N.Yu., Solomonova M.Yu., Geynrich Yu.V. The soil phytoliths analysis of meadow and steppe phytocenoses in Altai region. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2016. Vol. 7. No. 1 (13). P. 148–154. (in Russian).
- Speranskaya N.Yu., Solomonova M.Yu., Silantieva M.M., Geynrich Yu.V., Blinnikov M.S. Cereal phytoliths of Northern Altai. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. No. 8 (1). P. 762–771. DOI: [10.15421/2018_278](https://doi.org/10.15421/2018_278).
- Tyurin I.V. Soil organic matter and its role in fertility. Moscow: Nauka Publ., 1965. P. 190–208. (in Russian).
- Uglanov I.N. Reclaimed strata of soils and rocks in the south of Western Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1981. 193 p. (in Russian).
- Kharitonova G.V., Manucharov A.S., Matyushkina L.A., Stenina A.S., Tyugay Z., Konovalova S., Komarova V.S., Chizhikova N.P. Biomorphal silica in meadow soils of med-lowland. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie (Bulletin of Moscow State University)*. 2013. No. 1. P. 37–45. (in Russian).
- Khmelev V.A., Tanasienko A.A. Land resources of Novosibirsk region and ways of their rational use. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2009. 349 p. (in Russian).
- Aleksandrovskii A.L., Gol'eva A.A., Gunova V.S. Reconstruction of paleolandscape conditions of the early scythian soils in the Stavropol region. *Eurasian Soil Science*. 1997. Vol. 30. No. 5. P. 461–471.
- Blinnikov M.S., Hoffman B.R., Salova Yu.A. Modern analog assemblages of phytoliths under various plant communities of the middle Volga and their applicability for archaeological reconstructions. *The Volga river region archaeology*. Vol. 4 (38). 2021. P. 217–234. DOI: [10.24852/pa2021.4.38.217.234](https://doi.org/10.24852/pa2021.4.38.217.234).
- Gol'eva A.A., Aleksandrovskii A.L. The application of phytolith analysis for solving problems of soil genesis and evolution. *Eurasian Soil Science*. 1999. Vol. 32. No. 8. P. 884–891.
- Lisztes-Szabó Z., Kovács S., Pető Á. Phytolith analysis of *Poa pratensis* (Poaceae) leaves. *Turkish Journal of Botany*. 2014. No. 38. 13 p.
- Lu H., Liu K-b. Phytoliths of common grasses in the coastal environments of southeastern USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2003. No. 58. P. 587–600.
- Neumann K., Strömberg C.A.E., Ball T., Albert R.M., Vrydaghs L., Cummings. L.S. International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany*. 2019. Vol. 124 (2). P. 189–199. DOI: [10.1093/aob/mcz064](https://doi.org/10.1093/aob/mcz064).
- Piperno D.R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. Lanham: Alta Mira Press, 2006. 237 p.
- Targulian V.O., Sokolova T.A. Soil as a biotic/abiotic natural system: a reactor, memory, and regulator of biospheric interactions. *Eurasian Soil Science*. 1996. Vol. 29. No. 1. P. 30–41.
- Solomonova M.Y., Speranskaya N.Y., Blinnikov M.S., Kharitonova E.Y., Pechatnova Y.V., Silantieva M.M. Cyperaceae Juss. and Juncaceae A. Rich ex Kunt. phytoliths of Western Siberia. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. No. 8 (4). P. 332–334.
- Wallis L.A. Environmental history of northwest Australia based on phytolith analysis at Carpenter's Gap 1. *Quaternary International*. 2001. Vol. 83–85. P. 103–117.

Received 21 November 2022

Accepted 22 February 2023

Published 01 March 2023

About the authors:

Lada Natalia Yuryevna – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher in the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); n.lada@issa-siberia.ru

Mironycheva-Tokareva Nina Petrovna – Candidate of Biological Sciences, docent, Head of the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mirtok@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЛЕОНИДА ВЛАДИМИРОВИЧА БЕРЕЗИНА

© 2023 Ю. А. Азаренко ¹, В. С. Бойко ²¹ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия. E-mail: yua.azarenko@omgau.org²ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», проспект Королева, 26, г. Омск, 644012, Россия. E-mail: boicko.vasily2011@yandex.ru

В статье приводятся основные сведения о научной и педагогической деятельности профессора Омского государственного аграрного университета, доктора сельскохозяйственных наук Леонида Владимировича Березина. Дана краткая информация о его деятельности в период учебы в Омском сельскохозяйственном институте имени С.М. Кирова, работы в Сибирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства и Омском государственном аграрном университете. Показан вклад ученого в изучение солонцовых почв юга Западной Сибири и решение проблемы их химической мелиорации. Освещены направления исследований по изучению почвенного покрова с применением методов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: Березин Л.В.; почвоведение; мелиорация солонцов; дистанционное зондирование Земли

Цитирование: Азаренко Ю.А., Бойко В.С. Памяти профессора Леонида Владимировича Березина // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. №1. e200. DOI: [10.31251/pos.v6i1.200](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.200).

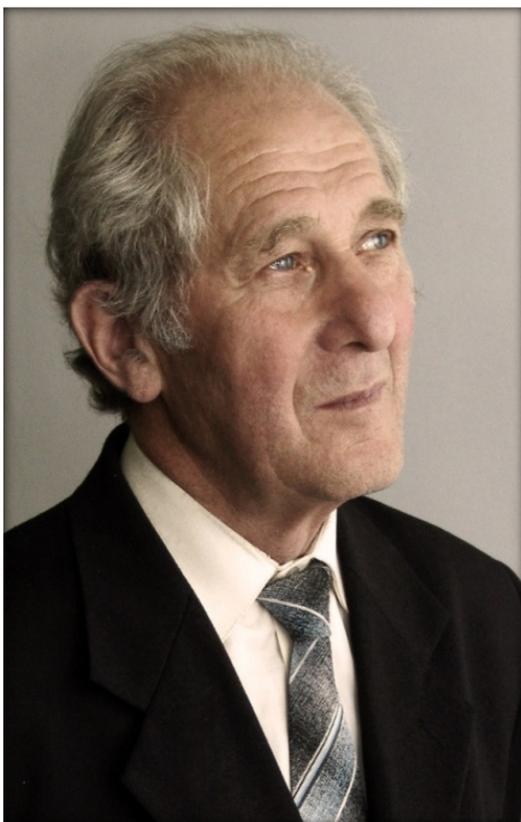


Рисунок 1. Профессор, доктор сельскохозяйственных наук Березин Леонид Владимирович (1934-2023).

Девятого января 2023 года ушел из жизни **Леонид Владимирович Березин** – профессор, доктор сельскохозяйственных наук, известный российский специалист в области мелиорации, почвоведения и агрохимии.

Леонид Владимирович родился 26 апреля 1934 г. в с. Тальменка Алтайского края. В 1952-1957 гг. учился на агрономическом факультете Омского сельскохозяйственного института имени С.М. Кирова (ОмСХИ). В студенческие годы отличался трудолюбием, любознательностью, общительностью, прилежностью в учебе. Являлся единственным на факультете Сталинским стипендиатом. Три года был старостой научного студенческого кружка по ботанике, участвовал в экспедициях под руководством доцента Н.А. Плотникова по обследованию растительности целинных земель (Мороз, 2009). Первые научные статьи Леонид Владимирович опубликовал в сборнике научных работ ОмСХИ (Березин, 1959; Березин и др., 1959).

Почвоведение было одной из ведущих дисциплин агрономического факультета; лекции студентам читал член-корреспондент ВАСХНИЛ К.П. Горшенин. После третьего курса Л.В. Березин проходил практику на Васисской МТС в качестве агронома. Под руководством доцента кафедры агрохимии

А.Е. Возбуцкой и доцента кафедры почвоведения В.М. Прудниковой он участвовал в закладке полевого опыта по эффективности навоза, перегноя и извести на дерново-подзолистой почве Васисского района (Градобоев и др., 1960). Итоги полевой практики были положены в основу дипломной работы Л.В. Березина.

После окончания с отличием института Л.В. Березин работал агрономом колхоза в с. Солнцево Исилькульского района Омской области. С 1959 г. Леонид Владимирович заочно обучался в аспирантуре под руководством выдающегося сибирского почвоведом Н.Д. Градобоева и в 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Сопrotивление почв лесостепной зоны Омской области при отвальной пахоте» (Березин, 1966).



Рисунок 2. После защиты кандидатской диссертации Березина Л.В. Слева направо профессор Богданов Н.И., заведующий кафедрой земледелия Фольмер Н.И., профессор Берников В.В. 2-й ряд: доцент Плотников Н.А., Парфенов А.И., Карчевский Л.Ф., Березин Л.В. 1 ряд: семья Березина Л.В. и профессор Градобоев Н.Д.

В 1961 г. кандидат сельскохозяйственных наук Л.В. Березин возвращается в ОмСХИ и по 1965 г. работает ассистентом кафедры ботаники. После создания в 1965 г. К.П. Горшениным и Н.Д. Градобоевым лаборатории по химической и агротехнической мелиорации солонцов, Леонид Владимирович переходит в нее на должность научного сотрудника, а с 1974 по 1979 гг. является ее заведующим. При личном участии и руководстве коллективом лаборатории им проведены глубокие исследования генезиса, свойств и приемов улучшения солонцов. В многолетних стационарных полевых опытах, заложенных в пяти районах Омской области, изучена эффективность и разработана технология комплексной мелиорации солонцов.

Коллективом лаборатории были получены убедительные данные по высокой эффективности гипсования солонцов в Омской области. Наиболее сложным вопросом являлось внедрение разработанного приема в производство, решение которого было осуществлено усилиями Н.Д. Градобоева и Л.В. Березина. По решению министерства сельского хозяйства СССР при агрохимических лабораториях были созданы отделы по мелиорации солонцов, которые на основе полевого обследования составляли проектно-сметную документацию по химической мелиорации, а при районных отделениях были организованы отряды «Агропромхимия», в обязанности которых входило, в том числе, и внесение мелиорантов. Необходимо было привлечение поставщиков мелиорантов – Кунгурского гипсового завода в Пермской области и Первоуральского химкомбината Свердловской области (Семендяева, 2009).

Важным теоретическим и практическим вопросом являлся расчет доз мелиоранта. Совместно с З.И. Воропаевой при участии А.И. Парфенова Леонид Владимирович разрабатывал разные подходы к его решению. В результате большого труда был предложен новый способ установления дозы гипса на основе метода «донасыщения», рекомендованного к внедрению в производство (Системы земледелия..., 1990). Параллельно проводился поиск альтернатив для сыромолотого гипса; на Любинском солонцовом стационаре проведен опыт по мелиорации солонцов серной кислотой – побочным продуктом переработки нефти (Семендяева, 2009).

Итогом работы лаборатории по химической и агротехнической мелиорации ОмСХИ стало масштабное проведение химической мелиорации не только в Омской области, но и в соседних регионах: Новосибирской и Тюменской областях, Алтайском крае. Результаты исследовательской работы Л.В. Березин докладывал на конференциях, съездах, производственных совещаниях, Международном симпозиуме по мелиорации почв содового засоления в 1969 г., X Международном конгрессе почвоведов в 1974 г.



Рисунок 3. Коллектив лаборатории по мелиорации солонцов при кафедре почвоведения ОмСХИ, 1979 г. Березин Л.В. во втором ряду, второй слева. Первый ряд, вторая слева Воропаева З.И., в центре – Градобоева В.Ф.

С 1979 г. Л.В. Березин работал в Сибирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (СибНИИСХ, г. Омск) в организованной им лаборатории земледелия солонцевой лесостепи. Здесь им был создан Малиновский стационар в Тюкалинском районе по разработке технологии использования черноземно-солонцевых комплексов; работы на стационаре продолжались до 2006 г. и существенно дополнили исследования Омского государственного аграрного университета (ОмГАУ) под руководством доцента А.И. Парфенова на Давыдовском (Омский район), Голубковском (Любинский район) и Измайловском (Калачинский район) стационарах. Были исследованы особенности действия и последствия химической мелиорации на разных видах солонцов, динамика солевого режима в зависимости от системы их обработки в разных севооборотах, экологические аспекты, связанные с поведением стронция, фтора и ряда других химических элементов в почвах и растениях мелиорированных ландшафтов (Березин, 2006). Леонид Владимирович принимал активное участие в подготовке региональных рекомендаций по системе земледелия на пахотных солонцевых комплексах Зауралья и Западной Сибири, в которых впервые была представлена агромелиоративная группировка солонцов и мероприятий по их улучшению и использованию (Системы земледелия ..., 1990). В целом, благодаря работе научно-исследовательских лабораторий ОмГАУ и СибНИИСХ, рекомендации по мелиорации солонцов были внедрены в Омской области на площади 300 тыс. га.

Леонид Владимирович с 1969 г. являлся членом координационного совета ВАСХНИЛ по мелиорации солонцов, а с 2000 г. – членом регионального комитета по экологии мелиорированных земель при Сибирском отделении РАСХН. По результатам длительных научных исследований Леонид Владимирович в 1993 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Теоретические основы и опыт химической мелиорации почв гидроморфных солонцевых комплексов лесостепной зоны Западной Сибири» (Березин, 1993). Оппонентами диссертационной работы были академик В.И. Кирюшин, доктора наук С.С. Сдобников и А.Д. Бондарев, ведущая организация – Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск).



Рисунок 4. Леонид Владимирович Березин в поле со студентами.

После прекращения в 1996 г. финансирования работ по мелиорации, наблюдения за последствием гипса и фосфогипса продолжались до 2006 г. В 2004-2005 гг. основное внимание Л.В. Березин уделял разработке агротехнических приемов мелиорации солонцов. Совместно с опытно-конструкторским бюро СибНИИСХ он разработал комбинированный рыхлитель РН-4 для обработки солонцовых почв, внедренный в хозяйствах Омской и Тюменской областей, Алтайском крае. Мелиоративный эффект от обработки почвы данным орудием достигается за счет сочетания глубокого рыхления и фитомелиорации благодаря заделке вглубь пожнивных остатков или сидеральных культур. Полевые опыты по изучению эффективности рыхлителя проводились на почвах солонцовых комплексов лесостепной зоны в ОПХ «Боевое» и «Омское». Часть результатов исследований представлена в диссертации А.М. Гиндемит (2012), выполненной под руководством Л.В. Березина и в совместной статье (Березин и др., 2014).

В 2002 г. Леонид Владимирович перешел на работу профессором кафедры почвоведения Омского государственного аграрного университета, активно занимаясь как преподавательской, так и научной деятельностью. Он разработал курсы дисциплин «Лесное почвоведение», «Экология и биология почв», «Инновационные технологии в почвоведении, агрохимии и экологии». По всем дисциплинам были изданы учебные пособия (Березин и др., 2007, 2008; Березин, Карпачевский, 2009; Карпачевский и др., 2009; Березин, Карпачевский, 2012), часть из которых рекомендована Учебно-методическим объединением вузов РФ по агрономическому образованию и Учебно-методическим советом по почвоведению при УМО по классическим университетам. Подведены итоги работы по солонцовой тематике и вопросам рационального использования почв, оформленные в монографиях (Березин, 2006, 2008, 2012; Научные основы ..., 2007; Березин и др., 2013), а также защищена кандидатская диссертация И.А. Троценко (2008), выполненная под руководством Л.В. Березина.

В период работы на кафедре почвоведения ОмГАУ Леонид Владимирович стал инициатором исследований почвенного покрова юга Западной Сибири с использованием методов дистанционного зондирования Земли; вместе с аспирантами активно разрабатывал методику мониторинга плодородия почв и рационального использования земель с применением спектральной отражательной способности агрофитоценозов и дешифрированием мультиспектральных космических снимков. По данному направлению были защищены две кандидатские диссертации О.С. Сергеевой (2011) и М.Р. Шаяхметова (2015). Кроме того, Л.В. Березина увлекали и многие другие научные вопросы агропочвоведения: он занимался изучением дыхания почв, разработкой и применением золошлаковых материалов и наноглобулярного углерода для улучшения свойств почв.



Рисунок 5. Участники конференции, посвященной 75-летию Л.В. Березина (Омск, 2009 г.) в музее истории Омского государственного аграрного университета. Слева направо: Березин Л.В., Байков К.С., Любимова И.Н., Булгаков Д.С., Мищенко Л.Н., Пирогова Т.И., Шпедт А.А.

Главным направлением научной деятельности Л.В. Березина являлось улучшение малопродуктивных почв. Этой теме была посвящена международная научно-практическая конференция в честь 75-летия Леонида Владимировича, состоявшаяся 28–29 апреля 2009 г. на базе СибНИИСХ (Проблемы ..., 2009). За период научно-педагогической деятельности Л.В. Березиным опубликовано более 290 работ, из них 5 монографий, множество рекомендаций производству. Новизна результатов исследований подтверждена рядом патентов на изобретения. Под его руководством защищено несколько кандидатских диссертаций.

Леонид Владимирович Березин входил в состав диссертационных советов в ОмГАУ, являлся членом Общества почвоведов имени В.В. Докучаева, почетным членом Омского регионального отделения Русского географического общества. С 2000 г. – академик Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности человека (МАНЭБ). Научная деятельность Леонида Владимировича отмечена серебряной медалью ВДНХ за участие в разработке технологии выборочного гипсования солонцов, медалями «За освоение целинных земель», «За мелиорацию земель Западной Сибири», грамотами Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, премией имени М.В. Певцова и другими наградами.

Леонид Владимирович Березин всегда отличался талантом исследователя и организатора, неиссякаемой энергией и инициативностью, глубоким профессионализмом, а также своей доброжелательностью, открытостью и порядочностью, заслуженно пользуясь большим уважением коллег и друзей. Он всегда был окружен молодежью: аспирантами, студентами, помогая ценными советами в их научной работе. Светлая память о Леониде Владимировиче сохранится в наших сердцах.

ЛИТЕРАТУРА

Березин Л.В. Состояние и перспективы развития отраслей сельского хозяйства колхозов Васисского района Омской области // Сборник студенческих научных работ. Омск: ОмСХИ, 1959. С. 5–12.

Березин Л.В. Соппротивление почв лесостепной зоны Омской области при отвальной пахоте. Автореферат диссертации ... канд. с.-х. наук. Омск, 1966. 12 с.

- Березин Л.В. Теоретические основы и опыт химической мелиорации почв гидроморфных солонцовых комплексов лесостепной зоны Западной Сибири. Автореферат диссертации ... д-ра с.-х. наук. Москва, 1993. 22 с.
- Березин Л.В. Мелиорация и использование солонцов Сибири. Омск: ОмГАУ, 2006. 208 с.
- Березин Л.В. 50 лет освоения целинных земель и проблема повторного гипсования солонцов в неорошаемых условиях // Генезис и мелиорация солонцовых комплексов. Москва: Россельхозакадемия, 2008. С. 153–160.
- Березин Л.В. Авангард сибирского земледелия. (К истории земледелия Сибири). Омск: Изд-во ИП Е.А. Макшеевой, 2012. 132 с.
- Березин Л.В., Карпачевский Л.О. Лесное почвоведение. Учебное пособие. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2009. 360 с.
- Березин Л.В., Карпачевский Л.О. Инновационные технологии в почвоведении, агрохимии и экологии (Современные проблемы и инновации в почвоведении). Учебное пособие. Омск: Изд-во ФГБОУ ВПО ОмГАУ им. П.А. Столыпина, 2012. 200 с.
- Березин Л.В., Кленов Б.М., Леонова В.В. Экология и биология почв. Учебное пособие. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. 124 с.
- Березин Л.В., Кленов Б.М., Леонова В.В. Экология и биология почв. Учебное пособие. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2008. 124 с.
- Березин Л.В., Лукашина Л.В., Мороз А.А. Растительность целинных, залежных и заболоченных земель Омской области // Сборник студенческих научных работ. Омск: ОмСХИ, 1959. С. 13–18.
- Березин Л.В., Сапаров А.С., Кан В.М., Шаяхметов М.Р. Технология комплексной мелиорации экосистем России и Казахстана. Алматы, Омск, 2013. 215 с.
- Березин Л.В., Хамова О.Ф., Падерина Е.В., Гиндемит А.М. Влияние мелиоративной обработки на биологическую активность почв солонцового комплекса Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1349–1355.
- Гиндемит А.М. Свойства малонатриевых солонцов лесостепной зоны Омского Прииртышья. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Тюмень, 2012. 16 с.
- Градобоев Н.Д., Прудникова В.М., Сметанин И.С. Почвы Омской области. Омск: Омское книжное издательство, 1960. 373 с.
- Карпачевский Л.О., Ашинов Ю.Н., Березин Л.В. Курс лесного почвоведения. Учебное пособие. Майкоп: Аякс, 2009. 345 с.
- Мороз А.А. Айсберги академика МАНЭБ // Доклады Омского отделения Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. Т. 8. Вып. 2 (15). Омск: МАНЭБ, 2009. С. 6–16.
- Научные основы земледелия равнинных ландшафтов Западной Сибири / Л.В. Березин и др.; под ред. И.Ф. Храмцова, В.Г. Холмова. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. 312 с.
- Проблемы рационального использования малопродуктивных земель: материалы Международной научно-практической конференции (Омск, 28–29 апреля 2009 г.) / РАСХН. Сиб. отд-ние. СибНИИСХ. Омск, 2009. 252 с.
- Семендяева Н.В. Этапы изучения генезиса и мелиорации солонцов Западной Сибири // Доклады Омского отделения Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. Т. 8. Вып. 2 (15). Омск: МАНЭБ, 2009. С. 26–32.
- Сергеева О.С. Использование спектральной отражательной способности почв и агрофитоценозов для мониторинга плодородия почв. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Тюмень, 2011. 16 с.
- Системы земледелия на пахотных солонцовых комплексах Зауралья и Западной Сибири. Рекомендации. Новосибирск, 1990. 32 с.
- Троценко И.А. Изменение мелиоративных показателей многонатриевых солонцов лесостепной зоны Ишим-Иртышского междуречья при разовом и повторном гипсовании. Автореферат диссертации ... канд. с.-х. наук. Омск, 2008. 16 с.
- Шаяхметов М.Р. Изучение почвенного покрова лесостепной зоны Западной Сибири на основе дистанционного зондирования Земли. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Уфа, 2015. 19 с.

Поступила в редакцию 24.01.2023

Принята 24.01.2023

Опубликована 06.02.2023

Сведения об авторах:

Азаренко Юлия Александровна – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», (г. Омск, Россия); yua.azarenko@omgau.org

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (г. Омск, Россия); boicko.vasily2011@yandex.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

IN MEMORIAM OF PROFESSOR LEONID VLADIMIROVICH BEREZIN

© 2023 Yu. A. Azarenko ¹, V. S. Boyko ²

¹*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Ploshchad 1, Omsk, Russia. E-mail: yua.azarenko@omgau.org*

²*Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Research Center", Koroleva 26, Omsk, Russia. E-mail: boicko.vasily2011@yandex.ru*

The article provides basic information about the scientific and pedagogical activities of Professor of Omsk State Agrarian University, Doctor of Agricultural Sciences Berezin Leonid Vladimirovich. Brief information is given about his studies and work at the Omsk Agricultural Institute named after S.M. Kirov, Siberian Research Institute of Agriculture, Omsk State Agrarian University. The contribution of the scientist to the study of solonetzic soils in the south of West Siberia and their chemical reclamation is also described. The L.V. Berezin's research of the soil cover using remote sensing of the Earth are highlighted as well.

Key words: Berezin L.V.; soil science; melioration of solonetz; remote sensing of the Earth

How to cite: Azarenko Yu.A., Boyko B.S. In memory of professor Leonid Vladimirovich Berezin // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(1). e200. DOI: [10.31251/pos.v6i1.200](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.200). (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Berezin L.V. State and prospects for the development of agricultural sectors of the collective farms of the Vasissky district of the Omsk region. In book: Proceedings of student scientific papers. Omsk: Omsk Agricultural Institute, 1959. P. 5–12. (in Russian).
- Berezin L.V. Resistance of soils in the forest-steppe zone of the Omsk region during plowing. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Omsk, 1966. 12 p. (in Russian).
- Berezin L.V. Theoretical foundations and experience of chemical reclamation of soils of hydromorphic solonetz complexes of the forest-steppe zone of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Agricultural Sci. Moscow, 1993. 22 p. (in Russian).
- Berezin L.V. Reclamation and use of solonetz in Siberia. Omsk: OmSAU publ., 2006. 208 p. (in Russian).
- Berezin L.V. 50 years of development of virgin lands and the problem of repeated gypsuming of solonetz in non-irrigated conditions. In book: Genesis and melioration of solonetz complexes. Moscow: Russian Agricultural Academy, 2008, P. 153–160. (in Russian).
- Berezin L.V. The avant-garde of Siberian agriculture (about the history of agriculture in Siberia). Omsk: E.A. Maksheeva Publ., 2012. 132 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Karpachevsky L.O. Forest soil science. Study guide. Omsk: Publishing house of OmSAU, 2009. 360 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Karpachevsky L.O. Innovative technologies in soil science, agrochemistry and ecology (Modern problems and innovations in soil science). Study guide. Omsk: Publishing house of OmSAU, 2012. 200 p. (in Russian).

- Berezin L.V., Klenov B.M., Leonova V.V. Ecology and biology of soils. Study guide. Omsk: Publishing House of OmSAU, 2007. 124 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Klenov B.M., Leonova V.V. Ecology and biology of soils. Study guide. Omsk: Publishing House of OmSAU, 2008. 124 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Lukashina L.V., Moroz A.A. Vegetation of virgin, fallow and swampy lands of the Omsk region. In book: Proceedings of student scientific papers. Omsk: Omsk Agricultural Institute, 1959. P. 13–18. (in Russian).
- Berezin L.V., Saporov A.S., Kan V.M., Shayakhmetov M.R. The technology of combined melioration of the ecosystems of Russia and Kazakhstan. Almaty-Omsk, 2013. 215 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Gindemit A.M., Khamova O.F., Paderina E.V. Impact of reclamation treatment on the biological activity of soils of the solonetz complex in Western Siberia // Eurasian Soil Science. 2014. T. 47. № 11. P. 1138–1143.
- Gindemit A.M. Properties of low-sodium solonchaks of the forest-steppe zone of the Omsk Irtysh region. Abstract of the Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Tyumen, 2012. 16 p. (in Russian).
- Gradoboev N.D., Prudnikova V.M., Smetanin I.S. The soils of the Omsk region. Omsk: Omsk Book Publ., 1960. 373 p. (in Russian).
- Karpachevsky L.O., Ashinov Yu.N., Berezin L.V. Forest soil science course. Study guide. Maykop: Ajax, 2009. 345 p. (in Russian).
- Moroz A.A. Icebergs of Academician MANEB. In book: Reports of the Omsk branch of the International Academy of Ecology and Life Safety. Vol. 8. Issue 2 (15). Omsk: IAELPS, 2009. P. 6–16. (in Russian).
- Scientific bases of agriculture of plain landscapes of Western Siberia / L.V. Berezin et. al.; edited by I.F. Khramtsov, V.G. Kholmov. Omsk: Publishing House of OmSAU, 2007. 312 p. (in Russian).
- Problems of rational use of marginal lands: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Omsk, April 28–29, 2009). RAAS. Siberian Branch. Siberian Research Institute of Agriculture, Omsk, 2009. 252 p. (in Russian).
- Semendyaeva N.V. Stages of studying the genesis and melioration of solonchaks in Western Siberia. In book: Reports of the Omsk branch of the International Academy of Ecology and Life Safety. Vol. 8. Issue 2 (15). Omsk: IAELPS, 2009. P. 26–32. (in Russian).
- Sergeeva O.S. Using the spectral reflectivity of soils and agrophytocenoses for monitoring soil fertility. Abstract of the Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Tyumen, 2011. 16 p. (in Russian).
- Farming systems on arable solonchak complexes of the Trans-Urals and Western Siberia. Recommendations. Novosibirsk, 1990. 32 p. (in Russian).
- Trotsenko I.A. Changes in ameliorative parameters of polysodium solonchaks in the forest-steppe zone of the Ishim-Irtysh interfluvium during single and repeated gypsum casting. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Omsk, 2008. 16 p. (in Russian).
- Shayakhmetov M.R. Study of the soil cover of the forest-steppe zone of Western Siberia based on remote sensing of the Earth. Abstract of the Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Ufa, 2015. 19 p. (in Russian).

Received 24 January 2023

Accepted 24 January 2023

Published 06 February 2023

About the authors:

Azarenko Yulia Aleksandrovna – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, (Omsk, Russia); yua.azarenko@omgau.org

Boyko Vasily Sergeevich – Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Research of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Research Center" (Omsk, Russia); boicko.vasily2011@yandex.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)