

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2023

Том 6. Выпуск 3

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

Чашин А.Н., Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Пространственное моделирование содержания гумуса в почвах на основе БПЛА-съёмки e226

Теоретические и прикладные проблемы почвоведения

Гопи Н.В. Агроэкологический потенциал западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: методика цифрового картографирования, геопространственный анализ, корреляция с содержанием органического углерода в почвах e224

Почвенно-физические процессы, свойства и режимы

Шапорина Н.А. Перспективные методы мониторинга увлажнения почв при орошении в условиях Новосибирского Приобья e231

Взаимодействие почва – растение – микробиом в экосистемах

Наумова Н.Б., Беланов И.П., Савенков О.А., Степанова М.В., Щемелева Г.В., Батурина О.А., Кабилов М.Р. Почвенный и ризосферный бактериобиом пшеницы при комбинировании гуматов и золы уноса e218

Биогеохимия, загрязнение и ремедиация объектов окружающей среды

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Динамика содержания тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в процессе разложения сфагнома на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот e237

Поведение почв и экосистем в пространстве и во времени

Кожомбердиев Ж.А., Кенжебаева А.В., Абылмейзова Б.У., Кенжебаева Н.В. Исследование растительного компонента горных экосистем Базар-Коргонского района (Кыргызская Республика) e219

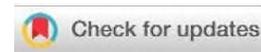
Шейнкман В.С., Седов С.Н., Андроханов В.А. Криогидроморфные палеопочвы севера Западной Сибири как индикаторы тёплых стадий позднего плейстоцена и их связь с ходом криогенеза e236

Обзоры, дискуссии, памятные даты

Мордкович В.Г. Сукцессии биоэкосистем как хроно-хорологический феномен e216

Титлянова А.А., Варакина З.В. Памяти Светланы Васильевны Шибаревой (21.05.1953 – 25.05.2023) e222

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.226>

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В ПОЧВАХ НА ОСНОВЕ БПЛА-СЪЁМКИ

© 2023 А. Н. Чащин , Н. М. Мудрых , И. А. Самофалова 

ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ, ул. Петропавловская, 23, г. Пермь, 614990, Россия. E-mail: chascshin@mail.ru, nata020880@hotmail.com, samofalovairaida@mail.ru

Цель исследования. Оценить возможности пространственного моделирования содержания гумуса в почвах по показателям цифровой модели рельефа на основе БПЛА-съёмки с использованием геостатистического и регрессионного методов.

Место и время проведения. Ключевой участок расположен на учебно-научном опытном поле ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (56°34-37' с. ш. и 57°92-93' в. д.) в Среднем Предуралье (Пермский муниципальный район Пермского края), южно-таёжная зона Среднерусской провинции. Отбор почвенных образцов провели буром из слоя 0–20 см в мае 2023 г.

Методы. Данные съёмки получили с помощью БПЛА – DJI mini 2 с высоты 50 м. Ортофотоплан и цифровую модель высот ключевого участка выполнили в программе Drone Deploy. Объектом исследования послужил почвенный покров ключевого участка, представленный дерново-подзолистыми почвами. Содержание гумуса в почвенных образцах определили методом дихроматного окисления. Обработку данных с БПЛА выполнили в системе QGIS 3.22 и программе SAGA 9. Пространственное моделирование провели геостатистическим методом «Обычный Кригинг», инструментом Geostatistical Analyst геоинформационной системы ArcGIS 10.8.

Основные результаты. Содержание гумуса в слое 0–20 см почв варьировало от 0,9 до 3,0%, при этом совокупность значений соответствовала нормальному распределению; это позволило не проводить трансформацию данных по методу нормальных меток. U-образная форма свидетельствует о выраженном направлении тренда с севера на юг и с запада на восток. Корреляционный анализ показал зависимость содержания гумуса в почвах от морфометрических показателей, коэффициенты корреляции варьировали от -0,48 до 0,75. Построено регрессионное уравнение прогноза содержания гумуса в почвах с показателями, имеющими максимальные значения коэффициента корреляции: высота (ELEV), расстояние до водотоков (Channel Network Distance) и относительное положение склонов (Relative Slope Position); коэффициент корреляции составил, соответственно, 0,75, 0,75 и 0,66. Данное уравнение моделирует содержание гумуса в пространстве с относительной разницей с Кригинг-интерполяцией -0,6-1,1%.

Заключение. Использование высоко детальных БПЛА-снимков для установления влияния геоморфологических условий на свойства почв позволяет не только определить их пространственное распределение, установить взаимосвязь с высотными отметками, расстоянием до водотоков, но и смоделировать изменение свойств в результате антропогенного вмешательства, являющегося фактором усиления водной эрозии.

Ключевые слова: БПЛА; дерново-подзолистые почвы; гумус; морфометрические показатели; рельеф; пространственная изменчивость.

Цитирование: Чащин А.Н., Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Пространственное моделирование содержания гумуса в почвах на основе БПЛА-съёмки // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e226. DOI: [10.31251/pos.v6i3.226](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.226).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из значимых показателей почвенного плодородия является содержание гумуса, а в сложных геоморфологических условиях Пермского Прикамья, имеющего высокий эрозионный потенциал, данный показатель может сильно варьировать в пределах одного поля. Возможности оценки пространственного распределения гумуса в почвах в зависимости от рельефа на основе цифрового моделирования были установлены рядом исследователей (Гопп и др., 2017, 2023; Чинилин и др., 2018; Мудрых, Самофалова, 2019; Ларькин и др., 2023; Gopp et al., 2019; Buryak, 2023); показано, что рельеф является ведущим фактором внутрипольной неоднородности гумусного состояния почв. В качестве стационаров по исследованию распределения гумуса, могут быть опытные поля с выраженным рельефом даже имеющие небольшую площадь. В данном случае они представляют ключевой участок, а при изучении неоднородности почвенных свойств в пределах

ключевого участка должна быть проведена съёмка рельефа местности (Скрябина, 2007). В современных условиях наиболее доступным инструментом получения цифровой модели рельефа опытного поля (ключевого участка) являются **беспилотные авиационные системы (БАС)** (Чашин и др., 2021; Кузнецова и др., 2023; Турк, Карачёв, 2023); информация, полученная с них, открывают новые возможности исследований почвенного покрова (Савин и др., 2015). Стоимость приобретения беспилотного летательного аппарата невысока по сравнению с регулярным проведением топографической съёмки на различных ключевых участках. На основе полученных в видимом диапазоне электромагнитного спектра снимков, методами фотограмметрии создаётся цифровая модель поверхности, которая при условии отсутствия каких-либо высотных объектов на поле является цифровой моделью рельефа. В 2023 году основным условием проведения нашего исследования было успешное получение разрешения на выполнение авиационных работ.

Цель исследования – оценить возможности пространственного моделирования содержания гумуса по показателям цифровой модели рельефа на основе БПЛА-съёмки с использованием геостатистического и регрессионного методов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужил почвенный покров ключевого участка, расположенного на территории учебно-научного опытного поля ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ в Пермском муниципальном районе Пермского края (рис. 1). Преобладающие почвы ключевого участка – дерново-подзолистые (Классификация ..., 1977) или Retisols по классификации IUSS Working Group WRB (2014).

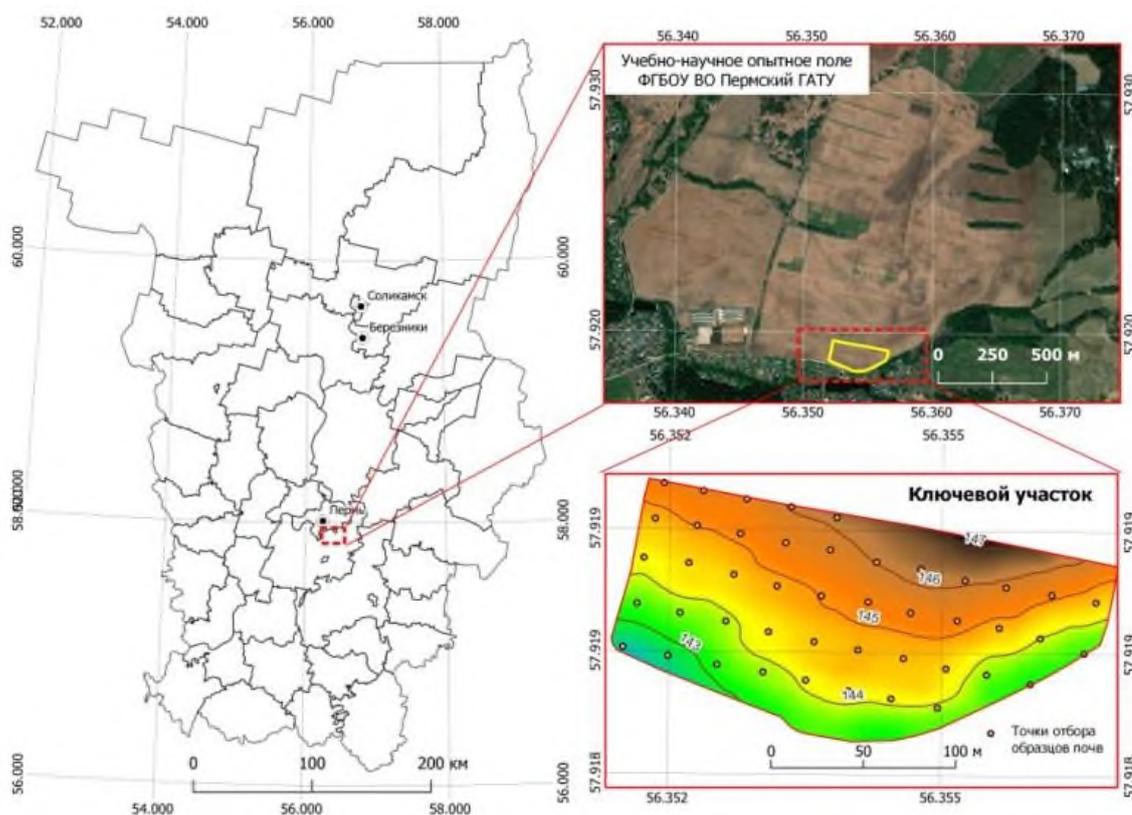


Рисунок 1. Местоположение ключевого участка.

Площадь ключевого участка равна 2,62 га. В качестве исходных материалов использованы данные съёмки с БПЛА коптерного типа. Модель БПЛА – DJI mini 2 (учётный номер РОСАВИАЦИИ 0u66296). Дата проведения съёмки 22.06.2023 г. Съёмка выполнялась с высоты 50 м. Для проведения съёмки было получено разрешение Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД). Номер режима ВР 5442. Запрос временного режима осуществлялся через систему «Небосвод» (Модели кригинга, 2023). Средняя высота растительного покрова (многолетние травы) поля в день съёмки составляла 10 см, что не оказывает влияние на уровень погрешности при создании модели высот. Полученный ортофотоплан имеет пространственное

разрешение 0,2 см на пиксель. Результат наложения ортофотоплана (0,2 см на пиксель) на высокодетальный космический снимок покрытия ESRI World Imagery (31 см на пиксель) и границы векторизованного ключевого участка (опытного поля) представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. Слой ортофотоплана на подложке снимка ESRI World Imagery.

Создание ортофотоплана и цифровой модели высот (пространственное разрешение ортофотоплана – 0,0265 м, модели высот – 0,265 м) по снимкам с БПЛА выполнялось в программе Drone Deploy (веб-приложение по обработке данных с БПЛА). Дальнейшая обработка данных с БПЛА проведена в геоинформационной системе QGIS 3.22 и программе SAGA 9 (Conrad et al., 2015) и включала в себя: преобразование исходных данных в систему координат проекции для Пермского края WGS 84/UTM zone 40N; векторизация границ ключевого участка по ортофотоплану; расчёт морфометрических показателей рельефа, расчёт корреляции растров морфометрических показателей рельефа и содержания гумуса в почве.

Исследования по содержанию гумуса в почвах включали: отбор проб в 45 точках (рис. 1) буром из слоя 0–20 см, лабораторное определение методом дихроматного окисления (метод Тюрин, ГОСТ 26213-84) и пространственное моделирование геостатистическим методом «Обычный Кригинг», инструментом Geostatistical Analyst в геоинформационной системе ArcGIS 10.8 (ArcGIS Geostatistical..., 2023). Для регрессионного подхода к моделированию содержания гумуса в почвах использовали выборку на основе корреляции растров, которая составила 26 123 шт.

Таким образом, при комплексном моделировании распределения гумуса в пространстве с учетом дистанционных данных БПЛА был использован набор программных инструментов как открытых (QGIS, SAGA), так и коммерческих, в том числе применение ArcGIS, что обусловлено возможностями модуля Geostatistical Analyst по исследованию входных данных о содержании гумуса в почвах и подбору оптимальных параметров вариограммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате лабораторного исследования содержания гумуса в почвах был сформирован точечный слой, состоящий из 45 объектов, который явился основой создания растра распределения и должен быть геостатистически исследован для правильного применения метода интерполяции «Обычный Кригинг» (Модели кригинга, 2023). В таблице 1 приведены показатели описательной статистики содержания гумуса в почвах.

Таблица 1

Описательная статистика содержания гумуса в почвенных образцах (n=45)

Значения показателей, %				Стандартное отклонение, %	Эксцесс	Асимметрия
минимальное	максимальное	среднее	медиана			
0,9	3	2,1	2,0	0,48	2,56	0,12

Совокупность значений имеет слабовыраженную правостороннюю асимметрию. Средняя и медиана в выборке близки между собой, поэтому полученные данные о процентном содержании гумуса соответствуют нормальному распределению и не требуется трансформация по методу нормальных меток.

Для корректной геостатистической интерполяции данных, требуется оценить наличие в выборке глобальных трендов. Из рисунка 3 видно, что полученные данные имеют выраженный тренд в направлении север-юг (синяя кривая) и запад-восток (зелёная кривая). Об этом свидетельствует их U-образная форма.

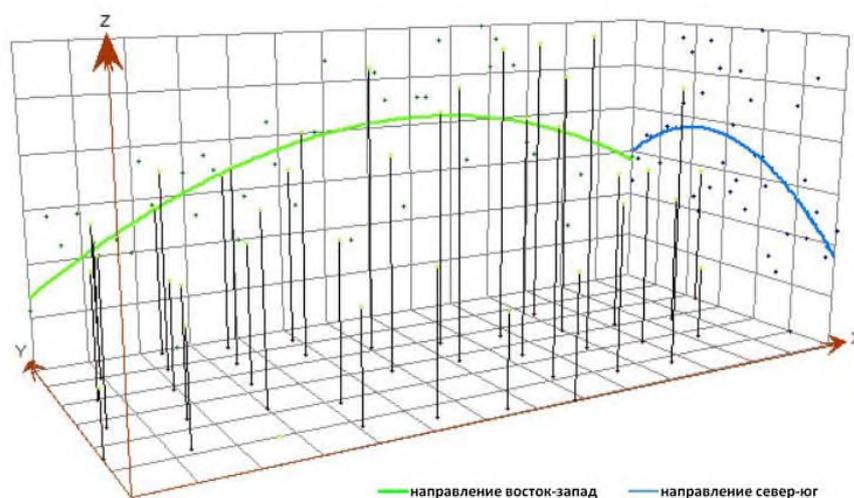


Рисунок 3. Тренд пространственного распределения содержания гумуса в почвенных образцах: ось X – направление по долготе; ось Y – направление по широте; ось Z – содержание гумуса, %.

Пространственная взаимосвязь процентного содержания гумуса в почвах от удалённости точек отбора была описана при помощи севивариограммы.

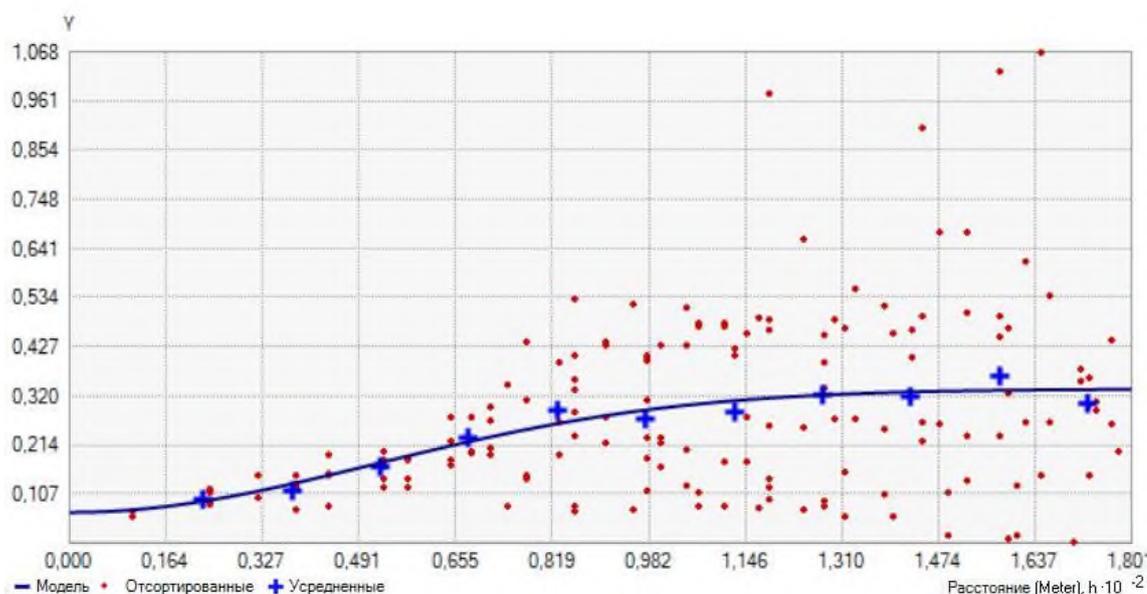


Рисунок 4. Вариограмма содержания гумуса в почвах: ось X – расстояние между местоположением точек проб отбора, м; ось Y – квадрат разности значений содержания гумуса.

Содержание гумуса в почвах имеет зависимость разности значений от квадрата расстояния точек отбора проб, следовательно, данные имеют пространственную автокорреляцию. При этом для более корректной геостатистической интерполяции, модель вариограммы должна быть оптимизирована – оптимальная вариограмма была рассчитана функцией «Оптимизация вариограммы» инструмента Geostatistical Analyst.

Таким образом, в результате исследования совокупности данных по содержанию гумуса в почвах, были подобраны оптимальные параметры создания геостатистического растра по методу «Обычный Кригинг», который представлен на рисунке 5.

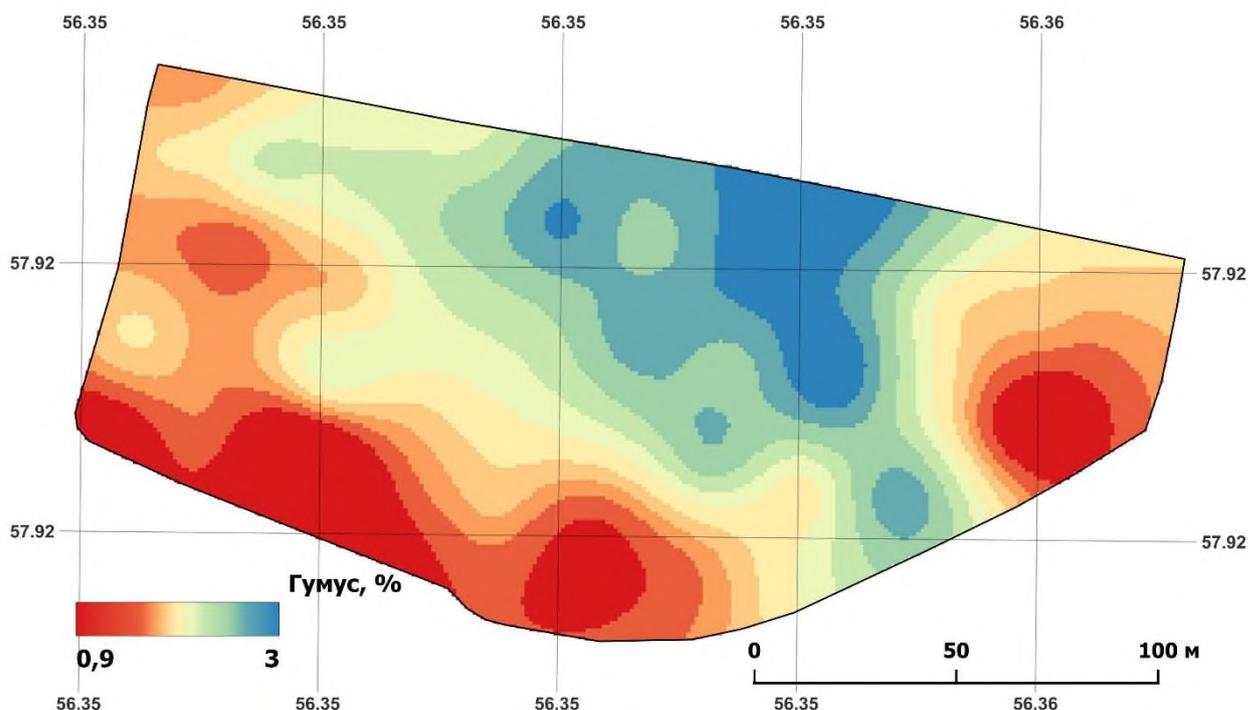


Рисунок 5. Карта пространственного распределения содержания гумуса в слое 0–20 см почв ключевого участка (пространственное разрешение 1 м).

Качественная оценка модели распределения гумуса в почвах была выполнена методом перекрёстной проверки (табл. 2). Метод представляет собой расчёт усреднённой разности и среднеквадратической ошибки при пошаговом изъятии из выборки по одной точке и определения разницы на основе повторной интерполяции (Мыслова, 2017).

Таблица 2

Результаты перекрёстной проверки модели содержания гумуса в почвах

Метод интерполяции	ME*	RMSE**
ordinary kriging	0,006	0,035

Примечание.

* – значения усреднённой разности между измеренным и интерполированным значением, %;

** – среднеквадратичная ошибка, указывающая, насколько близко модель прогнозирует измеренные значения, %.

Перекрёстная проверка показала, что усреднённая разность между измерениями и интерполяцией составила 0,006%.

В результате цифрового моделирования рельефа методом фотограмметрической обработки изображения с БПЛА был создан растр высот (пространственное разрешение 0,265 м). На его основе при помощи инструмента программы SAGA «Basic Terrain Analysis» были рассчитаны морфометрические показатели рельефа, часть из которых представлена на рисунке 6.

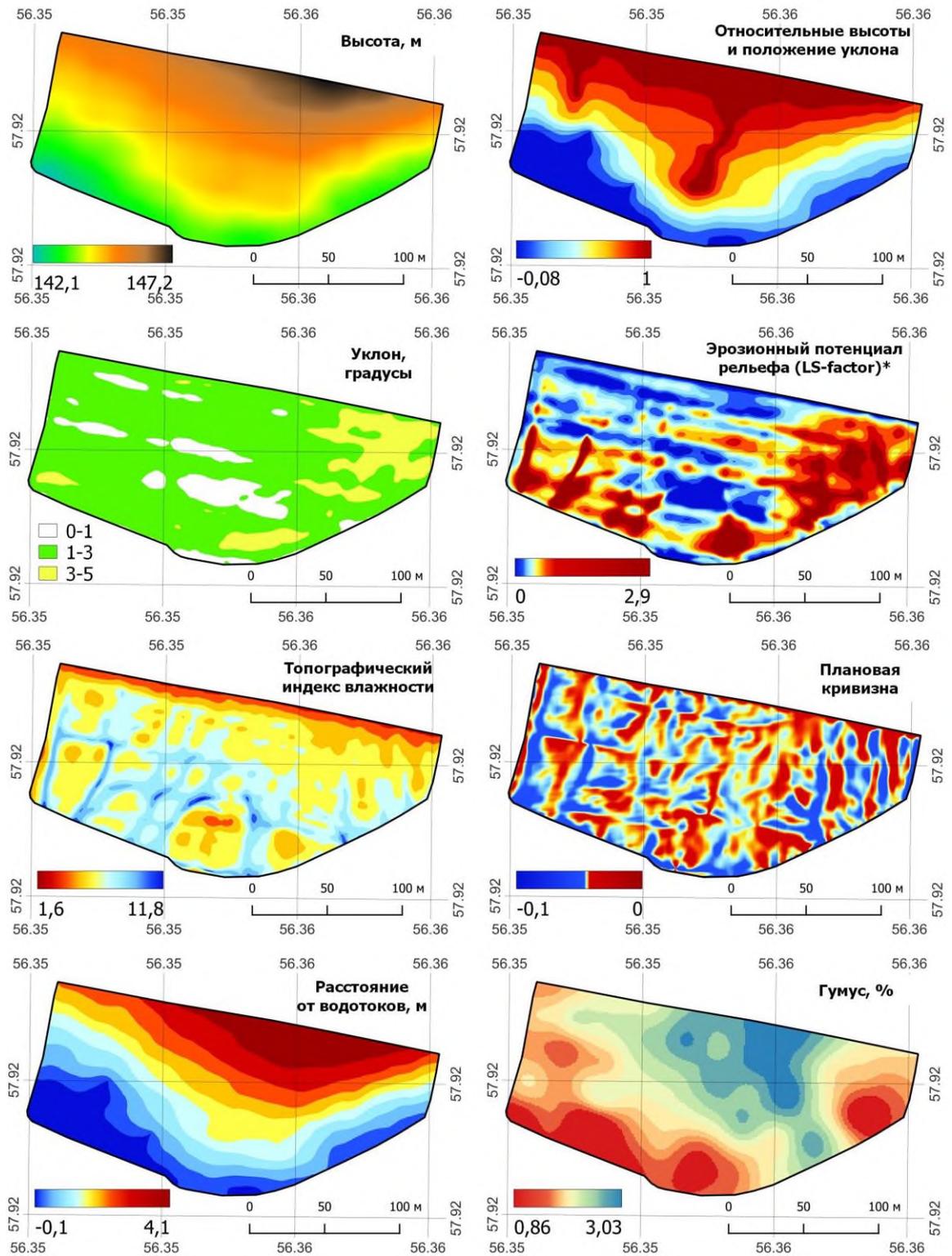


Рисунок 6. Карты морфометрических показателей рельефа по данным цифровой модели рельефа (пространственное разрешение 0,265 м) и содержания гумуса в почвах.

Примечание. *При расчете «LS-factor» учитывалась крутизна склона и площадь водосборного бассейна (Conrad et al., 2015).

На возвышенных участках поля содержание гумуса выше, чем в понижениях; прослеживается влияние эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор, расстояние от водотоков) на уменьшение содержания гумуса в почвах (см. рис. 6). Увлажнённость территории и плановая кривизна не имеют визуальных соотношений с распределением гумуса.

Для анализа взаимосвязи пространственного изменения содержания гумуса в почвах по рельефу были рассчитаны коэффициенты корреляции растров инструментом Scatterplot программы SAGA. Полученные коэффициенты корреляции приведены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием гумуса в почвах и морфометрическими показателями рельефа

ELEV ¹	Relative Slope Position ²	Channel Network Distance ³	Valley Depth ⁴	Slope ⁵	LS-factor ⁶	TWI ⁷	Plan Curvature ⁸
0,75	0,66	0,75	-0,48	0,14	0,28	0,17	0,14

Примечание.

1 – высота, м; 2 – относительное положение склонов; 3 – расстояние до водотоков, м; 4 – глубина долины; 5 – уклон; 6 – эрозионный потенциал рельефа; 7 – топографический индекс влажности; 8 – плановая кривизна.

Из таблицы 3 видно, что высота и расстояние до водотоков оказывают сильное влияние на пространственное распределение гумуса – была установлена тесная корреляционная зависимость. Средняя корреляция установлена между содержанием гумуса в почвах и относительным положением склонов (Relative slope position), а также, но в меньшей степени, обратная связь ($r = -0,48$) с показателем, характеризующим пересечённость рельефа – относительной высотой склонов над прилегающими долинами (Valley Depth). Вероятность переувлажнения (TWI) и плоскостной эрозии не имеют выраженного влияния на содержание гумуса в почвах, что обусловлено небольшими уклонами ключевого участка.

Таким образом, наибольшая зависимость содержания гумуса в почвах от высоты, расстояния до водотоков и относительного положения склонов была использована для регрессионной модели. В результате регрессионного анализа коэффициент R^2 оказался равен 0,58, величина стандартной ошибки составила 0,28. Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\text{Гумус, \%} = -20,39 + 0,15 \times \text{ELEV} + 0,26 \times \text{CND} - 0,28 \times \text{RSP},$$

где ELEV – высота, м; CND – Channel Network Distance; RSP – Relative Slope Position

Исходя из полученного уравнения видно, что физическими механизмами накопления (потери) гумуса тестового участка являются факторы эрозионного потенциала. На возвышенных (переменная ELEV) и удалённых от ложбин элементах мезорельефа (переменные CND и RSP) содержание гумуса сохраняется, а с понижением отметок высот и сокращением расстояния до водотоков, наблюдаемых на склоне, процент гумуса в результате водной эрозии дерново-подзолистой почвы уменьшается. На основе данного уравнения при помощи калькулятора растров получена модель распределения гумуса в пространстве (рис. 7).

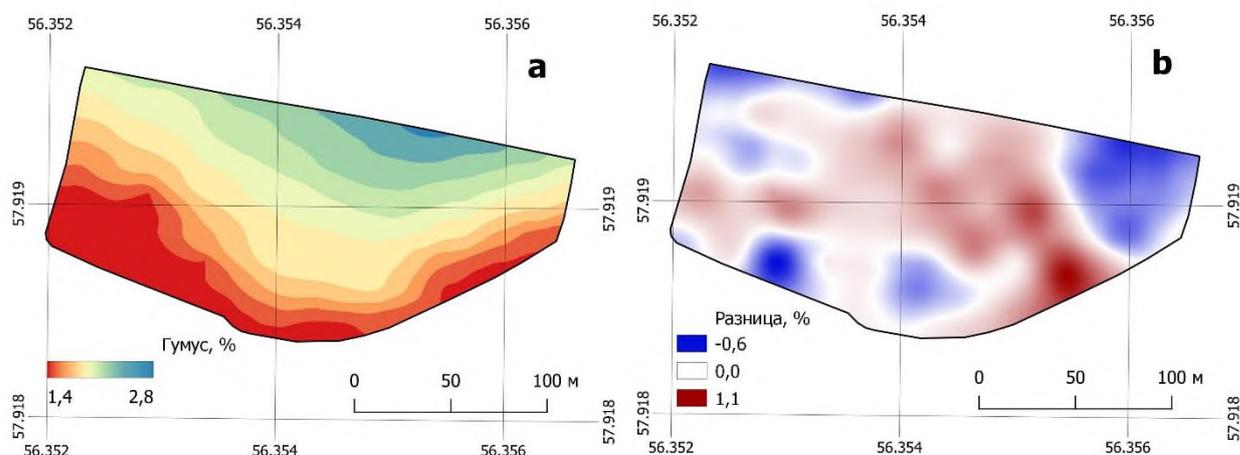


Рисунок 7. Пространственное отображение результатов моделирования содержания гумуса в дерново-подзолистых почвах: а – смоделированная поверхность содержания гумуса; б – относительная разница с Кригинг-интерполяцией.

При регрессионном моделировании происходит сужение диапазона значений примерно на 0,4% от минимума и максимума в сравнении с методом «Обычного кригинга». По показателю площади в большей степени наблюдается разница в положительную сторону, особенно на возвышенности.

Следует отметить, что основной проблемой применения индивидуальных средств дистанционного зондирования (БАС) в исследованиях почвенного покрова на сегодняшний день являются существующие ограничения по получению разрешения на полет. В ряде регионов России режим базовой готовности (запрет на полёты БПЛА) не позволяет осуществлять полёты в исследовательских целях, а при работе по государственной теме НИР в рамках научной или образовательной организации требуется сертификат эксплуатанта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлена тесная связь содержания гумуса в почвах с высотными отметками, расстоянием до водотоков и относительным положением склонов.

Основной ценностью снимков опытного поля, полученных при помощи квадрокоптера, является возможность их дальнейшего геоинформационного анализа. Детальность снимков полностью соответствует масштабу ключевых участков. Цифровое моделирование рельефа на основе высокодетальных БПЛА-снимков позволяет установить влияние геоморфологических условий на содержание гумуса в почвах и смоделировать его пространственное распределение для конкретных условий съёмки, в частности, для территорий с выраженным эрозионным потенциалом.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 1023051000003-9-4.1.1).

ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ 26213-84. Почвы. Определение гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1989.

Гопп Н.В., Мешалкина Ю.Л., Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Чернова О.В. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 1. С. 14–73. DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>.

Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Методы геоморфометрии и цифрового картографирования для оценки пространственной изменчивости свойств агросерой почвы склона // Почвоведение. 2017. № 1. С. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010087>.

Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224.

Кузнецова А.С., Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Технологии создания банка геопространственных данных опытно-производственных хозяйств ФИЦ КНЦ СО РАН // Современные проблемы и перспективы развития агрохимии, земледелия и смежных наук о плодородии почв и продуктивности полевых культур в Сибири. IX Сибирские Прянишниковские агрохимические чтения: материалы международной научно-производственной конференции с международным участием (Красноярск, 20-22 июля 2022 г.) / Г.П. Гамзиков, Н.А. Сурин (общ. ред.). Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2023. С. 239–244.

Ларькин М.А., Губарев Д.И., Несветаев М.Ю., Вайгант А.А. Варьирование и динамика почвенных свойств чернозема обыкновенного Саратовской области // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp47-53>.

Модели кригинга / справка ArcGIS for Desktop [Электронный ресурс]. URL: <http://desktop.arcgis.com>. (дата обращения 14.10.2023).

Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Моделирование пространственной изменчивости агрохимических показателей почв в агроландшафтах Нечерноземья // Агрохимический вестник. 2019. № 5. С. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10069>.

Мыслова Т.Н., Куцаева О.А., Подлесный А.А. Сравнение эффективности методов интерполяции на основе ГИС для оценки пространственного распределения гумуса в почве // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 4. С. 146–152.

Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-95-105>.

Скрябина О.А. Структура почвенного покрова, методы ее изучения. Пермь: ПГСХА, 2007. 206 с.

Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6. № 2. С. 56–60. DOI: [10.24412/2619-0761-2023-2-56-60](https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60)

Чащин А.Н., Самофалова И.А., Мудрых Н.М. Использование морфометрических показателей рельефа для почвенного картографирования пашни в условиях средней тайги в северной части Пермского края // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 4. С. 162–174. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174).

Чинилин, А.В. Наумов В.Д. Михальцов В.С. Цифровое картографирование свойств почв методом регрессионного кригинга на примере лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. Вып. 4. С. 20–31. DOI: [10.26897/0021-342X-2018-4-20-31](https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-4-20-31).

ArcGIS Geostatistical Analysis / Data+ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview>. (дата обращения 06.12.2023).

Buryak Z.A., Ukrainsky P.A., Gusarov A.V., Lukin S.V., Beylich A.A. Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping // Geomorphology. 2023. Vol. 439. 108863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böchner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.

Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Effect of Slope Mesorelief on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index Based on Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. Vol. 55. No. 9. P. 1329–1337. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090202>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Поступила в редакцию 09.11.2023

Принята 04.12.2023

Опубликована 08.12.2023

Сведения об авторах:

Чащин Алексей Николаевич – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); chascshin@mail.ru

Мудрых Наталья Михайловна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); nata020880@hotmail.com

Самофалова Ираида Алексеевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); samofalovairaida@mail.ru

Автор(ы) прочитал(и) и одобрил(и) окончательный вариант рукописи.



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

SPATIAL MODELING OF HUMUS CONTENT WITH THE DRONE-BASED MEASUREMENTS

© 2023 A. N. Chashchin , N. M. Mudrykh , I. A. Samofalova 

Perm State Agro-Technological University, Petropavlovskaya 23, Perm, Russia. E-mail: chascshin@mail.ru, nata020880@hotmail.com, samofalovairaida@mail.ru

The aim of the study was to assess the potential of spatial modeling of soil humus content through measurements with unmanned aerial vehicle (UAV), using digital relief model combined with geostatistical and regression methods.

Location and time of the study. The study area was in the Middle Urals (Perm municipal district of the Perm region) in the southern taiga zone of the Central Russian province. The key area of the surveyed territory is located on the educational and scientific experimental field of the Perm State Agro-Technological University (56°34-37'N and 57°92-93'E). Soil samples were taken with a drill from a depth of 0–20 cm in May 2023.

Methods. The survey data was obtained using the drone DJI mini 2 UAVS from a height of 50 m. The orthophotoplan and digital elevation model of the key site were made using the Drone Deploy software. The object of research was the soil cover of the site, represented by sod-podzolic soils. The soil humus content was determined using potassium digestion method. The UAV data processing was performed using the QGIS 3.22 system and SAGA 9 software. Spatial modeling was carried out using the geostatistical method “Ordinary Kriging” employing the Geostatistical Analyst tool of the ArcGIS 10.8 geographic information system.

Results. Humus content in the 0-20 cm soil layer varied from 0.9 to 3.0%, following normal distribution, thus allowing using the normal labels method without data transformation. The U-shape indicated a strong trend direction from north to south and from west to east. The correlation analysis showed the association of humus content with the morphometric parameters, the correlation coefficient ranging from -0.48 to 0.75. A regression equation was constructed for predicting soil humus content by using the parameters with the maximal correlation coefficients such as height (ELEV), distance to watercourses (Channel Network Distance) and relative position of the slopes (Relative Slope Position), having the correlation coefficients of 0.75, 0.75 and 0.66, respectively. This equation was found to model spatial humus with a relative divergence from Kriging interpolation of -0.6...-1.1%.

Conclusions. The use of highly detailed UAV images to establish the influence of geomorphological conditions on soil properties allows not only to determine their spatial distribution, establish relationships with surface elevations, distance to watercourses, but also to simulate property changes in properties due to anthropogenic intervention, which, among other things, can enhance water erosion.

Key words: UAV; geographic information systems; sod-podzolic soils; humus; morphometric indicators; relief; spatial variability.

How to cite: Chashchin A.N., Mudrykh N.M., Samofalova I.A. Spatial modelling of soil humus content using the drone-based measurements // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e226. DOI: [10.31251/pos.v6i3.226](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.226).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 1023051000003-9-4.1.1).

REFERENCES

- GOST 26213-84. Soils. Determination of humus by the Tyurin method modified by CINAO. Moscow: Standards Publishing House, 1989. (in Russian).
- Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. Mapping of soil organic carbon content and stock at the regional and local levels: the analysis of modern methodological approaches. *Forest Science Issues*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 14–73. DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>. (in Russian).
- Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317010082>.
- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Kuznetsova A. S., Erunova M. G., Yakubailik O. E. Technologies for creating a bank of geospatial data for pilot production farms FRC KSC SB RAS. In book: *Modern problems and prospects for the development of agrochemistry, agriculture and related sciences on soil fertility and productivity of field crops in Siberia. IX Siberian Pryanishnikov agrochemical readings: materials of the international scientific and industrial conference with international participation (Krasnoyarsk, 20–22 July 2022)*. G.P. Gamzikov, N.A. Surin (ed.). Krasnoyarsk: FRC KSC SB RAS, 2023. P. 239–244. (in Russian).
- Larkin M.A., Gubarev D.I., Nesvetayev M.Yu., Vaigant A.A. Variation and dynamics of soil properties of ordinary chernozem in the Saratov region. *Agrarian Scientific Journal*. 2023. No. 10. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp47-53>. (in Russian).
- Kriging models / reference ArcGIS for Desktop [Electronic resource]. URL: <http://desktop.arcgis.com>. (accessed on 14.10.2023).

Mudrykh N.M., Samofalova I.A. Simulation of spatial variability of agrochemical indicators of soils in agricultural fertilizers of the Non-chernozem region. *Agrochemical Herald*. 2019. No. 5. P. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10069>. (in Russian).

Myslyva T.N., Kutsaeva O.A., Podlesnyi A.A. Comparison of efficiency of interpolation methods on the basis of GIS for the estimation of spatial distribution of humus in the soil. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2017. No. 4. P. 146–152.

Savin I. Yu., Vernyuk Yu. I., Faraslis G. The possible use of pilotless aircrafts for operative monitoring of soil productivity. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2015. No. 80. P. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-95-105>. (in Russian).

Skryabina O.A. Soil cover structure, methods of studying it. Perm: PSAA, 2007. 206 p. (in Russian).

Turk G.G., Karachev N.K. Use of unmanned aerial vehicles (UAVS) in geodesy. *Vector of Geosciences*. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 56–60. DOI: [10.24412/2619-0761-2023-2-56-60](https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60). (in Russian).

Chashchin A.N., Samofalova I.A., Mudrykh N.M. The use of morphometric indicators of the relief for soil mapping of around plants in the conditions of the middle taiga in the northern part of the Perm region. *InterCarto. InterGIS*. 2021. Vol. 27. No. 4. P. 162–174. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174). (in Russian).

Chinilin A.V., Naumov V.D., Mikhaltsov V.S. Digital mapping of soil properties by using regression kriging: the case of the forest experimental district of Russian Timiryazev State Agrarian University. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2018. No. 4. P. 20–31. DOI: [10.26897/0021-342X-2018-4-20-31](https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-4-20-31). (in Russian).

ArcGIS Geostatistical Analys / Data+ [Electronic resource]. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview>. (accessed on 06.12.2023).

Buryak Z.A., Ukrainsky P.A., Gusarov A.V., Lukin S.V., Beylich A.A. Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping. *Geomorphology*. 2023. Vol. 439. 108863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.

Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Effect of Slope Mesorelief on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index Based on Remote Sensing Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55. No. 9. P. 1329–1337. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090202>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Received 09 November 2023

Accepted 04 December 2023

Published 08 December 2023

About the authors:

Chashchin Aleksey Nikolaevich – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); chascshin@mail.ru

Mudrykh Natalya Mikhailovna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); nata020880@hotmail.com

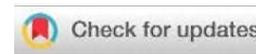
Samofalova Iraida Alekseevna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); samofalovairaida@mail.ru

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/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.224>

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КУЗНЕЦКО-САЛАИРСКОЙ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ: МЕТОДИКА ЦИФРОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ, ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ, КОРРЕЛЯЦИЯ С СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

© 2023 Н. В. Гопп

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

Цель исследования. Разработать методику цифрового картографирования агроэкологического потенциала (АП) западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции и провести сравнительный анализ данного показателя, характерного для 12-ти типов и подтипов почв изучаемой территории; провести корреляционный анализ зависимости между географо-климатическими показателями и содержанием органического углерода в почвах.

Территория исследования и методы. Территория исследования занимает западную часть Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции Алтае-Саянской горной страны (Россия, Новосибирская область, Искитимский район). В работе использованы: методы цифрового картографирования; геопространственный, корреляционный и сравнительно-географический анализы.

Основные результаты. Разработанная методика и использование картографических данных в растровом формате позволили выявить выраженную пространственную дифференциацию АП изучаемой территории, а также отобразить его пространственное изменение на цифровой карте. Геопространственный анализ показал, что значения АП варьируют в диапазоне от 4,5 до 6,0 и увеличиваются с юго-запада на северо-восток исследуемой территории. Изменение АП на 0,5 единицы послужило основанием для выделения 3-х агроклиматических оценочных подзон. Средние значения АП, характерные для почв изучаемой территории, варьировали в диапазоне от 4,9 до 5,4. Зависимости между географо-климатическими параметрами (сумма активных температур воздуха выше 10°C, сумма осадков и испаряемость в год, географическая широта, коэффициенты увлажнения и континентальности климата) и содержанием органического углерода в почвах характеризовались умеренной и заметной силой связи.

Заключение. Проведенные исследования позволили: 1) разработать методику цифрового картографирования агроэкологического потенциала и выделить 3 агроклиматические оценочные подзоны; 2) получить более точные сведения об изменении климатических характеристик в пространстве; 3) определить средние значения агроэкологического потенциала, характерные для 12-ти типов и подтипов почв изучаемой территории; 4) выявить зависимость между географо-климатическими показателями и содержанием органического углерода в почвах.

Карты агроэкологического потенциала можно в дальнейшем использовать для составления карт нормативной урожайности выращиваемых культур; подбора сортов сельскохозяйственных культур с определенными потребностями в ресурсах тепла и влаги; проектирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия; оценки кадастровой стоимости земель и их пригодности для использования в сельском хозяйстве; изучения влияния климатических характеристик на почвенно-растительный покров.

Ключевые слова: сумма активных температур воздуха; коэффициент увлажнения; континентальность климата; почвенная база данных; WorldClim, SAGA GIS.

Цитирование: Гопп Н.В. Агроэкологический потенциал западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: методика цифрового картографирования, геопространственный анализ, корреляция с содержанием органического углерода в почвах // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e224. DOI: [10.31251/pos.v6i3.224](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.224).

Исправления в статье. В настоящую статью внесены изменения в связи с обнаруженной ошибкой расчёта карты поправки к коэффициенту увлажнения в программном обеспечении. В конечном результате значительно изменились две карты (коэффициента увлажнения и агроэкологического потенциала) и рисунок 5.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка природных ресурсов, в частности, климатического потенциала территории, имеет важное значение в агрономической практике; влияет на выработку оптимальных стратегий снабжения продовольствием населения, эффективное использование и управление земельными и растительными ресурсами (Altieri et al., 2015; Булгаков и др., 2016; Шпедт, Трубников, 2020). Согласно литературным данным (Тарбаев и др., 2020), продуктивность угодий зависит как от естественных факторов (обеспеченность территории водными и тепловыми ресурсами, почвенные свойства), так и от агротехнологических приёмов (подбор сортов, управление пищевым режимом, борьба с болезнями, сорняками и вредителями). Кроме этого, оценка и изучение влияния климатических показателей на почвенный покров имеет важное значение в фундаментальных исследованиях, так как климат является важным фактором почвообразования. Существует достаточно много отдельных показателей, которые характеризуют особенности климатических условий территории в определенном аспекте. Однако эти показатели эффективнее всего рассматривать в совокупности с другими. Среди интегральных показателей можно выделить **агроэкологический потенциал (АП)**, который объединяет в себя климатические показатели, характеризующие обеспеченность территории ресурсами тепла и влаги с учетом континентальности климата. Для расчета АП используются следующие климатические показатели: сумма активных температур воздуха выше 10°C (**САТ10**), коэффициенты увлажнения (**КУ**) и континентальности климата (**КК**) (Карманов, Булгаков, 1997; Карманов, Фриев, 1982; Шишов и др., 1991; Оценка качества ..., 2007). Климатические показатели не постоянны как в пространственном, так и временном аспектах, а их изменение влияет на АП, который для наглядности лучше всего отображать на картах (Гопш, 2023). Наличие усредненных за несколько лет климатических данных в удобном для математических расчетов виде (растры/гриды) позволяет упростить процедуру картографирования АП и сделать итоговые карты, во-первых, более точными, во-вторых, дифференцированными в пространственном отношении, по сравнению с расчетами с использованием только справочных данных. Последние представляют собой усредненные значения для большой площади исследуемой территории и не позволяют объективно оценить пространственную дифференциацию АП. Оценка и картографирование АП необходимы, прежде всего, для подбора сортов сельскохозяйственных культур и планирования мероприятий по их возделыванию, а также для сравнительного анализа значений АП, характерных для компонентов ландшафта (почв, растительности и др.). Кроме того, АП применяется при оценке качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве (Методические рекомендации..., 2003; Оценка качества..., 2007), кадастровой стоимости земель сельскохозяйственного назначения (Государственная кадастровая ..., 2012; Шехтер, Сапожников, 2022), а также является важной составляющей при расчете почвенно-экологического индекса (Шишов и др., 1991; Карманов, Булгаков, 2012).

Цель исследования – разработать методику цифрового картографирования агроэкологического потенциала (АП) западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции и провести сравнительный анализ данного показателя, характерного для 12-ти типов и подтипов почв изучаемой территории; провести корреляционный анализ зависимости между географо-климатическими показателями и содержанием органического углерода в почвах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования расположена в западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции Алтае-Саянской горной страны (Россия, Новосибирская область, Искитимский район) и занимает площадь 4384 км² (рис. 1).

Климат территории континентальный. Средние температуры воздуха: годовая – -0,3°C...-0,6°C, января – -19°C, июля – +19°C. Количество осадков варьирует от 400 до 450 мм/год. Коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова (отношение суммы осадков к испарению в год) варьирует от 0,7 до 0,8. Сумма активных температур воздуха выше 10°C (САТ10) находится в диапазоне от 1750 до 1900°C (Почвенно-климатический атлас..., 1978).

Названия таксономических единиц почв приведены в соответствии с Классификацией и диагностикой почв СССР (Классификация..., 1977). Наименование почв согласно международной классификации почв WRB (IUSS..., 2015) следующее (приведено в скобках): чернозем выщелоченный (Luvic Chernozem); чернозем оподзоленный (Luvic Greyzemic Chernozem); лугово-черноземная обыкновенная (Gleyic Chernozem); лугово-черноземная оподзоленная (Greyzemic

Gleyic Chernozem); светло-серая, серая, темно-серая лесная (Luvic Greyzemic Phaeozem); луговая карбонатная (Eutric Gleysol); луговая оподзоленная (Haplic Gleysols); луговая солончаковатая (Haplic Gleysol (Protosalic)); аллювиальная луговая (Eutric Fluvisol); солонец луговой (Gleyic Solonetz).

Черноземы, темно-серые лесные, серые и светло-серые лесные почвы сформировались на лёссовидных карбонатных суглинках; на оглеенных лёссовидных суглинках – лугово-черноземные и луговые почвы; на аллювиальных отложениях рек (супесях и песках) – аллювиальные луговые почвы. Гранулометрический состав почвообразующих пород и почв в основном представлен средними и тяжелыми суглинками (иловато-пылеватыми). База данных почвенных разрезов была создана на основе архивных данных проектного института по землеустройству «ЗАПСИБГИПРОЗЕМ», проводившего почвенные обследования в 1984–1990 гг. В общей сложности в базе данных содержится описание 263 профилей почв. Содержание органического углерода в почвах определяли мокрым озолением по Тюрину (Агрохимические методы..., 1975).

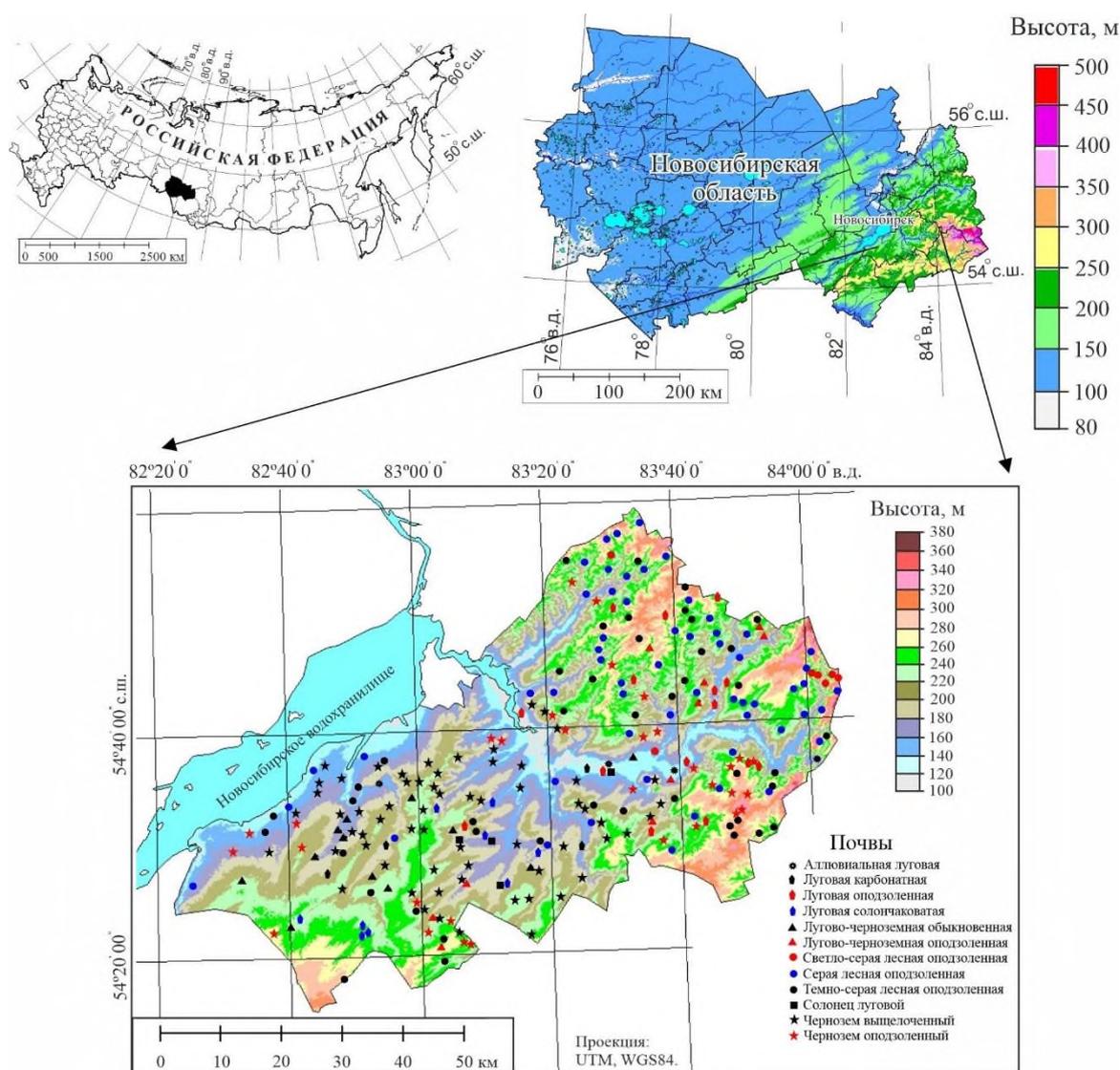


Рисунок 1. Карта территории исследования и схема расположения почвенных разрезов (n=263).

Агроэкологический потенциал рассчитывали по следующей формуле (Шишов и др., 1991; Оценка качества ..., 2007; Справочник агроклиматического..., 2010):

$$АП = \frac{\sum t > 10^{\circ} \times (КУ - P)}{КК + 100} \quad (1)$$

где $\sum t > 10^{\circ}$ – сумма активных температур воздуха выше 10°C ; КУ – коэффициент увлажнения (отношение количества осадков в год к испаряемости), величины КУ более 1,1 принимаются

равными 1,1; P – поправка к КУ, при КУ > 0,76: P=0,20–0,6 (1,1–КУ); при КУ 0,76–0,36 P=0; при КУ 0,35–0,30 P=0,35–КУ; при КУ < 0,30 P=0,05; КК – коэффициент континентальности климата.

Коэффициент континентальности климата (КК) рассчитывали по формуле (Шишов и др., 1991; Оценка качества ..., 2007):

$$КК = \frac{360 \times (t^{\circ}_{\max} - t^{\circ}_{\min})}{\lambda + 10} \quad (2)$$

где t°_{\max} – средняя температура самого теплого месяца; t°_{\min} – средняя температура самого холодного месяца; λ – широта местности с точностью до десятых долей градуса.

Величины КК более 200 принимали равными 200 (Шишов и др., 1991; Оценка качества..., 2007).

В качестве исходных данных для расчета карты АП были использованы геопривязанные растровые карты:

- 1) суммы активных температур воздуха выше 10°C (Почвенно-климатический атлас..., 1978);
- 2) коэффициента увлажнения (построена на основе растровых карт суммы осадков в год WorldClim (Fick, Hijmans, 2017) и испаряемости с открытой водной поверхности пресного водоёма (Почвенно-климатический атлас..., 1978));
- 3) коэффициента континентальности климата (карта построена на основе растровых карт средней температуры самого теплого и холодного месяцев WorldClim (Fick, Hijmans, 2017) по формуле 2).

Все математические операции с геопривязанными растровыми картами проведены в программном обеспечении SAGA GIS (Conrad et al., 2015), в том числе корректировка растровой карты коэффициента увлажнения согласно поправкам к КУ. Растровая карта широты местности (десятичные градусы в каждом пикселе в координате Z), необходимая для составления карты коэффициента континентальности климата, была составлена с точностью до четырех знаков после запятой. Все растровые карты приведены к разрешению 30×30 м.

Корреляционный анализ проведен с использованием непараметрического коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s) при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно изданию (Справочник..., 2010), территория исследования относится к 4-ой агроклиматической оценочной подзоне, для которой характерны следующие средние значения климатических параметров: САТ10 – 1861°C, КУ – 0,86; КК – 200, АП – 5 (рис. 2).



Рисунок 2. Карта-схема агроклиматического оценочного зонирования Новосибирской области (Справочник..., 2010).

Согласно разработанной методике, составлены геопривязанные растровые карты климатических параметров, необходимые для расчета АП (рис. 3). По карте САТ10 выявлено, что значения варьируют от 1650 до 1900°C; они отличаются от справочных, прежде всего тем, что это не одно среднее значение для всей территории, а множество локальных значений пикселей, изменяющихся в пространстве, с отчётливо заметным трендом увеличения с северо-востока на юго-запад (рис. 3, А). САТ10 изучаемой территории подходит для выращивания большинства сельскохозяйственных культур с различной группой спелости (ранне-, средне- и позднеспелые), за исключением теплолюбивых культур, для полного созревания которых необходимы более высокие значения этого показателя (средне- и позднеспелые сорта подсолнечника, средне- и позднеспелые сорта кукурузы и др.). Если культура обеспечена теплом менее, чем на 50%, то её возделывание не имеет смысла (Лосев, 1994).

По картам суммы осадков в год и испаряемости выявлено, что эти значения варьируют от 375 до 500 мм и от 350 до 500 мм, соответственно (рис. 3, Б, В). Согласно атласу (Почвенно-климатический..., 1978), в зависимости от суммы осадков в год выделяют три типа увлажнения: достаточное, но неустойчивое (350–400 мм); избыточное, устойчивое увлажнение (400–450 мм) и весьма избыточное устойчивое увлажнение (> 450 мм). На соответствующей карте отчётливо заметен тренд увеличения количества осадков с юго-запад на северо-восток (рис. 3, Б). На производной карте коэффициента увлажнения показано, что значения с учетом поправки варьируют в диапазоне от 0,7 до 0,9 (рис. 3, Г). Без учета поправки значения КУ варьируют в диапазоне от 0,7 до 1,4 (Гопш, 2023).

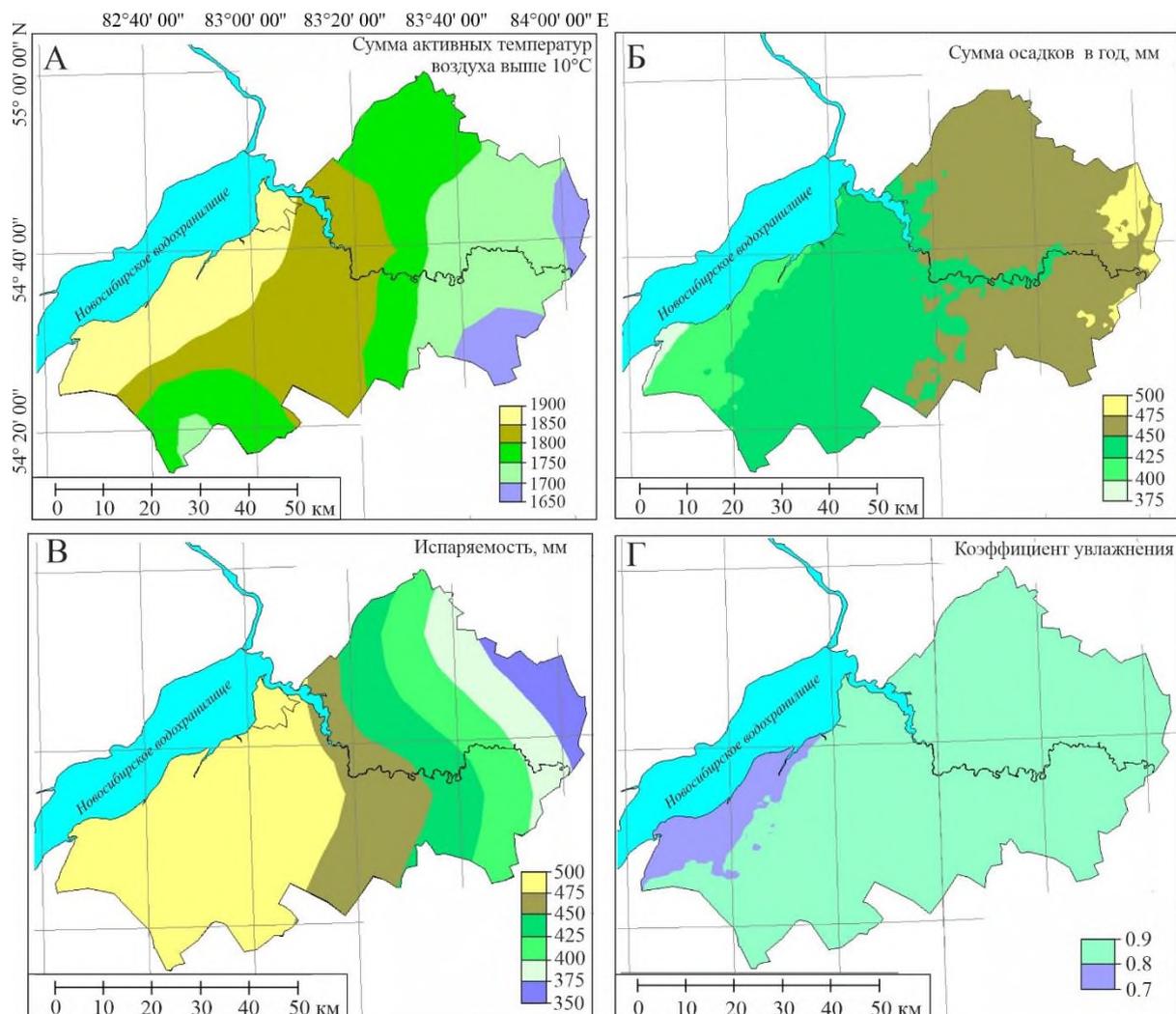


Рисунок 3. Карты климатических показателей западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: А – сумма активных температур воздуха выше 10°C; Б – сумма осадков в год, мм; В – испаряемость с открытой водной поверхностью пресного водоёма в год, мм; Г – коэффициент увлажнения (с учетом поправки).

Для расчета коэффициента континентальности климата (КК) были использованы растровые карты среднеголетних (1970–2000 гг.) данных WorldClim 2.1 по средним температурам самого холодного и теплого месяцев. Средняя температура в июле варьировала на изучаемой территории в более широком диапазоне, чем средняя температура января (рис. 4, А, Б).

На карте коэффициента континентальности климата (с корректировкой) заметен тренд увеличения значений с северо-востока на юго-запад, т.е. контрастность температур в юго-западной части выражена более значительно, чем в северо-восточной (рис. 4, В). Без приведения значений к 200, КК варьировал в диапазоне от 190 до 204 с максимальными значениями в юго-западной части.

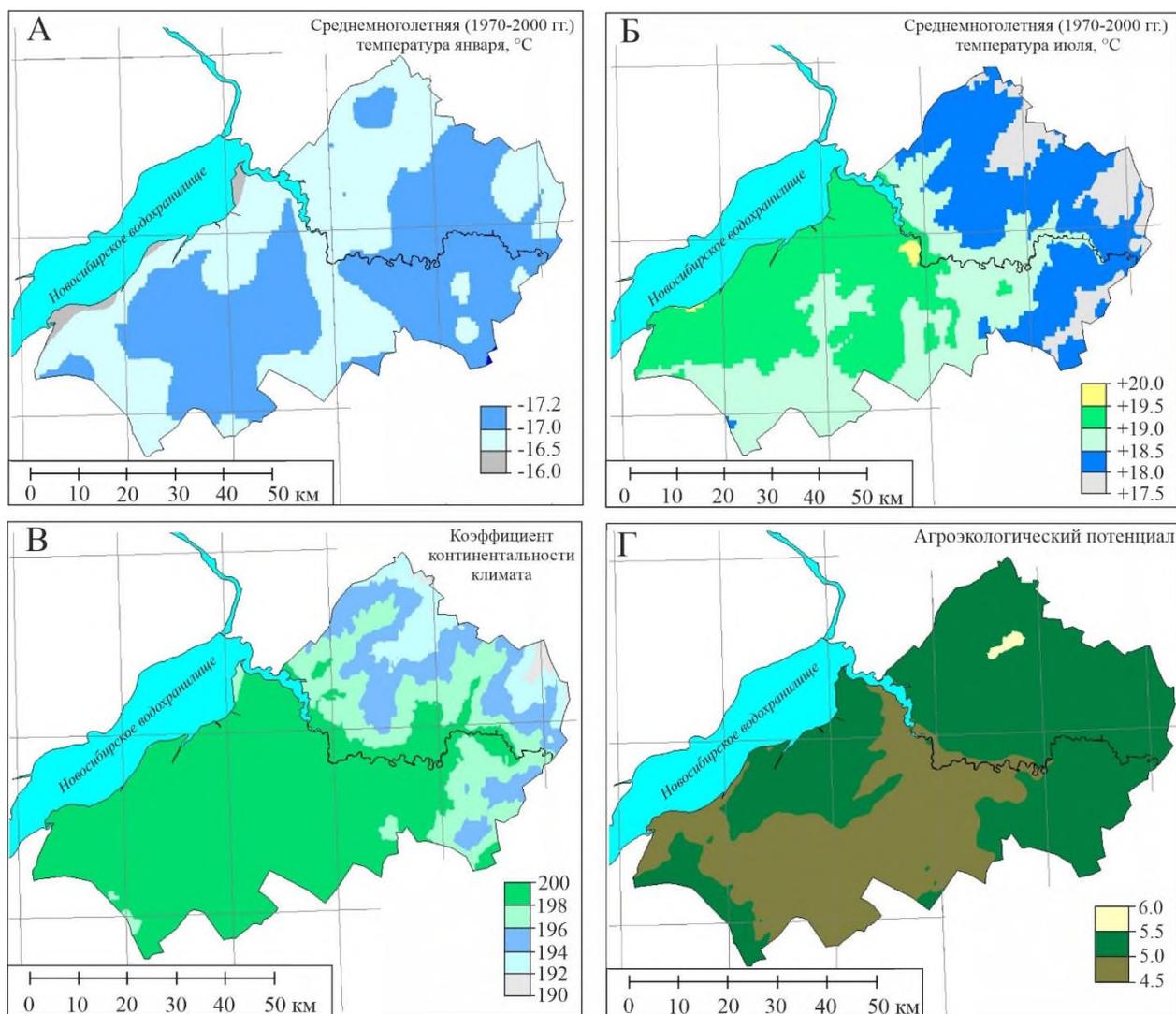


Рисунок 4. Карты климатических показателей западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: А – среднеголетняя (1970–2000 гг.) температура воздуха в январе, °С; Б – среднеголетняя (1970–2000 гг.) температура воздуха в июле, °С; В – коэффициент континентальности климата; Г – агроэкологический потенциал.

Интегральная карта АП, составленная с использованием растровых карт климатических показателей (рис. 3, А, Г; рис. 4, В), характеризуется выраженной пространственной дифференциацией по значениям АП (рис. 4, Г). Установлено, что АП увеличивается с юго-запада на северо-восток изучаемой территории от 4,5 до 6,0, т.е. северо-восточная часть территории в отношении имеющихся ресурсов тепла и влаги является более ценной, чем юго-западная. Согласно изданию (Справочник..., 2010), расчётное значение АП для всей изучаемой территории равно 5 (без диапазона варьирования). Таким образом, использование геопривязанных тематических карт позволило получить более точные сведения об агроэкологическом потенциале, а также отобразить его пространственное изменение на цифровой карте.

Для изучаемой территории интересен тот факт, что в отношении содержания органического углерода ($C_{орг}$) в почвах выявлена обратная тенденция изменения этого показателя, а именно, содержание $C_{орг}$ увеличивалось с северо-востока на юго-запад (Gopp, 2021). Таким образом, при условии отсутствия дефицита ресурсов тепла и влаги в юго-западной части, это может приводить к повышению урожайности сельскохозяйственных культур за счет лучшего плодородия почв.

Изменение показателя АП на 0,5 единиц служит основанием для выделения новых агроклиматических оценочных подзон (Оценка качества..., 2007). Таким образом, на изучаемой территории можно выделить 3 агроклиматические оценочные подзоны (рис. 4, Г), а не одну, которая представлена в справочнике (Справочник..., 2010).

Для сравнения: АП Краснодарского края, отличающегося высокими урожаями сельскохозяйственных культур, варьирует в диапазоне от 8,5 до 15,3 (28 агроклиматических подзон) (Справочник..., 2010), т.е. по сравнению с этим краем АП западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции значительно ниже. Средняя нормативная урожайность зерновых колосовых культур (без подразделения на виды) в Краснодарском крае составляет 46,1 ц/га, а в Новосибирской области – 16,3 ц/га (Справочник..., 2010). Известно, что фактическая урожайность культур варьирует из года в год и может отличаться от расчетной нормативной урожайности в несколько раз. Например, согласно интернет-изданию (Искитимская газета..., 2022), в 2022 году урожайность яровой пшеницы сорта «Тризо» в хозяйстве АО «Полевод» составила 82 ц/га, до этого года максимальный рекорд не превышал 50 ц/га. Это хозяйство находится северо-восточной части изучаемой территории, для которого характерны относительно высокие значения АП от 5,0 до 5,5 (рис. 4, Г). Высокие урожаи в этом хозяйстве обеспечиваются оптимальными климатическими условиями, наличием средне- и сильногумусированных почв, а также агротехническими приёмами (хозяйство перешло на применение четырехкратной подкормки жидкими и сухими удобрениями в течении вегетации). Из этого следует, что и в условиях Сибири можно получать высокие урожаи зерновых культур, сопоставимые с таковыми в других регионах страны с высоким агроэкологическим потенциалом. Очевидно, что такие результаты достигаются благодаря не только оптимальному сочетанию климатических и почвенных показателей, но и высокой агротехнике.

По анализу средних значений АП, характерных для почв изучаемой территории, можно сделать вывод о том, что формирование разных типов и подтипов почв происходит в широком диапазоне агроэкологического потенциала (рис. 5). Для почв полугидроморфного и гидроморфного рядов увлажнения характерны более высокие значения АП (почвы под номерами 1, 2, 3, 4, 5 на рис. 5).

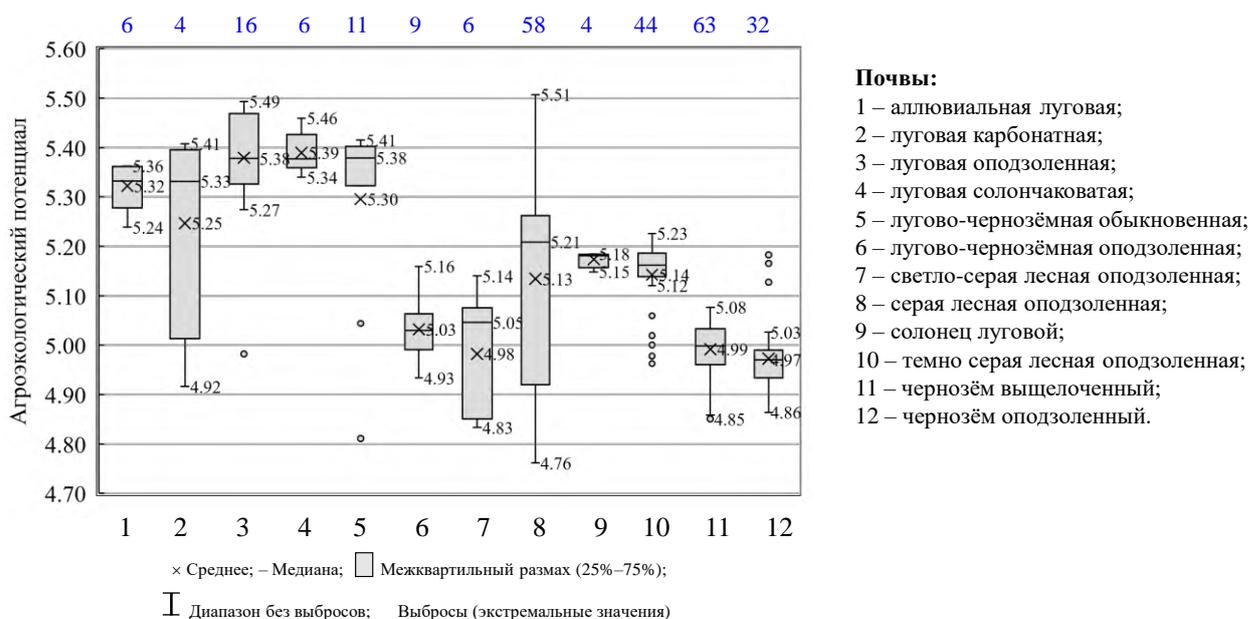


Рисунок 5. Варьирование значений агроэкологического потенциала, характерного для почв западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции (объём выборки указан синими цифрами над диаграммами размаха).

Изучение корреляционной матрицы показало, что зависимости между географо-климатическими показателями и содержанием $C_{орг}$ характеризовались умеренной (r_s от 0,3 до 0,5) и заметной (r_s от 0,5 до 0,7) силой связи (табл.). Заметная корреляция с отрицательным знаком наблюдалась между $C_{орг}$ и географической широтой ($r_s = -0,62$), т.е. при увеличении широты содержание $C_{орг}$ уменьшалось. Зависимость между коэффициентом континентальности климата и $C_{орг}$ также была достаточно весомой (r_s от 0,53 до 0,54), что позволяет сделать предположение о значимом влиянии температурной контрастности климата на накопление углерода в почвах. Учитывая то, что КК варьировал в узком диапазоне (от 190 до 200) и повторял пространственный тренд в изменении $C_{орг}$, то такая корреляция может быть связана с совпадением трендов, и не более того. Корреляцию с отрицательным знаком между $C_{орг}$ и показателями, характеризующими увлажнение территории (сумма годовых осадков, коэффициент увлажнения), можно объяснить только тем, что эти показатели имеют разнонаправленные тенденции изменения в пространстве. Согласно литературным данным (Cheng et al., 2023), корреляция между этими показателями может быть как положительной, так и отрицательной.

Таблица

Коэффициенты корреляции Спирмена ($p < 0,05$, $n = 263$)

Географо-климатические и почвенные показатели	SAT10	Сумма осадков	Испаряемость	КУ (без учета P)	КУ-P	t°_{max}	t°_{min}	Геогр. широта	КК*	КК**	АП	$C_{орг}$
SAT10	-	-0,85	0,87	-0,86	-0,85	0,84	0,13	-0,33	0,72	0,68	-0,37	0,28
Сумма осадков	-0,85	-	-0,95	0,97	0,96	-0,91	x	0,61	-0,86	-0,85	0,65	-0,45
Испаряемость	0,87	-0,95	-	-0,99	-0,98	0,91	x	-0,64	0,86	0,85	-0,69	0,46
КУ (без учета P)	-0,86	0,97	-0,99	-	0,98	-0,91	x	0,65	-0,85	-0,87	0,68	-0,46
КУ-P	-0,85	0,96	-0,98	0,98	-	-0,91	x	0,66	-0,86	-0,85	0,81	-0,44
t°_{max}	0,84	-0,91	0,91	-0,91	-0,91	-	-0,13	-0,58	0,95	0,91	-0,75	0,44
t°_{min}	0,13	x	x	x	x	-0,13	-	0,16	-0,38	-0,29	0,24	-0,23
Геогр. широта	-0,33	0,61	-0,64	0,65	0,66	-0,58	0,16	-	-0,68	-0,73	0,85	-0,62
КК*	0,72	-0,86	0,86	-0,85	-0,86	0,95	-0,38	-0,68	-	0,95	-0,83	0,53
КК**	0,68	-0,85	0,85	-0,87	-0,85	0,91	-0,29	-0,73	0,95	-	-0,83	0,54
АП	-0,37	0,65	-0,69	0,68	0,81	-0,75	0,24	0,85	-0,83	-0,83	-	-0,50
$C_{орг}$	0,28	-0,45	0,46	-0,46	-0,44	0,44	-0,23	-0,62	0,53	0,54	-0,50	-

Примечание.

SAT10 – сумма активных температур воздуха выше 10°C; КУ (без учета P) – коэффициент увлажнения без учета поправки (P); КУ-P – коэффициент увлажнения с учетом поправки (P); t°_{max} – средняя температура самого теплого месяца (июль); t°_{min} – средняя температура самого холодного месяца (январь); КК* – коэффициент континентальности климата без коррекции значений выше 200; КК** – коэффициент континентальности климата с коррекцией значений выше 200; АП – агроэкологический потенциал; $C_{орг}$ – содержание органического углерода в почвах; x – корреляция не значима при $p < 0,05$.

Сила связи (коэффициент корреляции Спирмена (r_s) по шкале Чеддока): 0,1–0,3 – слабая, 0,3–0,5 – умеренная, 0,5–0,7 – заметная, 0,7–0,9 – высокая, 0,9–0,99 – весьма высокая.

Для изучаемой территории выявлен противоположный агроэкологическому потенциалу тренд увеличения содержания $C_{орг}$ (Gopp, 2021), поэтому наличие отрицательного коэффициента корреляции ($r_s = -0,50$) между $C_{орг}$ и АП вполне закономерен. Изучение углеродно-климатических зависимостей показало, что они могут быть как с положительным, так и отрицательным знаком (см. табл.). Таким образом, очевидно, что изменение значений содержания $C_{орг}$ и климатических показателей в пространстве не всегда идет в одном направлении. Поэтому выводы о влиянии климатических показателей на изменение содержания $C_{орг}$ в почвах могут быть противоречивыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами исследования западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции позволили: 1) разработать методику цифрового картографирования агроэкологического потенциала (АП) и выделить 3 агроклиматические оценочные подзоны; 2) получить более точные сведения об изменении климатических характеристик в пространстве; 3) определить средние значения агроэкологического потенциала, характерные для 12-ти типов и подтипов почв изучаемой территории; 4) выявить зависимость между географо-климатическими показателями и содержанием органического углерода в почвах.

Выполнение картографических работ не требует выезда на территорию исследования, так как все необходимые исходные картографические данные (сумма активных температур воздуха выше 10°C, сумма осадков и испаряемость в год) для составления карты АП находятся в свободном доступе в сети Интернет, справочниках и атласах, а производные карты (коэффициенты увлажнения и континентальности климата) рассчитываются на основе вышперечисленных исходных данных. Разработанную методику можно усовершенствовать путем учёта сведений об экспозиции склонов и топографическом индексе влажности, которые можно вычислить с использованием цифровых моделей высот. Склоны различной экспозиции отличаются по ресурсам влаги и тепла, а их изменение приводит к изменению коэффициента увлажнения, влияющего на варьирование значений АП. Таким образом, дополнительный учёт этих показателей позволит создать более точную и дифференцированную карту АП, учитывающую микроклиматические условия, формирующиеся благодаря рельефу.

Карты агроэкологического потенциала можно в дальнейшем использовать для составления карт нормативной урожайности выращиваемых культур; подбора сортов сельскохозяйственных культур с определенными потребностями в ресурсах тепла и влаги; проектирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия; оценки кадастровой стоимости земель и их пригодности для использования в сельском хозяйстве; изучения влияния климатических характеристик на почвенно-растительный покров.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.

Булгаков Д.С., Рухович Д.И., Шишконокова Е.А., Вильчевская Е.В. Выделение агроклиматических ареалов для оптимального возделывания сельскохозяйственных культур в границах природно-сельскохозяйственного районирования территории России // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1118–1130. DOI: [10.7868/S0032180X16070030](https://doi.org/10.7868/S0032180X16070030).

Гопп Н.В. Цифровое картографирование агроэкологического потенциала западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции // Почвы и окружающая среда: Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2–6 октября 2023 г., г. Новосибирск). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 66–70. DOI: [10.31251/conf1-2023](https://doi.org/10.31251/conf1-2023).

Государственная кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации / Под ред. П.М. Сапожникова, С.И. Носова. Москва, 2012. 157 с.

Искитимская газета [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://goo.su/Jd0Fl> (дата обращения 04.07.2023).

Карманов И.И., Булгаков Д.С. Методика почвенно-агроклиматической оценки пахотных земель для кадастра. Москва: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. АПР, 2012. 122 с.

Карманов И.И., Булгаков Д.С. Ландшафтно-сельскохозяйственная типизация территории: методическое пособие. Москва: РАСХН, Почв. ин-т им. Докучаева, 1997. 48 с.

Карманов И.И., Фриев Т.А. Бонитировка почв на основе почвенно-экологических показателей // Почвоведение. 1982. № 5. С. 13–21.

Классификация и диагностика почв СССР. Москва: Колос, 1977. 224 с.

Лосев А.П. Практикум по агрометеорологическому обеспечению растениеводства. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1994. 244 с.

Методические рекомендации по оценке качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. Росземкадастр, ФГУП «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ, РосНИИземпроект, 2003. 170 с.

Оценка качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. Москва: Роснедвижимость – ФГУП «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ, 2007. 131 с.

Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1978. 122 с.

Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации. Учеб. практическое пособие / Под ред. С.И. Носова. Ответственный исполнитель Оглезнев А.К. Москва: Маросейка, 2010. 208 с.

Тарбаев В.А., Янюк В.М., Дорогобед А.А., Шадау Ю.И., Кузниченкова Т.В. Зонирование агроэкологического потенциала территории для оценки сельскохозяйственных угодий Саратовской области // Аграрный научный журнал. 2020. № 4. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i4pp37-43>.

Шехтер К.П., Сапожников П.М. Кадастровая стоимость земель агроландшафтов Краснодарского края // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2022. № 2. С. 103–109.

Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В. Почвенно-экологическая оценка и бонитировка почв // Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. Москва: Наука, 1991. С. 161–223.

Шпедт А.А., Трубников Ю.Н., Методика оценки природно-ресурсного потенциала агроландшафтов России // Живые и биокосные системы. 2020. № 31. С. 1–13. DOI: [10.18522/2308-9709-2020-31-1](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-31-1).

Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. 35. P. 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.

Cheng X., Zhou T., Liu S., Sun X., Zhou Y., Xu L., Xie B., Ying J., Shi Y. Effects of Climate on Variation of Soil Organic Carbon and Alkali-Hydrolyzed Nitrogen in Subtropical Forests: A Case Study of Zhejiang Province, China. // *Forests*. 2023. Vol. 14. No. 5. P. 914. <https://doi.org/10.3390/f14050914>.

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

Gopp N.V. The Use of the Soil-Geomorphological Database for Studying the Spatial Variability of the Humus Content, Physical Clay, and Clay in the Soils of the Kuznetsk–Salair Geomorphological Province // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 986–998. <https://doi.org/10.1134/S106422932107005X>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>

Поступила в редакцию 06.11.2023

Принята 16.11.2023

Опубликована 25.11.2023

Сведения об авторе:

Гопп Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); gopp@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

AGROECOLOGICAL POTENTIAL OF THE WESTERN PART OF THE KUZNETSK-SALAIR GEOMORPHOLOGICAL PROVINCE: DIGITAL MAPPING METHODOLOGY, GEOSPATIAL ANALYSIS, CORRELATION WITH SOIL ORGANIC CARBON CONTENT

© 2023 N. V. Gopp 

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

The aim of the study: to develop a methodology of digital mapping of the agroecological potential (AP) of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province and to conduct a comparative analysis of the studied parameter typical for 12 types and subtypes of soils of the studied territory; to conduct a correlation analysis of the relationship between climatic and geographical indicators and soil organic carbon content.

Studied area and method. The studied area occupies the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province of the Altai-Sayan Mountain country (Russia, Novosibirsk region, Iskitimsky district). The methods of digital mapping, geospatial, correlation and comparative geographical analyses were used in the work.

Results. The developed methodology and the use of maps in raster format enabled to identify the pronounced spatial differentiation of the AP, as well as to visualize its spatial change on a digital map. Geospatial analysis showed that AP values varied in the range from 4,5 to 6,0, increasing from the southwest to the northeast of the study area. The change in AP by 0,5 units served as the basis for the allocation of three agro-climatic evaluation subzones. The average AP values, characteristic of the soils, varied in the range from 4,9 to 5,4. The correlation between climatic and geographical parameters (the sum of active air temperatures above 10 °C, the amount of precipitation and evaporation per year, geographical latitude, coefficients of humidification and continentality of the climate) and the organic carbon content were characterized by a moderate and noticeable strength of the relationship.

Conclusions. The conducted research allowed: 1) to develop a methodology for digital mapping of agroecological potential and identify eight agro-climatic assessment subzones; 2) to obtain more accurate information about spatial changes in climatic characteristics; 3) to determine the average values of agroecological potential typical for 12 types and subtypes of soils of the studied territory; 4) to identify the relationship between climatic and geographical parameters and the content of organic matter carbon in soils.

Maps of agroecological potential can be further used for mapping the normative yield of agricultural crops; selection of varieties of crops with certain needs for heat and moisture resources for growth and development; designing adaptive landscape systems of agriculture; assessment of the cadastral cost of agricultural land and the suitability of land for use in agriculture; studying the influence of climatic characteristics on soil and vegetation covers.

Key words: sum of active air temperatures; humidification coefficient; continentality of climate; soil database; WorldClim; SAGA GIS.

How to cite: Gopp N.V. Agroecological potential of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province: digital mapping methodology, geospatial analysis, correlation with soil organic carbon content // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e224. DOI: [10.31251/pos.v6i3.224](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.224). (in Russian with English abstract).

Corrigendum. This article was modified due to an error detected the software employed for calculating the correction map for the moisture coefficient. As a result, two maps (moisture coefficient and agroecological potential) and Figure 5 changed significantly.

FUNDING

This study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № 121031700316-9).

REFERENCES

Agrochemical Methods of Soil Studies. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).

Bulgakov D.S., Rukhovich D.I., Shishkonakova E.A., Vilchevskaya E.V. Separation of agroclimatic areas for optimal crop growing within the framework of the natural–agricultural zoning of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2016. No. 49. P. 1049–1060. <https://doi.org/10.1134/S1064229316070036>.

Gopp N.V. Digital mapping of agroecological potential of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province. In book: *Soils and Environment: Collection of materials of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB*

- RAS (October 2-6, 2023, Novosibirsk). Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 66–70. DOI: [10.31251/conf1-2023](https://doi.org/10.31251/conf1-2023). (in Russian).
- State cadastral assessment of agricultural lands of the Russian Federation / Edited by P.M. Sapozhnikov, S.I. Nosov. Moscow, 2012. 157 p. (in Russian).
- Iskitim Newspaper [Electronic resource]. 2022. URL: <https://goo.su/Jd0FI> (accessed on 04.07.2023). (in Russian).
- Karmanov I.I., Bulgakov D.S. Methodology of soil-agro-climatic assessment of arable land for cadastre. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. APR, 2012. 122 p. (in Russian).
- Karmanov I.I., Bulgakov D.S. Landscape and agricultural typification of the territory: a methodological guide. Moscow: RAAS, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1997. 48 p. (in Russian).
- Karmanov I.I., Friev T.A. Soil bonitization based on soil-ecological indicators. Pochvovedenie. 1982. No. 5. P. 13–21. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of the USSR. Moscow: Kolos, 1977. 224 p. (in Russian).
- Losev A.P. Workshop on agrometeorological support of crop production. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1994. 244 p. (in Russian).
- Methodological recommendations for assessing the quality and classification of land according to their suitability for use in agriculture. Roszemkadastr, "Goszemkadastrsemka" – VISHAGI, RosNIIZemproekt, 2003. 170 p. (in Russian).
- Assessment of the quality and classification of lands according to their suitability for use in agriculture. Moscow: Rosnedvizhimost – "Goszemkadastrsemka" – VISHAGI, 2007. 131 p. (in Russian).
- Soil and climatic atlas of the Novosibirsk region. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1978. 122 p. (in Russian).
- Handbook of agro-climatic assessment zoning of the subjects of the Russian Federation. Practical guide / Edited by S.I. Nosov. Responsible executor Ogleznev A.K. Moscow: Maroseyka, 2010. 208 p. (in Russian).
- Tarbaev V.A., Yanyuk V.M., Dorogobed A.A., Shadau Yu.I., Kuznichenkova T.V. Zoning of agroecological potential areas for agricultural land assessment of the Saratov region. The Agrarian Scientific Journal. 2020. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i4pp37-43>. (in Russian).
- Shekhter K.P., Sapozhnikov P.M. Cadastral Value of Agricultural Landscapes of Krasnodar Region. *Use and Protection of Natural Resources of Russia*. 2022. No. 2. P. 103–109. (in Russian).
- Shishov L.L., Durmanov D.N., Karmanov I.I., Efremov V.V. Soil-ecological assessment and soil bonitization. In book: Theoretical foundations and ways of regulating soil fertility. Moscow: Nauka Publ., 1991. P. 161–223. (in Russian).
- Shpedt A.A., Trubnikov Yu.N., Methodology for assessing the natural resource potential of agricultural landscapes of Russia. Zhivye i biokosnye sistemy. 2020. No. 31. P. 1–13. DOI: [10.18522/2308-9709-2020-31-1](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2020-31-1). (in Russian).
- Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. 35. P. 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- Cheng X., Zhou T., Liu S., Sun X., Zhou Y., Xu L., Xie B., Ying J., Shi Y. Effects of Climate on Variation of Soil Organic Carbon and Alkali-Hydrolyzed Nitrogen in Subtropical Forests: A Case Study of Zhejiang Province, China. *Forests*. 2023. Vol. 14. No. 5. P. 914. <https://doi.org/10.3390/f14050914>.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Gopp N.V. The Use of the Soil-Geomorphological Database for Studying the Spatial Variability of the Humus Content, Physical Clay, and Clay in the Soils of the Kuznetsk–Salair Geomorphological Province. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 986–998. <https://doi.org/10.1134/S106422932107005X>.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>

Received 06 November 2023

Accepted 16 November 2023

Published 25 November 2023

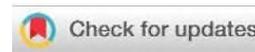
About the author:

Gopp Natalya Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gopp@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/)



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ ПРИ ОРОШЕНИИ В УСЛОВИЯХ НОВОСИБИРСКОГО ПРИОБЬЯ

© 2023 Н. А. Шапорина

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

Цель исследования. Поиск методов оперативного контроля увлажнения почв при орошении производственных площадей в условиях Новосибирского Приобья.

Место и время проведения. Новосибирская область, 2023 г.

Методы. Сравнительный анализ описанных в литературе и применяемых в настоящее время на практике технологий управления поливными режимами.

Основные результаты. Рассмотрены методы оперативного контроля за влажностью почв на примере крупной оросительной системы (Верх-Ирменская оросительная система в Новосибирской области). Дана их оценка с точки зрения применимости в условиях больших производственных площадей. Среди множества методов регистрации уровня увлажнения почвы подробно представлены нейтронный метод и метод измерения диэлектрической постоянной почвы; выявлены их достоинства и недостатки. Для производственных площадей предложены электрометрические методы. Обозначены тенденции в развитии технологий орошения: в первую очередь, это цифровизация и автоматизация, позволяющие обрабатывать большие объемы данных.

Заключение. В настоящее время отечественные технологии управления процессами орошения представлены, в основном, опытными разработками. Создание автоматизированных систем полива остается прерогативой исследовательских проектов. Для сельскохозяйственного производства определение запасов почвенной влаги с помощью датчиков влажности почвы является по-прежнему самым массовым методом. С нашей точки зрения, перспективными являются электрометрические методы, как наиболее мобильные, малозатратные и обладающие высокой точностью измерения.

Ключевые слова: орошение; влажность почвы; режимы; мониторинг; электрометрические методы; автоматизация; цифровизация; влагомеры.

Цитирование: Шапорина Н.А. Перспективные методы мониторинга увлажнения почв при орошении в условиях Новосибирского Приобья // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e231. DOI: [10.31251/pos.v6i3.231](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.231).

ВВЕДЕНИЕ

Орошение – это подача дополнительного количества воды, если запасов ее в почве и естественного поступления за счет осадков недостаточно для выращивания сельхозкультур. Несмотря на то, что данное определение может показаться довольно простым, реализация сельскохозяйственного орошения является сложной задачей. Прежде всего, сложно определить потребность в орошении, которая выражается такими показателями, как водоудерживающая способность почвы, ее структурно-агрегатный состав, водопроницаемость, а также потребностью в воде выращиваемой культуры и фазой ее развития. Кроме того, имеют значение пространственно-временные изменения погоды. Отмеченные факторы формируют такой ключевой интегральный показатель, как влажность почвы в конкретный период времени и на конкретном поле.

Для определения влажности почв в полевых условиях существует много приборов и методов измерения, которые имеют различную трудоемкость, погрешность и стоимость. Далее возникают вопросы установления наилучшего времени полива для каждой культуры и разработки экологически безопасных, ресурсосберегающих режимов орошения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетними исследованиями сотрудников Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН были установлены основные принципы и подходы к орошению почв юга Западной Сибири, которые заключаются в том, что орошение должно быть строго нормированным, исключая, прежде всего, инфильтрационные потери влаги: во-первых, эти потери являются

источником большинства негативных процессов, связанных с орошаемым земледелием, во-вторых, экономия чистой пресной воды – одно из направлений ресурсосбережения. Была разработана концепция орошения чернозёмов Приобья (Шапорина, Танасиенко, 2005), включающая следующие положения:

1. Нормирование предполагает строгий контроль за соблюдением основных параметров почвенного увлажнения:

а) мощность увлажняемого вегетационными поливами слоя почвы не должна превышать 40–50 см по всему региону;

б) увлажнение вышеназванного слоя должно регулироваться строго в диапазоне от предполивного порога (в Приобье это 70% НВ) до наименьшей влагоёмкости (НВ).

2. Поливные нормы в каждом случае будут определяться разностью между запасами влаги в слое 0–40 или 0–50 см при увлажнении, соответствующем предполивному порогу, и запасами влаги при НВ. Количество поливов и их сроки будут зависеть при этом от складывающихся погодных условий

3. Орошение должно быть дифференцированным в плане применимости для расчетов предполивного порога в различных регионах Западной Сибири и для различных типов почв с учетом следующих характеристик: гранулометрический состав, характер и степень засоления почв, условия залегания водоупорных слоев. Предполивные пороги могут колебаться от 50 до 80% НВ. Согласно данной концепции, возникает необходимость налаживания системы оперативного контроля за влажностью почвы до глубины 40–50 см.

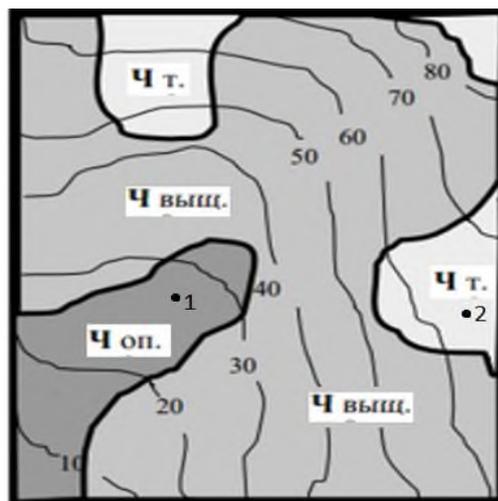
При планировании орошения, согласно третьему пункту концепции, тщательно изучены почвы и получены все характеристики, требующиеся для расчетов. Речь идет о таких характеристиках, как гранулометрический и агрегатный состав, плотность почвы, водопроницаемость и водоудерживающая способность.

Чернозёмы Приобья (оподзоленные, выщелоченные и обыкновенные) по комплексу агрофизических и водных свойств считаются лучшими из всех рассматриваемых групп чернозёмов Западной Сибири. Почвообразующими породами здесь являются лессовидные суглинки, в основном средние и легкие по гранулометрическому составу. Чернозёмы хорошо микроагрегированы, имеют хорошую водоудерживающую способность – 260–290 мм в метровом слое (Шапорина, Танасиенко, 2014).

В среднесуглинистых разностях приобских чернозёмов существует прямая зависимость между подвижностью почвенной влаги и ее доступностью для растений. Поэтому влагой, хорошо доступной растениям в среднесуглинистых чернозёмах, считается влага в диапазоне от НВ до влажности разрыва капиллярных связей (ВРК), фиксируемой при влажности 70% НВ. Эта величина и является здесь допустимым пределом иссушения почвы перед поливом.

При налаживании системы оперативного контроля за состоянием увлажнения, основное внимание должно уделяться перераспределению в почвенном покрове веществ и энергии (Шапорина, Чичулин, 2017). Микро- и даже нанорельеф в условиях Приобья является первоочередным перераспределителем; прежде всего, это миграция влаги – вертикальная и горизонтальная, а также поверхностная и внутрпочвенная.

Лабораторией географии и генезиса почв ИПА СО АН под руководством Р.В. Ковалева исследована связь пространственного распределения подтипов чернозёмов, организованных в почвенные микрокатены, со строением поверхности водоразделов Приобского плато (Ковалев и др., 1986). Согласно проведенным исследованиям, высокодисперсные осадочные отложения, слагающие территорию, обеспечивают тесную геохимическую связь между компонентами микрокатен, которые функционируют как единая природная система. При этом в микродепрессиях формируются чернозёмы оподзоленные (15–25% поверхности), микроповышения занимают чернозёмы типичные (15–25%), транзитные позиции – чернозёмы выщелоченные (60–65%). Авторами (Ковалев и др., 1986) предложено считать данные образования фоновыми зональными для почвенного покрова водоразделов Приобья. В связи с этим в качестве объектов исследований мы рассматривали и анализировали не отдельные ареалы почв, а их сопряженный ряд, обусловленный микрорельефом – первоочередным перераспределителем вещества и энергии. С учетом этого складывали ключевые площадки размером 50 × 60 м (рис. 1), содержащие в своем составе количественно близкий набор подтипов чернозёмов (Ковалев и др., 1986).



— 10 — Горизонтالي рельефа с отметками высот, см

Рисунок 1. Почвенная карта ключевой площадки на орошаемом участке. Точки 1 и 2 – места определения влажности после полива.

Поверхностное перераспределение влаги по элементам микрорельефа наглядно представлено на рисунке 2, где изображены топоизоплеты влажности по двум точкам на ключевой площадке орошаемого массива. Точка 1 – микропонижение (чернозём оподзоленный), точка 2 – микроповышение (чернозём типичный). Как видим, разница во влажности профиля довольно существенная, а общая картина увлажнения поля выглядит неоднородной.

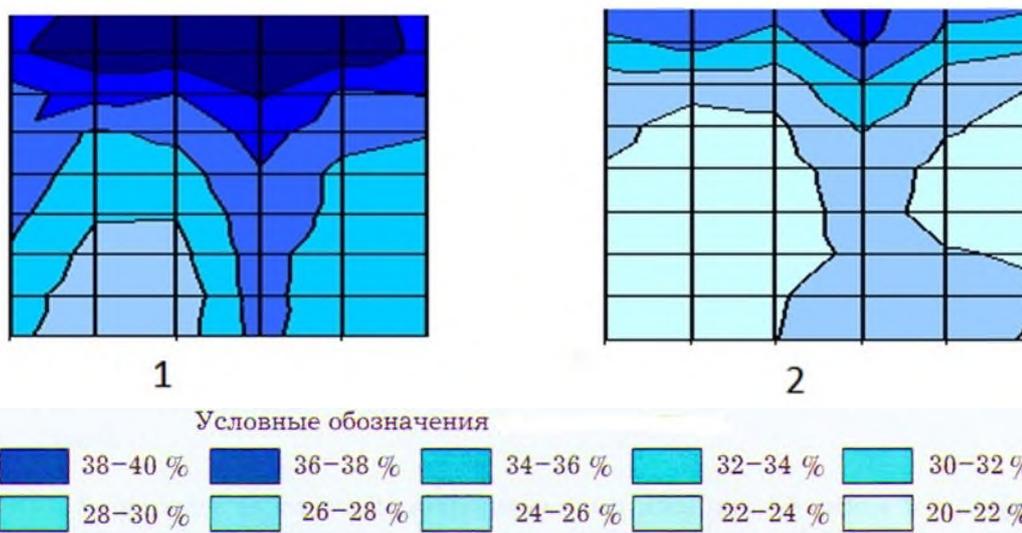


Рисунок 2. Топоизоплеты влажности на ключевой площадке: точка 1 – микропонижение (чернозём оподзоленный) после полива; точка 2 – микроповышение (чернозём типичный) в тот же день после полива.

По нашему мнению, для получения средних показателей система мониторинга увлажнения должна непременно учитывать выявленную пестроту микрорельефа, то есть реперные точки наблюдения за влажностью под каждым «Фрегатом» должны располагаться и в микропонижениях, и на микроповышениях, и на выровненных участках, для чего должна быть проведена нивелировка поверхности. Это положение должно стать в Приобье ещё одним пунктом концепции орошения. Согласно данной концепции, возникает необходимость поиска методов оперативного контроля за влажностью почвы до глубины как минимум 40 см на больших площадях. На Верх-Ирменской оросительной системе, например, одновременно могут работать 5–10 машин из 50, а это 15–30 реперных точек, что является огромным объемом работы.

Как известно, методы определения влажности почвы делятся на контактные и бесконтактные. Контактные, в свою очередь, делятся на прямые и косвенные; бесконтактные – на портативные и дистанционные. Среди контактных косвенных выделяются электрометрические методы. Среди бесконтактных используются портативные (инфракрасные, СВЧ, радиационные) и дистанционные – наземные, авиационные и космический мониторинг (Медведева и др., 2020). Использование большей части данных методов исследования в аграрном хозяйстве является либо слишком трудоемким, либо технически сложным из-за дорогостоящего оборудования.

Прямые контактные методы, являясь точными, наиболее трудоёмки и затратны по времени (например, термостатно-весовой метод). Если опираться на точность измерений, то особого различия в этих методах нет, их погрешность колеблется от 2 до 4%. Наибольшая скорость определения влажности отмечается при электрометрическом методе, относящемся к косвенным контактным; однако из-за плохого контакта измерителя с почвой, возможны погрешности результатов. Электрометрический метод измерения влаги почвы является наиболее выгодным из-за скорости измерения, его можно использовать в любое время года; средства, реализующие данный метод, применяются в автоматизированных системах.

Лаборатория почвенно-физических процессов ИПА СО РАН занимается вопросами орошения уже более сорока лет. За это время методам контроля за влажностью почв уделяли достаточно много внимания. Наиболее подробно изучали два метода – нейтронный метод и метод, измеряющий диэлектрическую постоянную почвы, значение которой напрямую зависит от объемного содержания влаги в почве. Указанные методы также относятся к косвенным контактным. Кратко представим результаты изучения этих методов.

Нейтронный метод разрабатывали достаточно давно: еще с 60-х годов прошлого столетия известны работы В.А. Емельянова (1965), Л.И. Бескина (1965), В.И. Осипова (1968) и др. Метод основан на рассеивании и замедлении быстрых нейтронов ядрами водорода, входящего, главным образом, в состав воды. В результате этого вокруг источника быстрых нейтронов, введенного в почву, образуется облако медленных нейтронов, плотность которого зависит от влажности. О плотности потока можно судить по скорости счета медленных нейтронов, попадающих на детектор. В задачи наших исследований входила постановка экспериментов по наблюдению за водным режимом почвенно-грунтовой толщи как многомерного образования. Предполагалась установка стационарных скважин с обсадными трубами, куда опускался датчик. Метод обладал рядом достоинств: не было необходимости изменения от срока к сроку местоположения скважин, а также имелась возможность определять влажность без нарушения структуры почвы с какой угодно частотой. Методом нейтронной влагометрии получены, например, топоизоплеты на рисунке 2. Метод хорошо зарекомендовал себя в стационарных условиях при постановке научных экспериментов. Все рисунки, связанные с экспериментами по увлажнению, изложенными в книге «Проблемы орошения чернозёмов Приобья» (Шапорина, Танасиенко, 2014), выполнены на основе метода нейтронной влагометрии.

Определение сроков и норм полива при использовании широкозахватной дождевальной техники требует получения оперативной информации об усредненных значениях влагосодержания почвы вдоль фронта полива. С этой целью разработан нейтронный влагомер типа «Крот». Для измерений в почве на глубине 35 и 90 см стационарно прокладываются полиэтиленовые трубы. По ним протягивается измерительный зонд с помощью электропривода или пневмотяги. В зонде смонтированы источник излучений, приемник и запоминающее устройство. После прогонки зонда по трубам считывают данные измерений с запоминающего устройства; по тарифовочным графикам или таблицам определяют влагозапасы в исследуемом слое. Для мониторинга увлажнения на больших производственных площадях, по нашему мнению, метод мало пригоден, поскольку обсадные трубы для глубинных и поверхностных измерений непременно будут повреждаться при проведении сельскохозяйственных работ.

Датчик EC-5 DECAGON – экономичный датчик для измерения объемного содержания влаги. Датчик измеряет диэлектрическую постоянную почвы, значение которой напрямую зависит от объемного содержания влаги; он работает на частоте 70 МГц, что позволяет измерить влажность почвы любого типа. Изначально датчик рассчитан на проведение режимных наблюдений в условиях его стационарной установки. В 2017 году сотрудниками лаборатории почвенно-физических процессов ИПА СО РАН проведены исследования, которые показали, что технические характеристики и конструктивные особенности датчиков позволяют использовать их для решения более широкого круга задач (Чичулин, 2018). В частности, возможен вариант

мобильного применения датчика ЕС–5 для изучения пространственно-временной вариабельности почвенной влажности. Используя переносной компьютер и опцию мгновенного измерения, можно определить влажность на одной точке за 10 минут.

Однако, на наш взгляд, данный мобильный вариант имеет ряд недостатков. Во-первых, при погружении зубцов датчика на максимально возможную глубину, охватываемый измерениями слой почвы составляет всего 8 см. Чтобы проводить измерения не только с поверхности, необходимо последовательно физически убирать слои почвы до нужной глубины, что существенно снижает скорость определений, особенно при большом количестве повторностей. Во-вторых, с практической точки зрения отметим, что до глубины 8 см на рыхлых почвах ($0,75\text{--}1,0\text{ г/см}^3$) зубцы датчика легко вводятся в почву; в почву же с высокой плотностью, особенно выше $1,3\text{ г/см}^3$, зубцы датчика вводятся с трудом, что при многократных измерениях приводит к его поломкам (Шапорина, Сайб, 2021).

Цифровизация является одним из трендов развития орошения, ирригации и мелиорации сельхозземель, которая позволяет собирать и быстро обрабатывать большие объемы данных. Кроме того, это позволяет частично или даже полностью автоматизировать процесс орошения. При этом центральными элементами для пользователей становятся мобильные планшеты или смартфоны, которые могут не только следить за состоянием орошения с помощью соответствующих приложений, но также вмешиваться в операции, например, в случае возникновения проблем. Такие системы позволяют получать информацию о потребности растений в орошении в режиме реального времени.

Крупным недостатком современного рынка технологий орошения является практическое отсутствие отечественных разработок для больших производственных площадей. В настоящее время отечественные технологии управления процессами орошения представлены в основном опытными разработками. Из них можно особо отметить роботизированный комплекс «Каскад», созданный специалистами Саратовского ГАУ имени Н.И. Вавилова (Соловьев, Журавлева, 2020) для полива дождеванием кормовых, зерновых и технических культур с различной высотой стебля. Данная разработка была представлена в рамках российской программы «Приоритет 2030». Инженеры из Вавиловского университета создали готовую «умную» систему для управления поливом. В данный момент она может работать на базе дождевальной машины «Каскад», но в будущем систему планируют адаптировать и под другие агрегаты. Уникальность разработки в том, что интеллектуальная система способна в автоматическом режиме определять влажность грунта на разной глубине.

Можно также отметить несколько уникальных отечественных и зарубежных разработок систем автоматического полива полей и угодий, у которых большое будущее (Распутина, 2023):

- **Система интеллектуального орошения AIST.** Разработка от компании, принимавшей активное участие в проектах «Сколково». Данная система способна адаптировать полив под климатические особенности региона, относится к готовым проектам, так как еще в прошлом году прошла ряд испытаний в РФ. Модули системы можно установить на любые машины орошения, в том числе советские аппараты «Днепр», «Фрегат» и многие другие.

- **Автономная система полива «Фрегат».** Стоит отметить, что «Фрегат» является довольно известной системой, которая была спроектирована еще в СССР. Изначально это были стационарные машины полива, но технологию доработали и создали автоматизированный вариант. Практически все системы проекта «Фрегат» способны орошать поля с помощью кругового перемещения форсунок; при этом трубопровод можно проложить на расстояние до 500 км.

- **Автономный робот Oscar.** Компания Osiris Agriculture из Франции представила свой уникальный проект ирригационной системы автополива. По сути, это полноценный и автономный робот, который способен не только поливать территории, но и вносить удобрения, защищать растения от вредителей и собирать данные. Уже в середине 2023 года разработку планировали опробовать в реальных полевых условиях. К слову, компания решила пока не продавать ирригационного робота, а сдавать его в аренду аграриям.

Искусственный интеллект уже в настоящее время используется для оценки аэрофотоснимков, где входными переменными является отражение света определенных длин волн. Многообещающе смотрятся подходы на основе изображений с использованием спутниковых снимков и БПЛА. Спутниковые снимки обладают недостатками из-за возможности помех или

низкого пространственного разрешения; БПЛА могут дать лучшее разрешение из-за низкой высоты полета.

Мониторинг, определяющий параметры полива, реализуется разработанной системой расчетов. Методы назначения сроков полива и их интенсивность базируются на водном балансе определенного слоя почвы и опираются на информацию, рассчитанную по измеренным запасам почвенной влаги. Трудоемкость выполнения расчетов зависит от размера и количества орошаемых участков. Так, на Верх-Ирменской оросительной системе площадью 2000 га, как было сказано выше, работают около 50 «Фрегатов». Одновременно могут быть включены 5–10 машин. Это как минимум, 15 точек на площади 350 га. Для достижения указанной цели нужны будут мобильные малозатратные датчики с высокой скоростью измерения. Таким требованиям отвечают, на наш взгляд, датчики на основе электрометрических методов.

На рынке представлено множество таких датчиков. В настоящее время крупные производства пользуются влагомерами самых разнообразных марок, стоимостью от 500 до 30 тысяч рублей. Особое внимание следует обратить на устройства, отличающиеся повышенной надежностью и прочностью. Очень важно для наших исследований, чтобы прибор имел достаточную длину щупа-измерителя, поскольку, согласно нашей концепции, мониторинг увлажнения в Приобье должен осуществляться до глубины 40 см. К сожалению, у большинства предлагаемых датчиков щупы не длиннее 20–25 см, что усложняет процесс получения результата. Судя по рейтингу лучших устройств на 2023 год, следует обратить внимание на следующие:

- **Почвенный влагомер AQ-M20SO1** (рис. 3) используют для измерения влажности почвы, песка и цемента в сельском хозяйстве, строительстве и промышленном производстве. Диапазон измерений влажности находится в пределах от 0 до 50%. Показания с точностью до десятой доли процента и минимальной погрешностью в 0,5% выводятся на яркий жидкокристаллический дисплей. Достоинство прибора: он единственный из сравниваемых имеет длину щупа 30 см.



Рисунок 3. Почвенный влагомер AQ-M20SO1. Источник: https://www.electronpribor.ru/catalog/725/aqua-lab_aq-m20so1.htm (дата обращения 12.10.2023).

- **КС-300** – диапазон действия довольно большой. Устройство имеет небольшие размеры, может быть использовано для измерения показателей в грунте любого типа, удобен в использовании и предоставляет максимально корректные данные.

- **ZD-06** – этот измеритель можно назвать одним из самых точных. Он прекрасно справляется с задачей определения уровня влажности грунта и работает без батареек, однако цена его явно завышена при небольшом диапазоне действия.

Таким образом, для сельскохозяйственного производства регистрация запасов почвенной влаги с помощью электрометрических устройств является самым перспективным и рекомендуемым нами методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрев особенности орошения в условиях Приобья, основные методы мониторинга увлажнения и современные тенденции в технологиях орошения, можно сделать следующее заключение.

Концепция орошения, разработанная для условий Новосибирского Приобья, должна быть дополнена. При мониторинге увлажнения почвы следует обратить внимание на

перераспределение вещества (прежде всего, влаги) и энергии; в Приобье главным фактором такого перераспределения является микро- и нанорельеф.

При поливах картина увлажнения поля выглядит очень пестрой. Выявленную пестроту непременно нужно учитывать, для чего реперные точки для наблюдения за влажностью обязательно следует располагать с учетом особенностей рельефа. При этом мониторинг больших производственных площадей предполагает очень большой объем работы, порядка 15–30 определений влажности в день.

В этой связи возникает необходимость поиска методов оперативного контроля за влажностью почвы, способных справиться с такими объемами. Для достижения указанной цели наиболее перспективной представляется оценка необходимости в орошении на основе изображений агрофитоценозов с использованием БПЛА или спутников. Одной из перспективных тенденций в развитии технологий мелиорации и орошения является цифровизация, которая позволяет собирать и быстро обрабатывать большие объемы данных, а также использование искусственного интеллекта. Это позволяет частично или даже полностью автоматизировать процесс орошения.

Для сельскохозяйственного производства определение запасов почвенной влаги с помощью датчиков влажности почвы является по-прежнему самой массовой группой методов. Перспективными, с нашей точки зрения, являются электрометрические методы, как наиболее мобильные, малозатратные и обладающие высокой точностью измерений.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Бескин Л.И. Исследования нейтронного метода определения влажности почв и грунтов. Автореферат диссертации ... канд. технических наук. Москва, 1965. 26 с.

Емельянов В.А. Нейтронный влагомер НИВ, гамма-гамма-плотномеры ГПП и ППП, их погрешности и технико-экономические показатели: материалы к метод. указаниям / Гос. производ. ком. по орошаемому земледелию и водному хозяйству СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова. Москва, 1965. 22 с.

Ковалев Р.В., Зайцева Т.Ф., Копосов Г.Ф. Окислительно-восстановительное состояние черноземов Приобья в связи с их пространственной дифференциацией и орошением // Земельно-оценочные проблемы Сибири и Дальнего Востока. Тезисы докладов к конференции. Барнаул. 1986. С. 112–114.

Медведева Е.С., Атоян Т.В., Киримова К.В. Исследование методов измерения влажности почвы // Молодой ученый. 2020. № 51 (341). С. 449–452. URL: <https://moluch.ru/archive/341/76744/> (дата обращения 12.10.2023).

Осипов В.И. Определение плотности и влажности грунтов по рассеянию гамма-лучей и нейтронов. Москва: Издательство Московского университета, 1968. 156 с.

Распутина М. Отечественные и зарубежные системы автоматического полива. Проекты XXI века [Электронный ресурс]. URL: <https://vc.ru/u/791264-mariya-rasputina/723265-otechestvennye-i-zarubezhnye-sistemy-avtomaticheskogo-poliva-proekty-xxi-veka> (дата обращения 14.10.2023).

Шапорина Н.А., Танасиенко А.А. К вопросу о стратегии и тактике орошения черноземов Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12. № 5. С. 801–807.

Шапорина Н.А., Танасиенко А.А. Проблемы орошения черноземов Приобья. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2014. 137 с.

Шапорина Н.А., Чичулин А.В. Влияние микрорельефа на формирование гидротермического поля почвенного покрова водоразделов приобского плато в орошаемых условиях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 9. С. 130–134. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11841>. (дата обращения 04.10.2023).

Чичулин А.В. К методике применения датчика влажности ec-5 decagon // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5–2. С. 416–421. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12280>. (дата обращения 04.10.2023).

Шапорина Н.А., Сайб Е.А. Пространственное распределение температуры почв в комплексном почвенном покрове Предсалаирья // Почвы и окружающая среда. 2021. Т. 4. № 2. e146. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.146>.

Соловьев Д.А., Журавлева Л.А. Роботизированный оросительный комплекс «Каскад» // Аграрный научный журнал. 2020. № 1. С. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i1pp74-78>.

Поступила в редакцию 20.11.2023

Принята 11.12.2023

Опубликована 14.12.2023

Сведения об авторе:

Шапорина Нина Аркадьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); shaporina@issa-siberia.ru, shaporina49@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

PERSPECTIVE METHODS OF MONITORING SOIL MOISTURE UNDER IRRIGATION IN THE NEAR-OB AREAS IN THE NOVOSIBIRSK REGION

© 2023 N. A. Shaporina

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

The aim of the study. *Analyzing the known methods and technologies of soil moisture monitoring for irrigation management in the agricultural production areas in the Near-Ob region, Russia.*

Location and time of the study. *Novosibirsk region, Russia, 2023.*

Methods. *Comparative analysis of irrigation regime management technologies described in the literature and currently used in irrigation practice.*

Results. *Methods of quick operational control over soil moisture using as an example a large irrigation system (Verkh-Irmenskaya irrigation system in the Novosibirsk region) were analyzed and compared. The methods were evaluated from the point of view of their applicability in large grain production areas. Of many methods of soil moisture content measurement, the neutron method and the method of soil dielectric constant measurement are described in detail, and their advantages and disadvantages identified. Electrometric methods are proposed for grain production areas. Trends in the development of irrigation technologies are outlined, primarily digitalization and automation, which allow processing large data amounts.*

Conclusions. *At present, irrigation management technologies are mostly represented by experimental developments; the use of artificial intelligence remains mainly the prerogative of research projects. For agricultural production, determination of soil moisture reserves using soil moisture sensors is still the most popular method. From our point of view, electrometric methods are the most promising, as they are mobile, not costly and have high measurement speed.*

Key words: *irrigation; soil moisture; regimes; monitoring; electrometric methods; automation; digitalization; artificial intelligence.*

How to cite: *Shaporina N.A. Perspective methods of monitoring soil moisture under irrigation in the near-Ob area in the Novosibirsk region // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(3). e231. DOI: [10.31251/pos.v6i3.231](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.231). (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. 121031700316-9.

REFERENCES

- Beskin L.I. Investigations of the neutron method for determining the moisture content of soils and soils. Abstract of Dissertation ... Candidate of Technical Sciences, Moscow, 1965. 26 p. (in Russian).
- Emelyanov V.A. Neutron moisture meter NIV, gamma-gamma-density meters GGP and PGP, their errors and technical and economic indicators: materials for methodical instructions / State Production Committee for irrigated agriculture and water management of the USSR. A.N. Kostyakov Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation. Moscow, 1965. 22 p. (in Russian).
- Kovalev R.V., Zaitseva T.F., Kopusov G.F. Redox state of chernozems of Priobie in connection with their spatial differentiation and irrigation. In book: Land-assessment problems of Siberia and the Far East. Theses of reports to the conference. Barnaul, 1986. P. 112–114. (in Russian).
- Medvedeva E.S., Atoyán T.V., Kirimova K.V. Study of soil moisture measurement methods. Molodoy uchenyy. 2020. No. 51 (341). P. 449–452. URL: <https://moluch.ru/archive/341/76744/> (accessed on 12.10.2023). (in Russian).
- Osipov V.I. Determination of Density and Moisture of Soils by Gamma-Ray and Neutron Scattering. Moscow: Publishing House Moscow University, 1968. 156 p. (in Russian).
- Rasputina M. Domestic and foreign systems of automatic irrigation. Projects of the XXI century [Electronic resource]. URL: <https://vc.ru/u/791264-mariya-rasputina/723265-otechestvennye-i-zarubezhnye-sistemy-avtomaticheskogo-poliva-proekty-xxi-veka> (accessed on 14.10.2023). (in Russian).
- Shaporina N.A., Tanasienko A.A. Concerning the Strategy and Tactic of Irrigation of Chernozems in West Siberia. Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2005. Vol. 12. No. 5. P. 801–807. (in Russian).
- Shaporina N.A., Tanasienko A.A. Problems of irrigation of chernozems of Priobskoye plateau. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2014. 137 p. (in Russian).
- Shaporina N. A., Chichulin A. V. The influence of microrelief on the formation of hydrothermal fields of the soil cover of the watershed Priobskoye plateau in irrigated conditions. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2017. No. 9. P. 130–134. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11841> (accessed on 04.10.2023). (in Russian).
- Chichulin A.V. The Method Of Application Of The Moisture Sensor Ec-5 Decagon. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2018. No. 5–2. P. 416–421. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12280> (accessed on 04.10.2023). (in Russian).
- Shaporina N.A., Saib E.A. Spatial distribution of soil temperature in the complex soil cover in the Cis-Salair region. The Journal of Soils and Environment. 2021. Vol. 4. No. 2. e146. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.146>. (in Russian).
- Soloviev D.A., Zhuravleva L.A. Robotic irrigation complex "Cascade". The Agrarian Scientific Journal. 2020. No. 1. P. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i1pp74-78>. (in Russian).

Received 20 November 2023

Accepted 11 December 2023

Published 14 December 2023

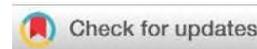
About the author:

Shaporina Nina Arkadyevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); shaporina@issa-siberia.ru, shaporina49@mail.ru

The author read and approved the final manuscript



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

**ПОЧВЕННЫЙ И РИЗОСФЕРНЫЙ БАКТЕРИОБИОМ ПШЕНИЦЫ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ГУМАТОВ И ЗОЛЫ УНОСА**

© 2023 Н. Б. Наумова ¹, И. П. Беланов ¹, О. А. Савенков ¹, М. В. Степанова ¹,
Г. В. Щемелева ¹, О. А. Батурина ², М. Р. Кабилов ²

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

²ФГБУН Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 8, Новосибирск, 630090, Россия; E-mail: batulina@niboch.nsc.ru, kabilov@niboch.nsc.ru

Цель исследования. Изучение влияния обработки низкой дозой гумата калия на фоне внесения золы уноса (ЗУ), образующейся после сжигания каменного угля на ТЭЦ, на разнообразие почвенного бактериобиома и развитие корней пшеницы.

Место и время проведения. Микрополевой опыт был проведен в 2022 году в г. Новосибирск (Россия) на агросерой почве по рендомизированной схеме в трёхкратной повторности.

Методы. В исследовании использовали стандартные методы анализа основных почвенных свойств. Оценку структуры и биоразнообразия почвенного бактериобиома проводили с помощью метабаркодирования по гену 16S рРНК (район V3-V4).

Основные результаты. Выявлено большое разнообразие бактерий: в среднем 2472 и 2330 операционных таксономических единицы (ОТЕ) в валовой и ризосферной почве, соответственно. Всего в работе обнаружено 9120 ОТЕ, относящихся к 929 родам, 438 семействам, 416 порядкам, 104 классам и 37 типам. Четверть ОТЕ относились к тину Proteobacteria; на втором месте по богатству ОТЕ был тип Actinobacteria (10%); далее типы Firmicutes, Bacteroidetes и Acidobacteria (каждый по 8% от общего числа ОТЕ). По относительному обилию последовательностей лидерами были Actinobacteria (38–41%), Proteobacteria (25–28%) и Acidobacteria (10–13%). Обработка гуматом калия без ЗУ никак не повлияла на относительное обилие доминирующих родов в валовой почве, но повысила почти в 2 раза обилие Sphingomonas в варианте с внесением ЗУ. В ризосферной почве внесение гумата без ЗУ заметно (в 1,8 раза) повысило относительное обилие последовательностей рода Nocardioides, а на фоне ЗУ повысило относительное обилие Sphingomonas и снизило обилие Spartobacteria_gis.

Заключение. Обработка гуматом калия в низкой дозе вызвала небольшие, положительные изменения в составе почвенного бактериобиома даже на фоне огромного биоразнообразия, присущего практически любой почве, в том числе и использованной в этой работе. Воздействие обработки экзогенным гуматом включает сложный комплекс разнообразных механизмов; для понимания влияния обработки низкими дозами гуматов на почву, растения и микроорганизмы необходимы детальные физиолого-биохимические исследования и мета-анализ имеющихся в литературе данных.

Ключевые слова: биоразнообразие; почвенные бактерии; ризосфера; корни пшеницы.

Цитирование: Наумова Н.Б., Беланов И.П., Савенков О.А., Степанова М.В., Щемелева Г.В., Батурина О.А., Кабилов М.Р. Почвенный и ризосферный бактериобиом пшеницы при комбинировании гуматов и золы уноса // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e218. DOI: [10.31251/pos.v6i3.218](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.218).

ВВЕДЕНИЕ

Препараты гуминовых и фульвовых кислот применяют в медицине (van Rensburg, 2015; He et al., 2023), ветеринарии и животноводстве (Yöğük et al., 2004; Wang et al., 2022), растениеводстве и для ремедиации (Ondrasek et al., 2022) в качестве агента, стимулирующего физиолого-биохимические процессы живых организмов и, таким образом, улучшающего их здоровье, рост и развитие. Наряду с этим, в растениеводстве и рекультивации при внесении в соответствующих дозах гумат калия является дополнительным источником питательных элементов, улучшителем почвенных свойств и структуры (Burdick, 1965; Ouni et al., 2014; Zhilkibayev et al., 2022). Напомним, что гумат калия – это соль гуминовой кислоты, богатая карбоксильными и фенольными группами.

Много интересных исследований посвящено влиянию гуматов на количество и качество продукции сельскохозяйственных культур (Ullah et al., 2020; Abdelrasheed et al., 2021; Hegab et al., 2022) и использованию гуматов при восстановлении загрязненных/нарушенных земель (Zhuo et al., 2011; Whitton et al., 2023). В последнее время активно идет разработка комплексных биостимуляторов, в которых гуматы являются одним из компонентов (García-Sánchez et al., 2022). Используют гуматы и в качестве почвоулучшителей, как в составе органоминеральных комплексов (Panova et al., 2021), так и по отдельности (Hong et al., 2018). Однако конкретные механизмы действия гуматов часто не ясны, а данные о влиянии обработки гуматом противоречивы (Lyons, Genc, 2016). Основной причиной этого является, на наш взгляд, большой разброс в концентрации гуматов в коммерческих препаратах – от 5% (Relict..., 2023) до 26% (Kemgro Стор..., 2023), а также разброс в рекомендованных производителями и использованных в исследованиях разведениях и дозах. Иногда встречаются и некорректное указание дозы (Alharbi et al., 2022) или даже полное отсутствие упоминания о ней в опубликованных результатах исследований (Hegab et al., 2022б), что сильно затрудняет обобщение. В дополнение к этому, определенное значение имеет и сырье для производства гуматов, например, лигнин или леонардит бурых углей (Ertani et al., 2011); иногда же в экспериментах используют не коммерческие препараты гуминовых кислот, полученные из углей, а экстрагированные в лаборатории авторами работ из компостов (da Silva Lima et al., 2014). Некоторые производители рекомендуют столь низкие дозы гуматов (Lions, Genc, 2016; Relict..., 2023) при обработке семян или посевов, что одним из основных предполагаемых путей действия гуматов на урожай, если таковое обнаружено, может быть только их непосредственное, гормоно-подобное (Ertani et al., 2011) воздействие на физиолого-биохимические процессы растений и/или микроорганизмов, а также и некоторый сдвиг сообществ последних в сторону, более благоприятную для роста и развития растений. До сих пор мало информации о том, как гуматные препараты влияют на биоразнообразие и функционирование почвенного микробиома, поскольку такого рода работы начали активно проводить относительно недавно в связи с возросшей доступностью методов высокопроизводительного секвенирования. Так, выявлено изменение почвенного микробоценоза при внесении гумата калия в почвосубстрат при выращивании женьшеня (Jin et al., 2022), при внесении в почву гибнущих пастбищ (Whitton et al., 2023). Сведения о влиянии очень низких доз гумата на микробиом практически отсутствуют.

Твердые отходы, так называемые золы уноса ТЭЦ, образующиеся при сжигании углей для выработки тепла и энергии, довольно давно используют в сельском хозяйстве, добавляя в почву агроэкосистем в качестве источника макро- и микроэлементов для улучшения роста и развития растений (Невенчанная, Гиндемит, 2018; Палеев, Худякова, 2021; Ansari et al., 2023), для корректировки почвенных свойств, например, pH (Шишелова, Самусева, 2004) и для рекультивации нарушенных экосистем (Петрова, Рудзиш, 2021). Стоит отметить, что зольный субстрат, насыщенный различными жидкими удобрениями, дает пролонгированный эффект, то есть вносимые мелиоранты закрепляются в почве на минеральной основе золы и не вымываются водами от полива и осадков долгое время. В связи с этим целью данной работы было изучение влияния обработки низкой дозой гумата калия (при внесении золы уноса и без) на разнообразие почвенного бактериомиома и развитие корней пшеницы путем метабаркодирования по генам 16S рРНК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема микрополевого опыта. Микрополевой опыт был заложен в июне 2022 г. по рендомизированной схеме на делянках площадью 1 м² в трёхкратной повторности. Почва опытной площадки представлена агросерой почвой, легкосуглинистой, с низким содержанием гумуса (2,5%) и слабощелочной реакцией почвенного раствора. Содержание биогенных элементов (NPK) по делянкам, хотя и было исходно распределено неравномерно, но находилось в пределах, обеспечивающих нормальный рост и развитие растений.

В качестве опытной была выбрана наиболее распространенная в регионе культура - яровая пшеница *Triticum aestivum* L. сорта Новосибирская 29. В качестве минеральной добавки использовали золу уноса (ЗУ), образующуюся после сжигания каменного угля на ТЭЦ-5 (Новосибирск). Эту добавку вносили в агросерую почву в дозе 2% в массовом соотношении (Bundesministerium..., 2011), что составляет 2,4 кг золы на одну опытную делянку, т.е. 1 м². В качестве органических удобрений использовали препарат на основе солей гуминовых и фульвовых кислот (Реликт Р, ООО НПП «Генезис», Новосибирск,

<https://relictororganics.com/relictp#rec249647986>). В вариантах ЗУ с внесением гумата, ЗУ замачивали в течение 24 часов перед внесением на делянки. Всего в опыте было 4 варианта: 1) без внесения каких-либо добавок, 2) только ЗУ, 3) ЗУ с гуматом и 4) только гумата. Делянки вариантов с обработкой ЗУ с гуматом и только гуматом периодически (один раз в месяц) опрыскивали раствором гумата в разведении 8 мл исходного коммерческого препарата на 2 литра воды в количестве 500 мл/м² на делянку, что составляло 0,12 г солей гуминовых кислот и 6 мг К на 1 м².

Отбор почвенных образцов и образцов фитомассы. Отбор образцов валовой почвы и почвы ризосферы растений пшеницы был проведен на стадии начала колошения растений. Растения выкапывали, корни осторожно встряхивали, после чего оставшуюся на корнях почву тщательно собирали в полиэтиленовые пакеты как почву ризосферы и сразу помещали в холодильник для хранения при –20 °С до выделения ДНК. Валовую почву собирали из слоя 0–10 см с каждой опытной делянки путем усреднения пяти индивидуальных почвенных монолитов.

Поскольку опыт закладывали и отбирали в сроки, не типичные для фенологии и агрономии пшеницы в регионе, то растения не осуществили полный цикл вегетации и опыт завершили на начальной стадии колошения. Корни растений отмывали от почвы водопроводной водой, после чего растения высушивали в сушильном шкафу с вентиляцией при температуре 40°С и взвешивали. Определяли общую массу корней на делянке и максимальную массу корней одного растения. Учитывали также всхожесть семян и число образовавшихся колосьев.

Анализ физико-химических свойств почвы. Определение содержания C_{org} , подвижных форм питательных элементов (N-NO₃⁻, P₂O₅, K₂O) и pH (H₂O) проводили согласно общепринятым в почвоведении методам (Аринушкина, 1970). Гранулометрический состав анализировали пирофосфатным методом (Качинский, 1958). При анализе отбирали фракции физического песка и физической глины, размером более 0,01 (до 1 мм) и менее 0,01 мм, соответственно.

Выделение валовой ДНК из образцов почвы. Валовую ДНК выделяли с помощью набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Hilden, Germany) в соответствии с инструкцией производителя. Для механического разрушения образца использовали TissueLyser II (Qiagen, Hilden, Germany) 10 мин при 30 Герц. Качество ДНК оценивали с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле, а количество – на флуориметре Qubit (Life Technologies, USA) и спектрофотометре Nanodrop (Thermo Fisher Scientific, USA).

Аmplification фрагментов генов 16S рРНК и секвенирование ампликонов. Регион V3-V4 гена 16S рРНК амплифицировали с помощью праймеров 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3'), содержащих адаптерные последовательности (Illumina), линкер и баркод (Fadrosh et al., 2014). Амплификацию проводили в 50 мкл реакционной смеси в условиях, описанных ранее (Noskov et al., 2021). Ампликоны смешивали по 200 нг каждый и чистили в 1% агарозном геле с помощью набора MinElute Gel Extraction Kit (Qiagen, Hilden, Germany). Секвенирование проводили в ЦКП "Геномика" (ИХБФМ СО РАН) на секвенаторе MiSeq (Illumina, USA), используя набор Reagent Kit v3 (2x300, Illumina, USA).

Биоинформатический анализ. Полученные парные последовательности анализировали с помощью UPARSE скриптов (Edgar, 2013), используя Usearch v11.0.667 (Edgar, 2010). Биоинформатическая обработка включала перекрытие парных ридов, фильтрацию по качеству и длине, учет одинаковых последовательностей, отбрасывание синглетонов, удаление химер и получение операциональных таксономических единиц (ОТЕ) с помощью алгоритма кластеризации UPARSE (Edgar, 2016a). Таксономическую принадлежность последовательностей (ОТЕ) определяли с помощью SINTAX (Edgar, 2016b) с использованием 16S RDP training set v18 в качестве референсной базы (Wang et al., 2007). Таксономическую структуру полученного таким образом ансамбля последовательностей (бактериобиома) оценивали путем вычисления отношения числа таксон-специфичных последовательностей к общему числу последовательностей образца, выраженному в процентах. Индексы α -биоразнообразия разнообразия рассчитывали с помощью Usearch v11.0.667 (Edgar, 2010).

Статистический анализ. Описательную статистику, сравнение по вариантам обилия бактериальных таксонов и изученных свойств опытных ценозов пшеницы проводили с использованием дисперсионного анализа и анализа главных компонент с помощью статистического пакета Statistica v.13.3 (TIBCO Software Inc., USA). Индексы α -биоразнообразия рассчитывали с помощью пакета PAST (Hammer et al., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общее таксономическое разнообразие. Всего в исследовании было выявлено 9120 ОТЕ бактерий, относящихся к 929 род-специфичным кластерам (из которых 715 идентифицированы), 438 семействам (354), 416 порядкам (380), 104 классам и 37 типам. Из всех выявленных ОТЕ 1449, т.е. 16% от общего числа ОТЕ, не были идентифицированы ниже уровня типа. Четверть числа ОТЕ (2251, 25%) относились к типу *Proteobacteria*; на втором месте по богатству ОТЕ был тип *Actinobacteria* с 949 ОТЕ (10%), и далее шли *Firmicutes*, *Bacteroidetes* и *Acidobacteria* (каждый по 8% от общего числа ОТЕ).

Что касается относительного обилия таксон-специфичных ридов, то из всех 37 идентифицированных типов восемь были доминантными, т.е. со вкладом более $\geq 1\%$ в общее число нуклеотидных последовательностей: основными лидерами были *Actinobacteria* (38% в валовой и 41% в ризосферной почве), *Proteobacteria* (25% и 28%) и *Acidobacteria* (13% и 10%); вклад *Firmicutes*, *Bacteroidetes* и *Verrucomicrobia* в общее число последовательностей составил 3–6%. Таким образом, подавляющее большинство бактериальных типов, выявленных в работе, были минорными или редкими.

По относительному обилию ридов на таксономическом уровне класса доминировали 15 классов, среди которых превалировали *Actinobacteria* (21% в валовой и 27% в ризосферной почве) и *Thermoleophilia* (8–10%) (оба относятся к типу *Actinobacteria*), затем шли *Alphaproteobacteria* (16–17%). Такое доминирование классов отразилось на уровне рода так, что среди девяти идентифицированных до рода превалирующих таксонов, семь (*Gaiella*, *Pseudarthrobacter*, *Nocardioides*, *Mycobacterium*, *Streptomyces*, *Micromonospora* и *Solirubrobacter*) относились к *Actinobacteria* и два рода (*Sphingomonas* и *Bradyrhizobium*) – к *Proteobacteria*.

Влияние добавок на бактериобиом валовой почвы. Обработка гуматом калия агросерой почвы без ЗУ никак не повлияла на относительное обилие доминирующих родов, но повысила почти в 2 раза обилие *Sphingomonas* в варианте с внесением ЗУ (табл. 1). Среди остальных родов никаких других изменений под влиянием гумата не было выявлено во всех вариантах обработки.

Таблица 1

Относительное обилие доминантных родов бактерий (среднее \pm стандартное отклонение) в валовой почве (%)

Род	Внесение/обработка ¹			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
<i>Bacillus</i>	0,6 \pm 0,1	0,4 \pm 0,2	0,5 \pm 0,2	0,4 \pm 0,3
<i>Bradyrhizobium</i>	1,5 \pm 0,8	1,8 \pm 1,1	2,2 \pm 0,7	1,0 \pm 0,0
<i>Devosia</i>	0,3 \pm 0,1	0,4 \pm 0,1	0,4 \pm 0,3	0,5 \pm 0,1
<i>Gaiella</i>	4,2 \pm 1,6	3,8 \pm 1,3	4,5 \pm 2,0	3,8 \pm 0,5
un. * <i>Gp16</i>	4,3 \pm 1,5	3,5 \pm 0,9	3,4 \pm 1,1	3,6 \pm 1,3
un. <i>Gp6</i>	5,6 \pm 2,6	4,9 \pm 1,5	6,3 \pm 3,1	3,6 \pm 0,6
<i>Ilumatobacter</i>	0,7 \pm 0,3	0,6 \pm 0,1	0,7 \pm 0,6	0,7 \pm 0,2
<i>Massilia</i>	0,7 \pm 0,6	1,1 \pm 0,5	0,5 \pm 0,2	0,6 \pm 0,7
<i>Micromonospora</i>	0,9 \pm 0,1	0,9 \pm ,3	1,4 \pm 1,1	1,1 \pm 0,4
<i>Mycobacterium</i>	2,0 \pm 1,3	2,4 \pm 0,4	2,9 \pm 1,3	2,0 \pm 0,1
<i>Nocardioides</i>	2,2 \pm 0,1	2,6 \pm 1,5	1,9 \pm 0,1	2,8 \pm 0,2
<i>Pseudarthrobacter</i>	2,5 \pm 1,3	3,0 \pm 1,5	2,3 \pm 1,1	6,0 \pm 7,9
<i>Solirubrobacter</i>	4,5 \pm 1,1	1,9 \pm 1,1	1,7 \pm 1,0	3,0 \pm 1,2
<i>Spartobacteria_gis</i> **	2,1 \pm 1,7	2,5 \pm 2,5	2,9 \pm 1,4	1,2 \pm 0,7
<i>Sphingomonas</i>	2,1 \pm 0,2 ab***	2,3 \pm 0,7 ab	1,4 \pm 0,2 a	2,7 \pm 0,7 b
<i>Streptomyces</i>	1,8 \pm 0,6	1,7 \pm 0,2	1,8 \pm 0,2	1,6 \pm 0,6

Примечание.

1 – варианты опыта (здесь и далее в табл. 2–5): без внесения каких-либо добавок (**нет**) и с внесением только гумата (**гумат**), только золы уноса (**ЗУ**), золы уноса с гуматом (**ЗУ+гумат**). *Неклассифицированные до более низкого таксономического уровня. ***genera incertae sedis*. ***Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние добавок на бактериобиом ризосферной почвы. Внесение гумата без ЗУ заметно (в 1,8 раза) увеличило относительное обилие последовательностей рода *Nocardioides* (табл. 2), а на фоне ЗУ повысило относительное обилие *Sphingomonas* и снизило обилие *Spartobacteria_gis*.

Таблица 2

Относительное обилие доминантных родов бактерий (среднее \pm стандартное отклонение) в ризосферной почве (%)

Род	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
<i>Bacillus</i>	0,5 \pm 0,1	0,6 \pm 0,2	0,6 \pm 0,3	0,6 \pm 0,5
<i>Bradyrhizobium</i>	1,0 \pm 0,5	0,9 \pm 0,0	1,4 \pm 0,9	0,9 \pm 0,2
<i>Devosia</i>	1,3 \pm 0,5	1,1 \pm 0,5	0,8 \pm 0,7	1,0 \pm 0,1
<i>Gaiella</i>	2,7 \pm 1,2	2,3 \pm 0,7	3,0 \pm 1,9	2,3 \pm 0,6
un.* <i>Acidobacteria</i> _Gp16	3,2 \pm 0,5	2,8 \pm 0,8	3,6 \pm 2,5	2,6 \pm 0,7
un. <i>Acidobacteria</i> _Gp6	2,9 \pm 0,3	2,4 \pm 0,4	2,9 \pm 1,7	2,9 \pm 0,8
<i>Ilumatobacter</i>	0,3 \pm 0,2	0,6 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	0,4 \pm 0,1
<i>Massilia</i>	1,3 \pm 0,4	1,5 \pm 0,9	1,0 \pm 0,9	1,4 \pm 1,1
<i>Micromonospora</i>	0,9 \pm 0,2	0,9 \pm 0,4	0,8 \pm 0,1	1,2 \pm 0,4
<i>Mycobacterium</i>	1,7 \pm 0,7	1,9 \pm 0,2	2,2 \pm 1,8	1,7 \pm 0,3
<i>Nocardioides</i>	2,8 \pm 0,1 a***	5,0 \pm 1,8 b	3,2 \pm 1,2 ab	4,0 \pm 0,5 ab
<i>Pseudarthrobacter</i>	5,6 \pm 1,8	10,3 \pm 3,7	5,9 \pm 5,0	6,5 \pm 3,9
<i>Solirubrobacter</i>	1,0 \pm 0,2	1,1 \pm 0,2	0,9 \pm 0,6	1,2 \pm 0,6
<i>Spartobacteria_gis**</i>	1,7 \pm 1,5 ab	1,0 \pm 0,4 a	3,7 \pm 2,2 b	0,9 \pm 0,3 a
<i>Sphingomonas</i>	2,2 \pm 0,9 ab	2,7 \pm 1,1 ab	1,7 \pm 0,1 a	3,1 \pm 0,4 b
<i>Streptomyces</i>	1,3 \pm 0,2	1,5 \pm 0,4	1,4 \pm 0,8	1,3 \pm 0,1

Примечание.

*Неклассифицированные до более низкого таксономического уровня. ** *genera incertae sedis*.

***Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние добавок на α -биоразнообразие бактериобиома почвы. Как в валовой, так и в ризосферной почве индексы α -биоразнообразия бактериобиома, за исключением Чhao-1, не продемонстрировали изменений в связи с внесением гумата, ЗУ или их совместного внесения (табл. 3); индекс Чhao-1, оценивающий потенциальное богатство ОТЕ, под влиянием гумата снизился в 1,2 раза.

Таблица 3

Индексы α -биоразнообразия бактериобиома (среднее \pm стандартное отклонение) валовой и ризосферной почвы

Индекс	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Валовая почва				
Богатство ОТЕ	2504 \pm 202	2177 \pm 541	2580 \pm 87	2628 \pm 181
Чhao-1	3756 \pm 241 b*	3168 \pm 434 a	4009 \pm 39 b	4096 \pm 181 b
Симпсона	0,99 \pm 0,00	0,99 \pm 0,01	0,99 \pm 0,01	0,99 \pm 0,01
Шеннона	6,4 \pm 0,2	6,4 \pm 0,3	6,4 \pm 0,4	6,8 \pm 0,1
Выравненность	0,25 \pm 0,03	0,28 \pm 0,08	0,25 \pm 0,08	0,33 \pm 0,05
Равномерность	0,82 \pm 0,01	0,83 \pm 0,03	0,82 \pm 0,04	0,86 \pm 0,02
Доминирование	0,01 \pm 0,00	0,01 \pm 0,01	0,01 \pm 0,01	0,00 \pm 0,00
Бергера-Паркера	0,04 \pm 0,02	0,07 \pm 0,07	0,07 \pm 0,07	0,03 \pm 0,01
Ризосферная почва				
Богатство ОТЕ	2480 \pm 266	2144 \pm 194	2235 \pm 404	2460 \pm 143
Чhao-1	3754 \pm 387	3323 \pm 310	3336 \pm 306	3609 \pm 185
Симпсона	0,99 \pm 0,00	0,99 \pm 0,00	0,98 \pm 0,01	0,98 \pm 0,03
Шеннона	6,5 \pm 0,2 b ¹	6,5 \pm 0,2 ab	6,2 \pm 0,2 a	6,3 \pm 0,5 b
Выравненность	0,28 \pm 0,05	0,30 \pm 0,05	0,23 \pm 0,04	0,23 \pm 0,10
Равномерность	0,84 \pm 0,02	0,84 \pm 0,02	0,81 \pm 0,02	0,80 \pm 0,06
Доминирование	0,01 \pm 0,00	0,01 \pm 0,00	0,02 \pm 0,01	0,02 \pm 0,03
Бергера-Паркера	0,05 \pm 0,03	0,04 \pm 0,01	0,11 \pm 0,04	0,11 \pm 0,10

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние гумата и ЗУ на почвенные свойства и растения пшеницы. Единственным статистически подтвержденным изменением почвенных свойств в связи с внесением гумата оказалось заметное (в 1,7 раза) снижение содержания подвижного фосфора (табл. 4).

Таблица 4

Физико-химические свойства почвы (среднее \pm стандартное отклонение) после завершения опыта

Свойство	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Валовая почва				
рН	7,1 \pm 0,2	7,6 \pm 0,6	7,7 \pm 0,3	7,7 \pm 0,6
С _{орг} , %	1,6 \pm 0,1	0,8 \pm 0,5	1,1 \pm 0,5	1,0 \pm 0,8
P ₂ O ₅ , мг/кг	211 \pm 68 b*	122 \pm 52 a	109 \pm 25 a	104 \pm 43 a
N-NO ₃ , мг/кг	10,6 \pm 3,5	9,5 \pm 1,3	12,2 \pm 4,2	9,7 \pm 5,9
K ₂ O, мг/кг	184 \pm 75	168 \pm 84	159 \pm 54	149 \pm 80
Физическая глина, %	23,6 \pm 2,1	20,7 \pm 2,3	23,9 \pm 1,6	24,3 \pm 2,3
Физический песок, %	76,4 \pm 2,1	79,3 \pm 2,3	76,1 \pm 1,5	75,7 \pm 2,1

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Внесение гумата по-разному повлияло на рост и развитие растений пшеницы при внесении ЗУ и без такового: в последнем случае все показатели имели тенденцию к увеличению, а масса корней увеличилась в 2 раза (табл. 5) по сравнению с контрольным вариантом, в то время как в вариантах с ЗУ по массе корней никаких различий не выявлено. Отметим, что при выделении главных компонент из всех переменных для образцов без ЗУ значения первой главной компоненты, отвечающей за 77% исходной дисперсии, различаются между вариантами с гуматом и без ($p=0,028$).

Таблица 5

Некоторые свойства агроценозов пшеницы (среднее \pm стандартное отклонение) с разными вариантами добавок в почву

Свойство	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Всхожесть, %	42 \pm 7	83 \pm 70	58 \pm 30	88 \pm 62
Колошение, %	7 \pm 11	7 \pm 12	3 \pm 5	15 \pm 21
Максимальная масса корней, г/растение	0,12 \pm 0,05	0,29 \pm 0,14	0,21 \pm 0,12	0,15 \pm 0,01
Масса корней 10 растений**	0,5 \pm 0,1 a*	1,1 \pm 0,3 b	0,9 \pm 0,6 a	0,7 \pm 0,1 a

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы. **Отобранных методом случайной выборки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленное в данной работе доминирование типов *Actinobacteria*, *Proteobacteria* и *Acidobacteria* как по относительному обилию (в сумме почти три четверти от общего числа последовательностей), так и по богатству ОТЕ (в сумме более 40% богатства ОТЕ) типично для многих почв сельскохозяйственных и естественных экосистем (Praeg et al., 2020).

Бактериобиом валовой и ризосферной почвы при обработке гуматом без внесения золы уноса. Заметное повышение относительного обилия актиномицетов *Nocardioideae* в ризосферной почве без золы уноса не удивительно, так как этот род бактерий известен своим присутствием в почве агроценозов пшеницы (Ikunaga et al., 2011; Chen et al., 2022), в том числе и в ризосфере (Kaplan et al., 2019; Sulieman et al., 2022). При этом в нашем исследовании *Nocardioideae* являлись одним из главных доминантов в ризосферной почве, что согласуется с данными других авторов (Cordero et al., 2021). Установлена положительная связь между фитомассой пшеницы и обилием *Nocardioideae* (Chen et al., 2020). Эти актиномицеты могут трансформировать микотоксины, делая зерно безопасным для употребления людьми и животными (Ikunaga et al.,

2011). Таким образом, повышение относительного обилия этих актиномицетов при обработке гуматом можно рассматривать как положительное влияние этого препарата.

Тот факт, что обработка гуматом никак не повлияла на индексы α -биоразнообразия, согласуется с данными других авторов (Whitton et al., 2023). Отсутствие влияния гумата на эти интегральные индексы представляется вполне логичным в связи с низкой дозой гумата на фоне очень высокого биоразнообразия бактерий в почве. В целом значения таких индексов α -биоразнообразия, как Шеннона и Симпсона, в данном исследовании оказались довольно высоки и очень близки к значениям этих индексов в ненарушенной серой почве, изученной нами ранее (Naumova et al., 2021). Выявленное в валовой почве при обработке гуматом заметное снижение индекса Chao-1, оценивающего потенциальное богатство ОТЕ, интерпретировать трудно.

Бактериобиом валовой и ризосферной почвы при внесении гумата на фоне золы уноса. Заметное повышение относительного обилия последовательностей *Sphingomonas* (*Proteobacteria*) при обработке гуматом на фоне ЗУ можно рассматривать как положительный эффект, компенсирующий снижение обилия этих полезных членов бактериального ансамбля от внесения только ЗУ. Представителей этого рода бактерий обычно выявляют в почве пшеничных полей (Dong et al., 2017; Liu et al., 2019; Hou et al., 2022), в том числе ризосфере пшеницы (Xu et al., 2021; Zhang et al., 2023). Кроме того, они являются стимуляторами роста растений, поскольку могут фиксировать атмосферный азот (Gosal et al., 2011), снижать рост и развитие патогенов (Innerebner et al., 2011), повышать устойчивость растений к заболеваниям (Wen et al., 2023), переносить воздействие тяжелых металлов и обладают способностью к биодegradации органических загрязнителей (Xu et al., 2021).

Представителей класса *Spartobacteria* (*Verrucomicrobia*) обычно обнаруживают в почве самых различных экосистем (Sangwan et al., 2005; Praeg et al., 2020), как правило, на уровне умеренных доминантов, но иногда и на уровне основных (Bergmann et al., 2011). Выявленное в почве ризосферы на фоне ЗУ существенное снижение относительного обилия *Spartobacteria_gis* при обработке гуматом оказалось несколько неожиданным. Эти бактерии могут сохранять стабильное присутствие при внесении минеральных удобрений и навоза (Ding et al., 2016), что в какой-то степени связано с их олиготрофностью (неспособностью быстро реагировать на поступление легкодоступных источников углерода) и участием в разложении устойчивых фракций органического вещества в почве (Zhang et al., 2018). Поэтому и их кажущееся повышенное обилие на фоне только ЗУ (хоть и $p=0,11$ при сравнении с контролем) и снижение при комбинировании ЗУ и гумата интерпретировать трудно.

Влияние гумата на свойства почвы и растений. Снижение содержания подвижного фосфора в почве при внесении гумата без ЗУ, вероятнее всего, связано с повышением выноса фосфора, о чем свидетельствует увеличение фитомассы корней пшеницы при этой обработке. Отсутствие влияния применения гумата на другие почвенные свойства согласуется с результатами, полученными при выращивании пшеницы в открытом и защищённом грунте и лаборатории на разных почвах (Ceronio et al., 2022); при этом в работе не было выявлено никакого влияния на рост и развитие растений и урожай зерна пшеницы. Отсутствие влияния применения гумата на фоне ЗУ согласуется с результатами об отсутствии влияния на рост и развитие растений, полученными при воздействии такой же дозы гумата (1 мг на растение) при выращивании пшеницы в лабораторных условиях на песке (Feoktistova et al., 2023). В целом же, пониженное содержание подвижного фосфора при внесении ЗУ связано, скорее всего, с его закреплением ЗУ (Lee et al., 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования влияния гуматов на почвенный бактериобиом, свойства почвы и продукции корней растений мы выбрали типичную для региона агросерую почву и очень низкую дозу гумата для обеспечения отсутствия его непосредственного влияния как удобрения и почвоулучшителя. Полученные результаты позволяют заключить, что обработка гуматом калия даже в такой дозе и за неполный срок вегетации растений вызывала определенные положительные изменения в составе бактериобиома как валовой, так и ризосферной почвы несмотря на огромное биоразнообразие, присущее практически любой почве, в том числе, и использованной в этой работе. Воздействие обработки экзогенным гуматом включает сложный комплекс разнообразных механизмов; для понимания влияния обработки низкими дозами гуматов на почву, растения и микроорганизмы необходимы детальные физиолого-биохимические исследования и мета-анализ имеющихся в литературе данных.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий ИПА СО РАН (№ 121031700309-1) и ИХБФМ СО РАН (№ 121031300042-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд. Москва: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Москва: АН СССР, 1958. 193 с.
- Невенчанная Н.М., Гиндемит А.М. Эффективность использования золошлаковых материалов при выращивании огурцов на лугово-чернозёмной почве // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 37–40. DOI: [10.24411/0235-2451-2018-11008](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11008).
- Палеев П.Л., Худякова Л.И. Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 4. С. 348–356. DOI: [10.21285/2500-1582-2021-4-348-356](https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356).
- Петрова Т.А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно-нарушенных территорий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 100–112. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_4_0_100](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100).
- Шишелова Т.И., Самусева М.Н. Применение золы-уноса ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» для химической мелиорации кислых почв // Успехи современного естествознания. 2004. № 12. С. 85–86. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13826> (дата обращения 18.09.2023).
- Abdelrasheed K.G., Mazrou Y., Omara A.E., Osman H.S., Nehela Y., Hafez E.M., Rady A.M.S., El-Moneim D.A., Alowaiesh B.F., Gowayed S.M. Soil Amendment Using Biochar and Application of K-Humate Enhance the Growth, Productivity, and Nutritional Value of Onion (*Allium cepa* L.) under Deficit Irrigation Conditions // Plants. 2021. Vol. 10. No. 12. A.2598. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10122598>.
- Alharbi K., Rashwan E., Hafez E., Omara A.E., Mohamed H.H., Alshaal T. Potassium Humate and Plant Growth-Promoting Microbes Jointly Mitigate Water Deficit Stress in Soybean Cultivated in Salt-Affected Soil // Plants. 2022. Vol. 11. No. 22. A.3016. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223016>.
- Ansari M.S., Ahmad G., Khan A.A., Mohamed H.I. Coal fly ash application as an eco-friendly approach for modulating the growth, yield, and biochemical constituents of *Withania somnifera* L. plants. Environmental science and pollution research international. 2023. Vol. 30. No. 37. P. 87958–87980. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28318-x>.
- Bergmann G.T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities // Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 7. P. 1450–1455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012>.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf Land- und Forstwirtschaftlich genutzten Flächen. 2011. P. 74 (Guideline of the Austrian Agriculture Ministry for the adequate use of Biomass ashes in agricultural and forestry areas) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bmnt.gv.at/land/produktion-maerkte/pflanzlich-e-produktion/boden-duengung/Bodenschutz.html> (дата обращения 29.09.2023).
- Burdick E.M. Commercial humates for agriculture and the fertilizer industry // Economic Botany. 1965. Vol. 19. P. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02862826>.
- Ceronio G.M., van Tonder J.T., du Preez C.C. Is Application of Commercial Potassium Humates Beneficial to Soil and Wheat? // South African Journal of Plant and Soil. 2022. Vol. 39. No. 2 P. 123–131. DOI: [10.1080/02571862.2021.2000051](https://doi.org/10.1080/02571862.2021.2000051).
- Chen M., Xu J., Li Z., Zhao B., Zhang J. Soil physicochemical properties and bacterial community composition jointly affect crop yield // Agronomy Journal. 2020. Vol. 112. No. 5 P. 4358–4372. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20358>.
- Chen Y., Huizi M., Zhang Y., Zhang G., Li C., Ye Y., Zhang R., Shi J., Li Z., Tian X., Wang Y. Impact of ZnSO₄ and ZnEDTA applications on wheat Zn biofortification, soil Zn fractions and bacterial community: Significance for public health and agroecological environment // Applied Soil Ecology. 2022. Vol. 176. P. 104484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104484>.
- Cordero Elvia J., de Freitas J. R., Germida J. J. Bacterial Microbiomes Associated with the Rhizosphere, Root Interior, and Aboveground Plant Organs of Wheat and Canola at Different Growth Stages // Phytobiomes Journal. 2021. Vol. 5. No. 4. P. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-20-0073-R>.

- da Silva Lima L., Olivares F.L., Rodrigues de Oliveira R., Vega M.R.G., Aguiar N.O., Canellas L.P. Root exudate profiling of maize seedlings inoculated with *Herbaspirillum seropedicae* and humic acids // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 23–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0023-z>.
- Ding J., Jiang X. M. M., Zho B., Gua D., Zha B., Zhou J., Cao F., Li L., Li J. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China // *Applied Soil Ecology*. 2016. Vol. 105. P. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.010>.
- Dong W., Liu E., Yan C., Tian J., Zhang H., Zhang Y. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China // *European Journal of Soil Biology*. 2017. Vol. 80. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.001>.
- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST // *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26. No. 19. P. 2460–2461. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>.
- Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // *Nature Methods*. 2013. Vol. 10. P. 996–998. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>.
- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads // *bioRxiv*. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1101/081257>.
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences // *bioRxiv*. 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1101/074161>.
- Ertani A., Francioso O., Tugnoli V., Righi V., Nardi S. Effect of commercial lignosulfonate-humate on *Zea mays* L. metabolism // *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59. No. 22. P. 11940–11948. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf202473e>.
- Fadrosh D.W., Ma B., Gajer P., Gajer P., Sengamalay, N., Ott, S., Brotman R.M. Ravel J. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform // *Microbiome*. 2014. Vol. 2. A.6. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>.
- Feoktistova A., Timergalin M., Chetverikov S., Nazarov A., Kudoyarova G. Effects on *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Pigment Indices and Concentration of Hormones in Wheat Seedlings Grown under Water Deficit // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. No. 3. A.549. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030549>.
- García-Sánchez F., Simón-Grao S., Navarro-Pérez V., Alfosea-Simón M. Scientific Advances in Biostimulation Reported in the 5th Biostimulant World Congress // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. No. 7. P. 665. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070665>.
- Gosal S.K., Saroa G. S., Vika, Y., Cameotr, S. S., Pathani, N., Bhanot A. Isolation and molecular characterisation of diazotrophic growth-promoting bacteria from wheat rhizospheric soils of Punjab // *Soil Research*. 2011. Vol. 49. No. 8. P. 725–732. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR11136>.
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4. P. 9.
- He Y., Wang D., Liu K., Deng S., Liu Y. Sodium humate alleviates LPS-induced intestinal barrier injury by improving intestinal immune function and regulating gut microbiota // *Molecular Immunology*. 2023. Vol. 161. P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2023.07.012>.
- Hegab R.H., Eissa D., Abou-Shady A. Effects of foliar application of selenium and potassium-humate on oat growth in Baloza, North Sinai, Egypt // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15119. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19229-x>.
- Hong C., Su Y., Lu S. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018. Vol. 25. No. 30. P. 30547–30556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3086-8>.
- Hou K., Lu C., Shi B., Xiao Z., Wang X., Zhang J., Cheng C., Ma J., Du Z., Li B., Zhu L. Evaluation of agricultural soil health after applying pyraclostrobin in wheat/maize rotation field based on the response of soil microbes // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2022. Vol. 340. P. 108186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108186>.
- Ikunaga Y., Sato I., Grond S., Numaziri N., Yoshida S., Yamaya H., Hiradate S., Hasegawa M., Toshima H., Koitabashi M., Ito M., Karlovsky P., Tsushima S. *Nocardioides* sp. strain WSN05-2, isolated from a wheat field, degrades deoxynivalenol, producing the novel intermediate 3-epi-deoxynivalenol // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2011. Vol. 89. No. 2. P. 419–427. DOI: <https://doi.org/20857291>.

- Innerebner G., Knief C., Vorholt J. A. Protection of *Arabidopsis thaliana* against Leaf-Pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* Strains in a Controlled Model System // *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 10. P. 3202–3210. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00133-11>.
- Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu, Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of *Panax ginseng* // *Microbiological research*. 2022. Vol. 254. P. 126914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126914>.
- Kaplan H., Ratering S., Felix-Henningsen P., Schnell S. Stability of in situ immobilization of trace metals with different amendments revealed by microbial ¹³C-labelled wheat root decomposition and efflux-mediated metal resistance of soil bacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 659. P. 1082–1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.441>.
- Kemgro Crop Solutions, Waikerie, South Australia. [Электронный ресурс]. URL: <https://kemgro.com.au/wp-content/uploads/2021/12/Kemgro-Humic26-brochure3.pdf> (дата обращения 29.09.2023).
- Lee C.H., Lee Y.B., Lee H., Kim P.J. Reducing phosphorus release from paddy soils by a fly ash-gypsum mixture // *Bioresource technology*. 2007. Vol. 98. No. 10. P. 1980–1984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.050>.
- Liu M., Wang C., Wang F., Xie Y. Vermicompost and humic fertilizer improve coastal saline soil by regulating soil aggregates and the bacterial community // *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*. 2019. Vol. 65. No. 3. P. 281–293. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1498083>.
- Lyons G., Genc Y. Commercial Humates in Agriculture: Real Substance or Smoke and Mirrors? // *Agronomy*. 2016. Vol. 6. No. 4. A.50. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy6040050>.
- Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Undisturbed Soil Pedon under Birch Forest: Characterization of Microbiome in Genetic Horizons // *Soil Systems*. 2021. Vol. 5. No. 1. A.14. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010014>.
- Noskov Y.A., Kabilov M.R., Polenogova O.V., Yurchenko Y.A., Belevich O.E., Yaroslavtseva O.N., Alikina T.Y., Byvaltsev A.M., Rotskaya U.N., Morozova V.V., Glupov V.V., Kryukov V.Y. A Neurotoxic Insecticide Promotes Fungal Infection in *Aedes aegypti* Larvae by Altering the Bacterial Community // *Microbial Ecology*. 2021. Vol. 8. P. 493–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01567-w>.
- Ondrasek G., Romić D., Tanaskovik V., Savić R., Rathod S., Horvatinec J., Rengel Z. Humates mitigate Cd uptake in the absence of NaCl salinity, but combined application of humates and NaCl enhances Cd mobility & phyto-accumulation // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 847. P. 157649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157649>.
- Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly C., Lakhdar A. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity // *International Journal of Plant Production*. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 353–374. DOI: <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1614>.
- Panova I., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A. A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil // *Land Degradation and Development*. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1022–1033. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3743>.
- Praeg N., Seeber J., Leitinger G., Tasser E., Newesely C., Tappeiner U., Illmer P. The role of land management and elevation in shaping soil microbial communities: Insights from the Central European Alps // *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 107951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107951>.
- Relict Organics, ООО НПП «Генезис». [Электронный ресурс]. URL: <https://relictorganics.com/relictр> (дата обращения 29.09.2023).
- Sangwan P., Kovac S., Davis K. E. R., Sait M., Janssen P. H. Detection and Cultivation of Soil *Verrucomicrobia* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71. No. 12. P. 8402–8410. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.71.12.8402-8410.2005>.
- Suliman A.M., Idris A., Alanazi N., Alshammari N., Alshammari A., Kahrizi S., Al-Azmi M. The Different Ecological, Medical, and Industrial Important Bacteria Harboring the Soil of Hail, Kingdom of Saudi Arabia // *Cellular and Molecular Biology*. 2022. Vol. 68. No. 9. P. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2022.68.9.6>.
- Ullah A., Ali M., Shahzad K., Ahmad F., Iqbal S., Rahman M. H. U., Ahmad S., Iqbal M. M., Danish S., Fahad S., Alkahtani J., Soliman Elshikh M., Datta R. Impact of Seed Dressing and Soil Application of Potassium Humate on Cotton Plants Productivity and Fiber Quality // *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 11. A.1444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111444>.
- van Rensburg CE. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review // *Phytotherapy Research*. 2015. Vol. 29. No. 6. P. 791–795. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.5319>.

Wang D., You Z., Du Y., Zheng D., Jia H., Liu Y. Influence of Sodium Humate on the Growth Performance, Diarrhea Incidence, Blood Parameters, and Fecal Microflora of Pre-Weaned Dairy Calves // *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12010123>.

Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy // *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73. P. 5261–5267. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>.

Wen T., Ding Z., Thomashow L. S., Hale L., Yang S., Xie P., Liu X., Wang H., Shen Q., Yuan J. Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil // *New Phytologist*. 2023. Vol. 238. No. 6. P. 2634–2650. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18886>.

Whitton M. M., Ren X., Yu S. J., Irving A. D., Trotter T., Bajagai Y. S., Stanley D. Humate application alters microbiota-mineral interactions and assists in pasture dieback recovery // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 2. P. e13327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13327>.

Xu Y., Ge Y., Lou Y., Meng J., Shi L., Xia F. Assembly strategies of the wheat root-associated microbiome in soils contaminated with phenanthrene and copper // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125340>.

Yörük M.A., Gül M., Hayirli A., Macit M. The effects of supplementation of humate and probiotic on egg production and quality parameters during the late laying period in hens // *Poultry Science*. 2004. Vol. 83. No. 1. P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/83.1.84>.

Zhang Y., Zhang M., Tang L., Che R., Chen H., Blumfield T., Boyd S., Nouansyvong M., Xu Z. Long-Term Harvest Residue Retention Could Decrease Soil Bacterial Diversities Probably Due to Favouring Oligotrophic Lineages // *Microbial Ecology*. 2018. Vol. 76. No. 3. P. 771–781. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1162-8>.

Zhang F., Xu N., Zhang Z., Zhang Q., Yang Y., Yu Z., Sun L., Lu T., Qian H. Shaping effects of rice, wheat, maize, and soybean seedlings on their rhizosphere microbial community // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2023. Vol. 30. No. 13. P. 35972–35984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24835-3>.

Zhilkibayev O., Aitbayev T. E., Zhirkova A. M., Perminova I.V., Popov A.I., Shoinbekova S. A., Kudaibergenov M. S., Shalmaganbetov K. M. The Coal Humic Product EldORost Shows Fertilizing and Growth Stimulating Properties on Diverse Agricultural Crops // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123012>.

Zhuo L., Li H., Cheng F., Shi Y., Zhang Q., Shi W. Co-remediation of cadmium-polluted soil using stainless steel slag and ammonium humate // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011. Vol. 19. No. 7. P. 2842–2848. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0790-7>.

Поступила в редакцию 06.10.2023

Принята 23.11.2023

Опубликована 24.11.2023

Сведения об авторах:

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); naumova@issa-siberia.ru

Беланов Иван Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); belanov@issa-siberia.ru

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); savenkov@issa-siberia.ru

Степанова Мария Викторовна – младший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); maria44421@gmail.com

Щемелева Галина Витальевна – младший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); shgv95@mail.ru

Батурина Ольга Анатольевна – младший научный сотрудник ЦКП «Геномика» Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); baturina@niboch.nsc.ru

Кабиллов Марсель Расимович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ЦКП «Геномика» Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kabilov@niboch.nsc.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/)

SOIL AND RHIZOSPHERE BACTERIOBIOME OF WHEAT UNDER COMBINED HUMATE AND FLY ASH APPLICATION

© 2023 N. B. Naumova ¹, I. P. Belanov ¹, O. A. Savenkov ¹, M. V. Stepanova ¹,
G. V. Shemeleva ¹, O. A. Baturina ², M. R. Kabilov ²

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia. E-mail: naumova@issa-siberia.ru*

²*Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8, Novosibirsk 630090, Russia. E-mail: kabilov@niboch.nsc.ru*

The aim of the study was to examine the effect of low rate of potassium humate application with and without fly ash (FA) on wheat roots rhizosphere bacteriobiome.

Location and time of the study. The microplot field experiment was conducted in three replicates in randomized design in 2022 in Novosibirsk (Russia).

Methods. Soil physical and chemical properties were determined by commonly used methods. Bacteriobiome structure and diversity were estimated by 16S rRNA genes (V3-V4 region) by metabarcoding.

Results. The study revealed large bacteriobiome diversity: on average 2472 and 2330 operational taxonomic units (OTU) in bulk and rhizosphere soil, respectively. Overall 9120 OTUs were found, belonging to 929 genera, 438 families, 416 orders, 104 classes and 37 phyla. A quarter of the total OTUs number belonged to the Proteobacteria phylum; Actinobacteria phylum ranked second in OTUs number (10%), whereas Firmicutes, Bacteroidetes and Acidobacteria each accounted for 8% of the total OTUs number. The Actinobacteria dominated in the relative abundance of the total number of sequence reads (38–41%), with Proteobacteria (25–28%) and Acidobacteria (10–13%) following. The treatment with potassium humate without fly ash did not influence the relative abundance of genera in the bulk soil, but increased twofold the relative abundance of the genus when combined with FA. In the rhizosphere soil bacteriobiome potassium humate without FA increased the *Nocardioideae* relative abundance 1.8 times, whereas in combination with FA increased *Sphingomonas* and decreased *Spartobacteria_gis* relative abundance.

Conclusions. Potassium humate treatment at a low rate resulted in small, but positive changes in soil and rhizosphere bacteriobiome despite the huge bacterial diversity, inherent for practically any soil, including the one used in this study. The effect of exogenic humate treatment involves a complex of various mechanisms, and detailed physiological and biochemical studies and meta-analysis of the published data are needed to understand the effect of low rate humate application on soil, plants and microorganisms.

Key words: biodiversity; soil bacteria; rhizosphere; wheat roots.

How to cite: Naumova N.B., Belanov I.P., Savenkov O.A., Stepanova M.V., Shemeleva G.V., Baturina O.A., Kabilov M.R. Soil and rhizosphere bacteriobiome of wheat under combined humate and fly ash application // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e218. DOI: [10.31251/pos.v6i3.218](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.218). (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects 121031700309-1 and 121031300042-1).

REFERENCES

- Arinushkina E.V. A Manual for Soil Chemical Analyses. Moscow: Moscow University Publishers, 1970. 488 p. (in Russian).
- Kachinsky N.A. Soil Mechanical and Microaggregate Composition and Methods for Studying it. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958. 193 p. (in Russian).

- Nevenchannaya N.M., Gindemit A.M. Efficiency of Ash and Slag Materials in Cucumber Growing on Meadow-Chernozemic Soil. *Agriculture and Crop Production*. 2018. Vol. 32. No. 10. P. 37–40. DOI: [10.24411/0235-2451-2018-11008](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11008). (in Russian).
- Paleev P.L., Khudyakova L.I. The Use of Fly Ash Waste in Agriculture. *XXI Century. Technosphere Safety*. 2021. Vol. 6. No. 4. P. 348–356. DOI: [10.21285/2500-1582-2021-4-348-356](https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356). (in Russian).
- Petrova T.A., Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands. *MIAB. Mining informational and analytical bulletin*. 2021. Vol. 4. P. 100–112. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_4_0_100](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100). (in Russian).
- Shishelova T.I., Samuseva M.N. The Use of Fly Ash from IrkutskEnergothermo- and Electricity-Generating Station for chemical melioration of acidic soils. *Advances in current natural sciences*. 2004. No. 12. P. 85–86. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13826> (accessed on 18.09.2023). (in Russian).
- Abdelrasheed K.G., Mazrou Y., Omara A.E., Osman H.S., Nehela Y., Hafez E.M., Rady A.M.S., El-Moneim D.A., Alowaiesh B.F., Gowayed S.M. Soil Amendment Using Biochar and Application of K-Humate Enhance the Growth, Productivity, and Nutritional Value of Onion (*Allium cepa* L.) under Deficit Irrigation Conditions. *Plants*. 2021. Vol. 10. No. 12. A.2598. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10122598>.
- Alharbi K., Rashwan E., Hafez E., Omara A.E., Mohamed H.H., Alshaal T. Potassium Humate and Plant Growth-Promoting Microbes Jointly Mitigate Water Deficit Stress in Soybean Cultivated in Salt-Affected Soil. *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 22. A.3016. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223016>.
- Ansari M.S., Ahmad G., Khan A.A., Mohamed H.I. Coal fly ash application as an eco-friendly approach for modulating the growth, yield, and biochemical constituents of *Withania somnifera* L. plants. *Environmental science and pollution research international*. 2023. Vol. 30. No. 37. P. 87958–87980. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28318-x>.
- Bergmann G.T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities. *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. Vol. 43. No. 7. P. 1450–1455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012>.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.: Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf Land- und Forstwirtschaftlich genutzten Flächen. 2011. P. 74 (Guideline of the Austrian Agriculture Ministry for the adequate use of Biomass ashes in agricultural and forestry areas) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bmnt.gv.at/land/produktion-maerkte/pflanzlich-e-produktion/boden-duengung/Bodenschutz.html> (accessed on 29.09.2023).
- Burdick E.M. Commercial humates for agriculture and the fertilizer industry. *Economic Botany*. 1965. Vol. 19. P. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02862826>.
- Ceronio G.M., van Tonder J.T., du Preez C.C. Is Application of Commercial Potassium Humates Beneficial to Soil and Wheat? *South African Journal of Plant and Soil*. 2022. Vol. 39. No. 2. P. 123–131. DOI: [10.1080/02571862.2021.2000051](https://doi.org/10.1080/02571862.2021.2000051).
- Chen M., Xu J., Li Z., Zhao B., Zhang J. Soil physicochemical properties and bacterial community composition jointly affect crop yield. *Agronomy Journal*. 2020. Vol. 112. No. 5. P. 4358–4372. DOI: <https://doi.org/10.1002/aj2.20358>.
- Chen Y., Huizi M., Zhang Y., Zhang G., Li C., Ye Y., Zhang R., Shi J., Li Z., Tian X., Wang Y. Impact of ZnSO₄ and ZnEDTA applications on wheat Zn biofortification, soil Zn fractions and bacterial community: Significance for public health and agroecological environment. *Applied Soil Ecology*. 2022. Vol. 176. P. 104484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104484>.
- Cordero Elvia J., de Freitas J.R., Germida J.J. Bacterial Microbiomes Associated with the Rhizosphere, Root Interior, and Aboveground Plant Organs of Wheat and Canola at Different Growth Stages. *Phytobiomes Journal*. 2021. Vol. 5. No. 4. P. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-20-0073-R>.
- da Silva Lima L., Olivares F. L., Rodrigues de Oliveira R., Vega M. R. G., Aguiar N. O., Canellas L. P. Root exudate profiling of maize seedlings inoculated with *Herbaspirillum seropedicae* and humic acids. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 23–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0023-z>.
- Ding J., Jiang X.M.M., Zho B., Gua D., Zha B., Zhou J., Cao F., Li L., Li J. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China. *Applied Soil Ecology*. 2016. Vol. 105. P. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.010>.
- Dong W., Liu E., Yan C., Tian J., Zhang H., Zhang Y. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China. *European Journal of Soil Biology*. 2017. Vol. 80. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.001>.

- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26. No. 19. P. 2460–2461. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>.
- Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads. *Nature Methods*. 2013. Vol. 10. P. 996–998. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>.
- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads. *bioRxiv*. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1101/081257>.
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences. *bioRxiv*. 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1101/074161>.
- Ertani A., Francioso O., Tugnoli V., Righi V., Nardi S. Effect of commercial lignosulfonate-humate on *Zea mays* L. metabolism. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59. No. 22. P. 11940–11948. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf202473e>.
- Fadrosh D.W., Ma B., Gajer P., Gajer P., Sengamalay, N., Ott, S., Brotman R.M. Ravel J. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*. 2014. Vol. 2. A.6. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>.
- Feoktistova A., Timergalin M., Chetverikov S., Nazarov A., Kudoyarova G. Effects of Pseudomonas plecoglossicida 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Pigment Indices and Concentration of Hormones in Wheat Seedlings Grown under Water Deficit. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. No. 3. A.549. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030549>.
- García-Sánchez F., Simón-Grao S., Navarro-Pérez V., Alfosea-Simón M. Scientific Advances in Biostimulation Reported in the 5th Biostimulant World Congress. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. No. 7. P. 665. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070665>.
- Gosal S.K., Saroa G. S., Vika, Y., Cameotr, S. S., Pathani, N., Bhanot A. Isolation and molecular characterisation of diazotrophic growth-promoting bacteria from wheat rhizospheric soils of Punjab. *Soil Research*. 2011. Vol. 49. No. 8. P. 725–732. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR11136>.
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4. P. 9.
- He Y., Wang D., Liu K., Deng S., Liu Y. Sodium humate alleviates LPS-induced intestinal barrier injury by improving intestinal immune function and regulating gut microbiota. *Molecular Immunology*. 2023. Vol. 161. P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2023.07.012>.
- Hegab R.H., Eissa D., Abou-Shady A. Effects of foliar application of selenium and potassium-humate on oat growth in Baloza, North Sinai, Egypt. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15119. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19229-x>.
- Hong C., Su Y., Lu S. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018. Vol. 25. No. 30. P. 30547–30556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3086-8>.
- Hou K., Lu C., Shi B., Xiao Z., Wang X., Zhang J., Cheng C., Ma J., Du Z., Li B., Zhu L. Evaluation of agricultural soil health after applying pyraclostrobin in wheat/maize rotation field based on the response of soil microbes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2022. Vol. 340. P. 108186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108186>.
- Ikunaga Y., Sato I., Grond S., Numaziri N., Yoshida S., Yamaya H., Hiradate S., Hasegawa M., Toshima H., Koitabashi M., Ito M., Karlovsky P., Tsushima S. *Nocardioides* sp. strain WSN05-2, isolated from a wheat field, degrades deoxynivalenol, producing the novel intermediate 3-epi-deoxynivalenol. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2011. Vol. 89. No. 2. P. 419–427. DOI: <https://doi.org/20857291>.
- Innerebner G., Knief C., Vorholt J.A. Protection of *Arabidopsis thaliana* against Leaf-Pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* Strains in a Controlled Model System. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 10. P. 3202–3210. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00133-11>.
- Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu, Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of *Panax ginseng*. *Microbiological research*. 2022. Vol. 254. P. 126914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126914>.
- Kaplan H., Ratering S., Felix-Henningsen P., Schnell S. Stability of in situ immobilization of trace metals with different amendments revealed by microbial ¹³C-labelled wheat root decomposition and efflux-mediated metal resistance of soil bacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 659. P. 1082–1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.441>.

- Kemgro Crop Solutions, Waikerie, South Australia. [Electronic resource]. URL: <https://kemgro.com.au/wp-content/uploads/2021/12/Kemgro-Humic26-brochure3.pdf> (accessed on 29.09.2023).
- Lee C. H., Lee Y. B., Lee H., Kim P. J. Reducing phosphorus release from paddy soils by a fly ash-gypsum mixture. *Bioresource technology*. 2007. Vol. 98. No. 10. P. 1980–1984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.050>.
- Liu M., Wang, C., Wang, F., & Xie, Y. Vermicompost and humic fertilizer improve coastal saline soil by regulating soil aggregates and the bacterial community. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*. 2019. Vol. 65. No. 3. P. 281–293. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1498083>.
- Lyons G., Genc Y. Commercial Humates in Agriculture: Real Substance or Smoke and Mirrors? *Agronomy*. 2016. Vol. 6. No. 4. A.50. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy6040050>.
- Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Undisturbed Soil Pedon under Birch Forest: Characterization of Microbiome in Genetic Horizons. *Soil Systems*. 2021. Vol. 5. No. 1. A.14. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010014>.
- Noskov Y.A., Kabilov M.R., Polenogova O.V., Yurchenko Y.A., Belevich O.E., Yaroslavtseva O.N., Alikina T.Y., Byvaltsev A.M., Rotskaya U.N., Morozova V.V., Glupov V.V., Kryukov V.Y. A Neurotoxic Insecticide Promotes Fungal Infection in *Aedes aegypti* Larvae by Altering the Bacterial Community. *Microbial Ecology*. 2021. Vol. 8. P. 493–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01567-w>.
- Ondrasek G., Romić D., Tanaskovik V., Savić R., Rathod S., Horvatinec J., Rengel Z. Humates mitigate Cd uptake in the absence of NaCl salinity, but combined application of humates and NaCl enhances Cd mobility & phyto-accumulation. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 847. P. 157649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157649>.
- Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly C., Lakhdar A. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production*. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 353–374. DOI: <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1614>.
- Panova I., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A. A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil. *Land Degradation and Development*. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1022–1033. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3743>.
- Praeg N., Seeber J., Leitinger G., Tasser E., Newesely C., Tappeiner U., Illmer P. The role of land management and elevation in shaping soil microbial communities: Insights from the Central European Alps. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 107951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107951>.
- Relict Organics, ООО НПП «Генезис». [Electronic resource] URL: <https://relictorganics.com/relict> (accessed on 29.09.2023).
- Sangwan P., Kovac S., Davis K. E. R., Sait M., Janssen P. H. Detection and Cultivation of Soil *Verrucomicrobia*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71. No. 12. P. 8402–8410. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>.
- Sulieman A.M., Idris A., Alanazi N., Alshammari N., Alshammari A., Kahrizi S., Al-Azmi M. The Different Ecological, Medical, and Industrial Important Bacteria Harboring the Soil of Hail, Kingdom of Saudi Arabia. *Cellular and Molecular Biology*. 2022. Vol. 68. No. 9. P. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2022.68.9.6>.
- Ullah A., Ali M., Shahzad K., Ahmad F., Iqbal S., Rahman M. H. U., Ahmad S., Iqbal M. M., Danish S., Fahad S., Alkahtani J., Soliman Elshikh M., Datta R. Impact of Seed Dressing and Soil Application of Potassium Humate on Cotton Plants Productivity and Fiber Quality. *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 11. A.1444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111444>.
- van Rensburg CE. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review. *Phytotherapy Research*. 2015. Vol. 29. No. 6. P. 791–795. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.5319>.
- Wang D., You Z., Du Y., Zheng D., Jia H., Liu Y. Influence of Sodium Humate on the Growth Performance, Diarrhea Incidence, Blood Parameters, and Fecal Microflora of Pre-Weaned Dairy Calves. *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12010123>.
- Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy// *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73. P. 5261–5267. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>.
- Wen T., Ding Z., Thomashow L. S., Hale L., Yang S., Xie P., Liu X., Wang H., Shen Q., Yuan J. Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil. *New Phytologist*. 2023. Vol. 238. No. 6. P. 2634–2650. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18886>.

Whitton M. M., Ren X., Yu S. J., Irving A. D., Trotter T., Bajagai Y. S., Stanley D. Humate application alters microbiota-mineral interactions and assists in pasture dieback recovery. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 2. P. e13327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13327>.

Xu Y., Ge Y., Lou Y., Meng J., Shi L., Xia F. Assembly strategies of the wheat root-associated microbiome in soils contaminated with phenanthrene and copper. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125340>.

Yörük M.A., Gül M., Hayirli A., Macit M. The effects of supplementation of humate and probiotic on egg production and quality parameters during the late laying period in hens. *Poultry Science*. 2004. Vol. 83. No. 1. P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/83.1.84>.

Zhang Y., Zhang M., Tang L., Che R., Chen H., Blumfield T., Boyd S., Nouansyvong M., Xu Z. Long-Term Harvest Residue Retention Could Decrease Soil Bacterial Diversities Probably Due to Favouring Oligotrophic Lineages // *Microbial Ecology*. 2018. Vol. 76. No. 3. P. 771–781. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1162-8>.

Zhang F., Xu N., Zhang Z., Zhang Q., Yang Y., Yu Z., Sun L., Lu T., Qian H. Shaping effects of rice, wheat, maize, and soybean seedlings on their rhizosphere microbial community. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2023. Vol. 30. No. 13. P. 35972–35984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24835-3>.

Zhilikbayev O., Aitbayev T. E., Zhirkova A. M., Perminova I.V., Popov A.I., Shoinbekova S. A., Kudaibergenov M. S., Shalmaganbetov K. M. The Coal Humic Product EldORost Shows Fertilizing and Growth Stimulating Properties on Diverse Agricultural Crops. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123012>.

Zhuo L., Li H., Cheng F., Shi Y., Zhang Q., Shi W. Co-remediation of cadmium-polluted soil using stainless steel slag and ammonium humate. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011. Vol. 19. No. 7. P. 2842–2848. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0790-7>.

Received 06 October 2023
Accepted 23 November 2023
Published 24 November 2023

About the authors:

Naumova Natalia Borisovna – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); naumova@issa-siberia.ru

Belanov Ivan Petrovich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); belanov@issa-siberia.ru

Savenkov Oleg Alexandrovich – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); savenkov@issa-siberia.ru

Stepanova Maria Victorovna – Junior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); maria44421@gmail.com

Shemeleva Galina Vitalievna – Junior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); shgv95@mail.ru

Baturina Olga Anatolievna – Junior Researcher in Genomics Core Facility of Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia). E-mail: baturina@niboch.nsc.ru

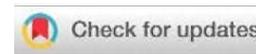
Kabilov Marsel Rasimovich – Candidate of Biological Science, Head of the Genomics Core Facility in the Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia). E-mail: kabilov@niboch.nsc.ru

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/)

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.237>

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ (Zn, Cd, Pb, Cu) В ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ СФАГНУМА НА ОСУШЕННЫХ И ПОСТПИРОГЕННЫХ УЧАСТКАХ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ

© 2023 Е. А. Головацкая , Л. Г. Никонова , Д. А. Калашникова , Г. В. Симонова 

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

Цель исследования. Оценка динамики содержания тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в процессе разложения сфагнума *Sphagnum fuscum* L. на нативных, осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот.

Место и время проведения. Исследования проведены в 2018–2021 гг. на двух олиготрофных болотах: «Бакчарское» (стационар «Васюганье», ИМКЭС СО РАН) и «Иксинское», представляющих собой северо-восточные отроги Большого Васюганского болота и расположенные в Бакчарском районе Томской области.

Методы. Скорость разложения *Sph. fuscum* определили методом частично изолированных проб, широко используемым для изучения процессов трансформации растительного материала и торфа. В исходных и разложившихся образцах сфагнового очёса и торфяной почве (в слоях 0–10, 10–20, 20–30 см) определили зольность торфа по ГОСТ-11306-83. Содержание общих углерода и азота в образцах торфа (до 30 см от поверхности) и растительных остатков определили совместно с выполнением изотопного состава с помощью EA-IRMS (элементный анализатор/масс-спектрометрия изотопных отношений). Содержание тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в образцах торфа и растительных остатков определили методом инверсионной вольтамперометрии.

Основные результаты. Трёхлетний эксперимент по разложению *Sph. fuscum* в четырёх экосистемах (естественной – участок VASnat, осушенной – участок VASdry, постпирогенных – участки Iksa1 и Iksa2) показал, что влияние пожара сказывается на скорости разложения: в среднем потери массы на постпирогенных участках ниже в 1,4–1,6 раза по сравнению с естественным. Практически для всех участков выявлена связь между потерей массы и содержанием тяжёлых металлов (ТМ), за исключением кадмия в течение первого года эксперимента. Содержание всех элементов в растительных остатках сфагновых мхов снижалось в процессе разложения на всех исследуемых участках. Во время разложения мха зафиксирована схожесть высвобождения биогенных элементов меди и цинка на осушенном и постпирогенных участках (VASdry, Iksa1, Iksa2), в то время как для кадмия и свинца, не относящихся к биогенным элементам, подобной схожести высвобождения не зафиксировано.

Заключение. Влияние торфяных пожаров проявилось в снижении скорости разложения растительных остатков *Sph. fuscum*. Выявлена стадийная динамика содержания тяжёлых металлов в растительных остатках: на самом начальном этапе происходит высвобождение ТМ, на второй и третий годы в отдельных случаях отмечается их накопление, однако к концу эксперимента для всех элементов наблюдался высвобождение ТМ при разложении сфагнового очёса.

Ключевые слова: трансформация растительных остатков; тяжёлые металлы; биогеохимический цикл; пирогенные торфяники; осушенные торфяники; Западная Сибирь.

Цитирование: Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Динамика содержания тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в процессе разложения сфагнума на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e237. DOI: [10.31251/pos.v6i3.237](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.237).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в результате происходящих климатических изменений и роста антропогенной нагрузки изменения природных экосистем, в том числе болотных, приобрели необычайно сильный характер. Несмотря на то, что болотные экосистемы занимают незначительную площадь – 3–5% от поверхности суши (Gorham, 1991) – исследования, посвящённые получению данных о возможных изменениях в функционировании болотных экосистем, связанные как с изменениями климато-экологических условий, так и с антропогенным воздействием весьма актуальны, поскольку биосферная роль болотных экосистем весьма велика.

Аккумуляция элементов, в том числе и **тяжёлых металлов (ТМ)**, болотными растениями, и отложение их в торфе зависит от многих факторов: геоморфологии, гидрологии, минерального состава подстилающей породы, ботанического состава торфяной залежи и др. (Гашкова, 2016). Темпы разложения растительных остатков и высвобождения из них элементов зависят от индивидуальных особенностей растений и условий, в которых эти процессы протекают (Козловская и др., 1978; Денисенков, 2000; Никонова и др., 2019; Peltoniemi et al., 2012); при этом ведущую роль в процессах трансформации растительных остатков играют влажность и температура (Козловская и др., 1978; Боч, 1979; Денисенков, 2000; Никонова и др., 2019). При изменении климатических условий происходит изменение гидротермического режима болот, что приводит к изменениям в биогеохимических циклах, так как потепление и снижение уровня болотных вод стимулирует процесс разложения органического вещества торфа, а также приводит к изменениям состава и структуры растительного покрова (Вомперский, 1994; Карелин, Пулы и потоки..., 2007; Замолотчиков, 2008; Gifford, Howden, 2001; Leadley et al., 2010). Также одним из наиболее значимых факторов, влияющим на биогеохимические циклы болотных экосистем, являются антропогенное воздействие (осушение болот) и пожары (Харанжевская и др., 2019; Benscoter, Vitt, 2008; Parish et al., 2008).

Активное развитие промышленности в сочетании с глобальным атмосферным переносом способствует изменению естественных биогеохимических циклов ТМ за счёт выбросов веществ загрязнителей в окружающую среду из различных источников (Sun et al., 2010; Su, Liang, 2015). Для различных торфяников России и мира определены уровни аккумуляции тяжелых металлов, сформированные глобальными атмосферными выпадениями и локальными антропогенными источниками (Московченко, 2006; Coggins et al., 2006; Stepanova et al., 2014). Дополнительным источником поступления ТМ являются пожары. При лесных и особенно торфяных пожарах в атмосферу выделяется огромное количество продуктов сгорания растительной биомассы в виде газообразных веществ и твёрдых аэрозольных частиц (дым), в том числе и тяжёлые металлы (Zn, Cd, Pb, Cu и др.), которые осаждаются на поверхности, могут оказывать влияние на стабильность функционирования природных экосистем. Из-за их токсичности и способности к биоаккумуляции повышенное поступление тяжёлых металлов в окружающую среду может потенциально угрожать экосистемам и здоровью человека (Uzu et al., 2011; Goix et al., 2014; Leveque et al., 2014). Такие тяжёлые металлы как свинец (Pb) и кадмий (Cd) являются очень токсичными для живых организмов даже при очень низких концентрациях (Niazi et al., 2011; Harguintegy et al., 2016). Несмотря на то, что достаточно много исследований посвящено изучению влияния повышенного содержания тяжёлых металлов в атмосфере, почве, сельскохозяйственных культурах и водоёмах (Shahid et al., 2017), очень мало данных получено о динамике содержания тяжёлых металлов, связанной с биогеохимическими и экологическими процессами, такими как разложение растительных остатков, хотя количественная оценка для этих процессов необходима для прогнозирования воздействия загрязнения тяжёлыми металлами на функционирование экосистемы, например, на качество почвы (Richardson et al., 2014).

Растительный опад служит основным источником энергии и питательных веществ в экосистемах, поэтому разложение опада является одним из основных потоков углерода (C) в атмосферу, а также приводит к изменению концентрации ТМ (источником трансформации, модификации, преобразования) в экосистемах (Berg, 2014). Следовательно, разложение опада является важным процессом в функционировании естественной экосистемы и способствует высвобождению или накоплению ТМ (Shcherbov, Lazareva, 2010; Jonczak, 2013; Berg, 2014). Исследования, связанные с изучением процесса трансформации растительных остатков в различных экосистемах довольно многочисленны, однако наиболее изучены в этом плане лесные и сельскохозяйственные экосистемы, в то время как работ, посвященных изучению динамики разложения растений-торфообразователей в болотных экосистемах сравнительно немного (Козловская и др., 1978; Боч, 1979; Бамбалов и др., 1990; Миронычева-Токарева и др., 2007; Паршина, 2009; Вишнякова и др., 2012; Головацкая, Никонова, 2013; Никонова, Головацкая 2019; Verhoeven, Arts, 1992; Bragazza et al. 2007, 2009; Leroy et al., 2018 и др.). Это подчеркивает актуальность проведенных нами исследований. Кроме того, подобные исследования посвящены в основном оценке потери массы растительных остатков, динамике углерода и питательных веществ (Berg, 2014), а данных по динамике содержания тяжёлых металлов при разложении растительных остатков очень мало (Sun et al., 2016; Weis J., Weis P., 2004).

Биогеохимические циклы олиготрофных болот, в отличие от минеральных почв, в силу особенностей минерального питания, слабо связаны с минеральными горизонтами, грунтовыми водами и окружающими ландшафтами, так как основная часть микро- и макроэлементов (в том числе тяжёлых металлов) поступает в результате атмосферного выпадения (Веретенникова, Головацкая, 2012; Татаринцева и др., 2022). В основном исследования влияния загрязнения ТМ на состояние растительных сообществ ограничиваются изучением уровня накопления ТМ разными компонентами природных экосистем (Горюнова, 2001; Федорова, Одинцева, 2005; Безель и др., 2016), в то время как содержание ТМ может оказывать влияние на процессы продукции фитомассы и ее трансформацию (Воробейчик, 2002; Помазкина, 2011; Казнина, Титов, 2013; Жуйкова и др., 2013; Berg, Ekbohm, 1991; Chew et al., 2001 и др.). Способность органического вещества торфа к формированию прочных органо-минеральных комплексов, связывающих в том числе и ТМ (Berg, 2014; Laskowski, Berg, 1993; Tyler, 2005), может привести к смене динамики многих биогеохимических процессов. При разрушении органических комплексов при тлении торфяника чрезмерно накапливаются свободные ионы металлов, что сказывается на увеличении их концентрации в вытекающем из болот водном стоке и в атмосфере (Михайлова и др., 2011). Высокие концентрации ТМ могут оказывать неоднозначное воздействие на экосистему, включая подавление почвенных микробов (Laskowski, Berg, 1993), мицелия и дыхания почвы (Rühling et al., 1973). В зависимости от условий окружающей среды, ТМ могут подавлять разложение, что влияет на функционирование экосистемы (Berg, Ekbohm, 1991; Nattori, 1992; Laskowski и др., 1994; De Santo и др., 2002). Если динамика основных элементов на стадиях разложения хорошо изучена, то знания о динамике ТМ при разложении растительных остатков в болотных экосистемах, в том числе подвергшихся воздействию пожаров, отсутствуют.

Цель исследования заключалась в оценке динамики содержания тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в процессе разложения *Sphagnum fuscum* L. на нативных, осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на двух олиготрофных болотах (рис. 1): «Бакчарское» (стационар «Васюганье», ИМКЭС СО РАН) и «Иксинское», представляющих собой северо-восточные отроги Большого Васюганского болота и расположенные в Бакчарском районе Томской области. В 1970-е годы болото «Иксинское» было осушено, что привело к некоторым изменениям в природной среде, в частности, осушение значительных площадей болотного участка привело к повышению пожарной опасности территории, в результате чего в 1998 г. выгорело 37,4 км² осушенного болота (Базанов, 2002). На Бакчарском болоте выбраны две наблюдательные площадки: естественный сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз (**VASnat**, 56°52'31,7" с.ш. и 82°48'27,3" в.д.) и осушенный сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз, расположенный вблизи водоотводного канала (**VASdry**, 56°53'33,3" с.ш. и 82°51'08,0" в.д.). На Иксинском болоте исследованы два участка с разной степенью пирогенной сукцессии: сосново-берёзовый пушицево-сфагновый фитоценоз со слабо выраженной степенью пирогенной сукцессии (**Iksa1**, 56°52'03,4" с.ш. и 83°11'52,1" в.д.) и сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз с выраженным подростом сосны (**Iksa2**, 56°51'42,1" с.ш. и 83°17'53,0" в.д.).

По данным метеостанции Бакчар (tr5.ru) за период исследования (2018–2021 гг.) среднегодовая температура воздуха составила 0,79±1,47°C, среднегодовая сумма осадков – 524±92 мм. Средняя температура вегетационного периода с начала мая до конца сентября составила около 13,9°C, количество осадков в летние месяцы – 277 мм.

Для наблюдения за температурой почвы использовали автономный комплекс измерения профиля температуры и уровня грунтовых вод (Кураков, 2008). Температуру торфяной почвы измеряли на глубинах 5, 10 и 15 см за период с сентября 2018 г. по сентябрь 2021 г. В среднем за период проведения эксперимента участок VASdry характеризовался самым низким **уровнем болотных вод (УБВ)** (-56) см и относительно тёплыми условиями на глубине 15 см в течение вегетационного периода (+12,2°C) (табл. 1, рис. 2). Участок Iksa1 был наиболее обводнённым (УБВ = -16 см) и характеризовался относительно прохладными условиями торфяной залежи (+10,7°C). Участок Iksa2 также был достаточно обводнённым (УБВ = -27 см), но температура торфяной залежи была значительно выше (+13,6°C). Участок VASnat характеризовался самыми низкими значениями температуры (+9,6°C) и достаточно низким уровнем болотных вод (-40 см).

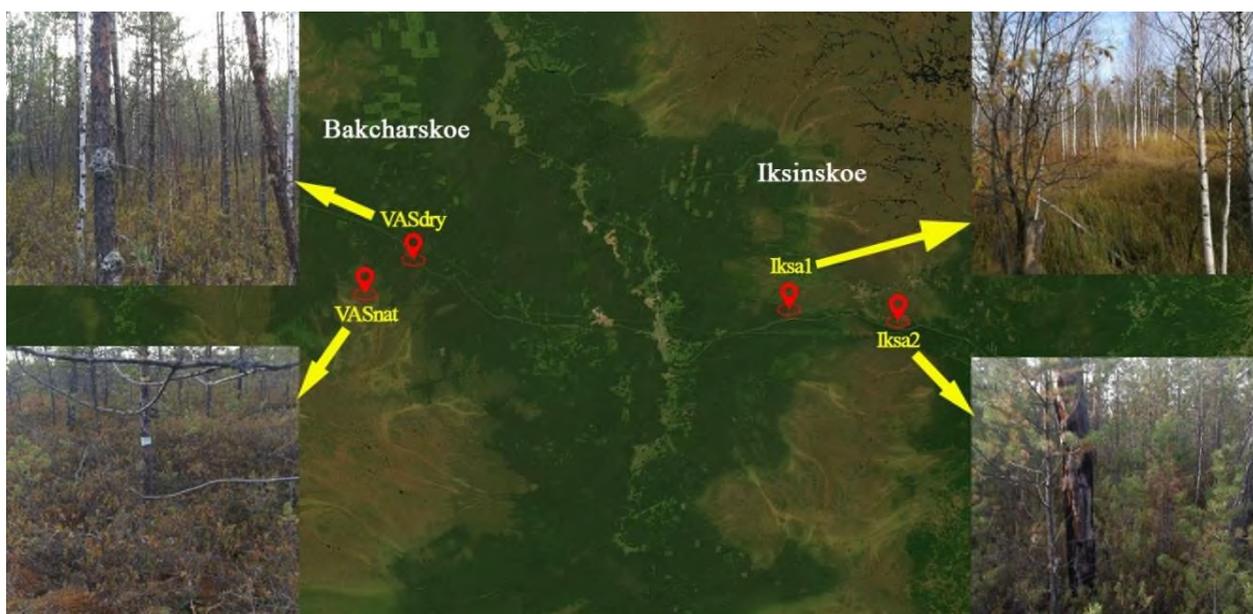


Рисунок 1. Расположение объектов исследования (здесь и далее в табл. 1–3 и на рис. 2–6): на Бакчарском болоте – естественный сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз (VASnat) и осушенный сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз, расположенный вблизи водоотводного канала (VASdry); на Иксинском болоте – сосново-березовый пушицево-сфагновый фитоценоз со слабо выраженной степенью пирогенной сукцессии (Iksa1) и сосново-кустарниково-сфагновый фитоценоз с выраженным подростом сосны (Iksa2).

Таблица 1

Гидротермические условия торфяных почв на исследуемых участках болот

Год	VASnat	VASdry	Iksa1	Iksa
	нативное	осушенное	постпирогенное	
Средняя температура почвы на глубине 15 см, май-сентябрь, °С				
2019 год	9,0	11,6	9,8	13,4
2020 год	11,1	13,3	11,6	14,7
2021 год	8,5	11,7	n/a	12,8
Среднее за 2019-2021 гг.	9,6	12,2	10,7	13,6
Уровень болотных вод, см от поверхности				
2019 год				
Май	-23	n/a	n/a	n/a
Июнь	-28	-21	-7	-10
Июль	-33	-32	-13	-15
Август	-51	-53	-33	-40
Сентябрь	-49	-59	-44	-51
2020 год				
Май	-32	-41	6	-11
Июнь	-34	-48	3	-18
Июль	-41	-70	-6	-20
Август	-51	-87	-21	-42
Сентябрь	-53	-95	-29	-36
Среднее, 2019-2020 гг.	-40	-56	-16	-27

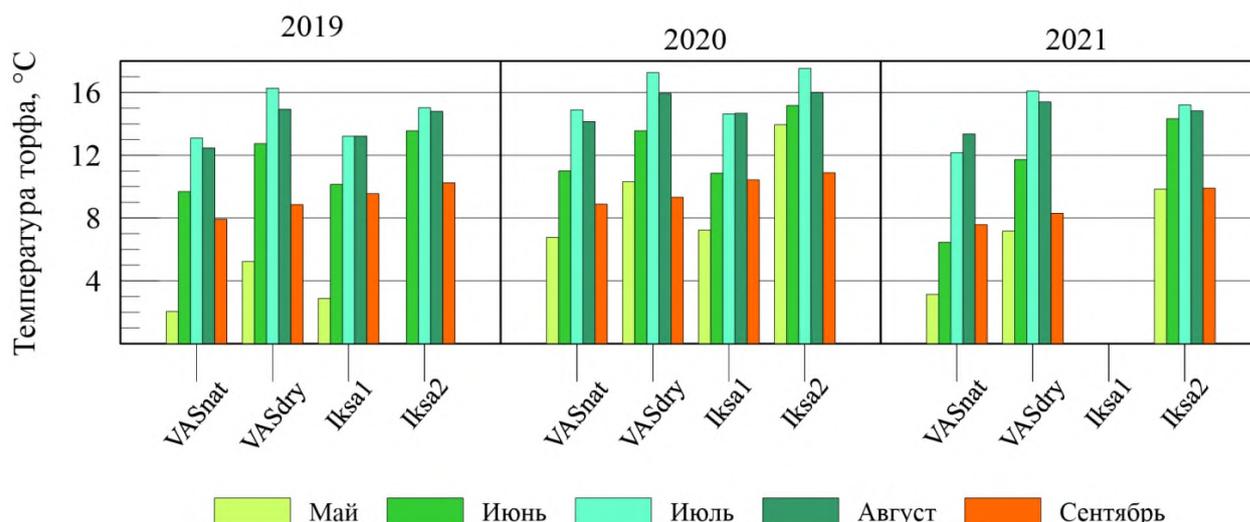


Рисунок 2. Среднемесячная температура торфа на глубине 15 см за вегетационный период (май–сентябрь) 2019–2021 гг. (за 2021 г. для участка Iksa1 данные отсутствуют по техническим причинам).

Отбор почвенных образцов. Образцы торфяной почвы отбирали на каждом пункте исследования методом монолитов площадью 10×10 см до глубины 30 см. Монолит разделяли на 10-ти сантиметровые слои. Всего было отобрано 36 образцов торфа (по 9 образцов на каждом пункте исследования).

Разложение растительных остатков. Для изучения разложения торфообразующих растений выбран доминирующий вид современного растительного покрова олиготрофных болот – *Sph. fuscum*. Скорость разложения растений определили методом частично изолированных проб, широко используемым для изучения процессов трансформации растительного материала и торфа (Головацкая, Никонова, 2017). В сентябре 2018 г. был собран очес *Sph. fuscum* (верхние 10 см) с естественного болота. Высушенные на воздухе образцы растений помещали в нейлоновые мешочки размером 15×15 см. Всего было подготовлено 48 образцов сфагнового мха. Масса каждого образца составила 10 г. Подготовленные образцы были помещены в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности мха на каждом исследуемом участке. Образцы извлекали через 1, 2 и 3 года.

Химический анализ растительных остатков и торфа. В исходных и разложившихся образцах сфагнового очёса и торфяной почве (в слоях 0–10, 10–20, 20–30 см) определили зольность торфа по ГОСТ 11306-83.

Содержание общих углерода и азота в образцах торфа (до 30 см от поверхности) и растительных остатков, определили совместно с выполнением изотопного состава с помощью EA-IRMS (элементный анализатор/масс-спектрометрия изотопных отношений) (Лебедев, 2013). В данной статье результаты изучения изотопного состава не приведены; использованы только данные по содержанию общих углерода и азота. Подробные изотопные характеристики и описание условий анализа представлены в предыдущих исследованиях (Golovatskaya et al., 2022).

Содержание тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в образцах торфа и растительных остатков определили методом инверсионной вольтамперометрии (Abollino et al., 2019). Суть данного метода заключается в предварительном концентрировании определяемых элементов на рабочем электроде и последующей регистрации процесса растворения накопленных на электроде элементов. Возникающий в процессе растворения элементов ток имеет форму пика, максимальный ток пропорционален концентрации элемента (Abollino et al., 2019).

Подготовку проб торфа провели в соответствии с методическими указаниями 31-11/05 (2006). Для определения валового содержания Zn, Cd, Pb, Cu из пробы торфа предварительно готовили вытяжку. К 5 г сухой и гомогенизированной пробы приливали 50% HNO₃, перемешивали, нагревали и кипятили в течение 10 мин. К остывшему раствору добавляли концентрированную H₂O₂ и вновь кипятили 10 мин. Охлажденную вытяжку отфильтровывали, 1 мл подготовленной вытяжки выпаривали при температуре 160–180°C при помощи программируемой печи ПДП-Аналитика. Пробу озольяли в муфельной печи (450°C, 30 минут). При наличии в золе угольных включений добавляли 1 мл концентрированной HNO₃ и 0,5 мл концентрированной H₂O₂, выпаривали досуха и

снова выдерживали в муфеле. Обработку HNO_3 и H_2O_2 с озолением в муфеле продолжали до получения золы однородного цвета.

Подготовку проб растительных остатков провели в соответствии с методическими указаниями 31-04/04 (2004). Пробы растительных остатков ($m = 0,5$ г) высушивали при температуре $150\text{--}320^\circ\text{C}$ в течение 1–2 часов. Затем пробы полностью растворяли в концентрированной HNO_3 , выпаривали до $1/3$ начального объёма, охлаждали до комнатной температуры. Далее к пробе добавляли 2–3 мл концентрированной HNO_3 и 1–1,5 мл 30%-й H_2O_2 , выпаривали досуха и озоляли в муфельной печи (25 минут при 450°C). Растворение в HNO_3 и H_2O_2 с дальнейшим выпаривания и озолением повторяли до получения золы однородного цвета.

Перед анализом золу растворяли в 10 мл электролита (1 мл концентрированной муравьиной кислоты и 9 мл бидистиллята). Определение концентраций Zn, Cd, Pb и Cu проводили на вольтамперометрическом анализаторе TA-Lab (НПП «Томьаналит», Томск, Россия). Электрохимическая ячейка состояла из трех электродов: два хлорсеребряных электрода (вспомогательного и сравнения, заполненных 1 М раствором хлорида калия) и рабочего амальгамного электрода.

Расчёты и статистический анализ. Потери массы (ML, % от исходной массы растительной пробы) рассчитывали по уравнению:

$$ML(\%) = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100, (1)$$

где M_0 – сухая масса исходной пробы (г); M_t – сухая масса пробы через 12, 24 и 36 месяцев после начала эксперимента (г).

Высвобождение/накопление (%) тяжелого металла рассчитывали как динамику содержания металла, нормализованную по массе, по следующей формуле:

$$\text{Release / accumulation (\%)} = \frac{M_t \times C_t - M_0 \times C_0}{M_0 \times C_0} \times 100\% (2)$$

где M_0 – исходная масса исходной пробы (г); M_t – масса пробы через 12, 24 и 36 месяцев (г); C_0 – исходная концентрация ТМ в исходной пробе (мг/кг); C_t – концентрация ТМ в пробе через 12, 24, 36 месяцев (мг/кг) (Kondratova, Bryanin, 2021).

Статистическую обработку экспериментальных данных провели с использованием Excel 2010. Различия считали статистически значимым при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание тяжёлых металлов в торфе. Полученные в ходе исследования значения зольности, содержание общих углерода и азота, отношение C/N (на основе их массовой доли), а также содержание ТМ (Zn, Cu, Cd и Pb) в образцах торфа с разных глубин на всех участках приведены в таблице 2. Содержание углерода в торфяной залежи (0–30 см) отличалось на исследуемых участках. Более высокое содержание углерода получено для участков VASdry и Iksal. По-видимому, в результате осушения происходит увеличение содержания углерода за счёт постепенного изменения ботанического состава верхних горизонтов торфяной залежи, так как развивается более густой кустарничковый ярус, увеличивается доля зелёных мхов в растительном покрове и т.д. Для поспирогенных участков повышение содержания углерода в торфе может быть вызвано наличием микроугольков, образовавшихся в результате пожара. Для всех исследуемых участков, за исключением Iksal, характерна повышенная зольность, что также связано с последствиями пожаров. Кроме того, эти участки расположены относительно недалеко от дороги, что может оказывать влияние на осаждение зольных элементов на поверхности и последующим их вымыванием в более глубокие слои. Как правило, для торфяных почв характерно увеличение зольности при снижении содержания углерода, однако в случае антропогенно нарушенных болот и тем более горевших, подобные закономерности могут нарушаться.

Сравнивая полученные данные по содержанию ТМ в торфе на всех участках с **предельно допустимыми концентрациями (ПДК)** валовых форм для почвы (Pb – 65, Cd – 1, Cu – 66 и Zn – 110 мг/кг) (САНПИН 1.2.3685-21, 2021), можно заметить, что на всех участках превышение ПДК не выявлено.

Таблица 2

Химические свойства торфяной почвы на исследуемых участках болот
(среднее \pm стандартное отклонение)

Глубина, см	VASnat	VASdry	Iksa1	Iksa 2
	нативное	осушенное	постпирогенное	
Зольность, %				
0–10	1,31 \pm 0,03	2,66 \pm 0,14	3,02 \pm 0,08	3,02 \pm 0,15
10–20	0,70 \pm 0,07	3,02 \pm 0,09	2,82 \pm 0,22	1,14 \pm 0,10
20–30	1,26 \pm 0,08	6,89 \pm 0,09	8,39 \pm 0,15	3,89 \pm 0,15
Общий углерод (C), %				
0–10	41,0 \pm 1,1	43,0 \pm 1,4	45,0 \pm 1,3	41,0 \pm 1,5
10–20	41,0 \pm 1,3	42,0 \pm 1,2	40,0 \pm 1,1	41,0 \pm 1,2
20–30	41,0 \pm 1,2	42,0 \pm 1,5	43,0 \pm 1,7	41,0 \pm 1,1
Общий азот (N), %				
0–10	0,6 \pm 0,08	1,3 \pm 0,09	1,1 \pm 0,08	1,2 \pm 0,06
10–20	0,5 \pm 0,05	1,6 \pm 0,1	0,9 \pm 0,07	1,0 \pm 0,07
20–30	0,6 \pm 0,04	2,3 \pm 0,2	1,9 \pm 0,09	1,1 \pm 0,07
C/N (на основе их массовой доли)				
0–10	68,4	33,1	40,9	34,2
10–20	82,0	26,3	44,4	41,0
20–30	68,3	22,6	22,6	37,3
Кадмий (Cd), мг/кг				
0–10	0,08 \pm 0,03	0,12 \pm 0,05	0,07 \pm 0,03	0,086 \pm 0,03
10–20	0,07 \pm 0,03	0,11 \pm 0,04	0,16 \pm 0,06	0,12 \pm 0,05
20–30	0,04 \pm 0,02	0,06 \pm 0,02	0,029 \pm 0,01	0,09 \pm 0,03
Свинец (Pb), мг/кг				
0–10	5,29 \pm 2,06	7,66 \pm 2,68	3,48 \pm 1,36	5,56 \pm 2,17
10–20	8,14 \pm 3,17	18,2 \pm 7,8	9,77 \pm 3,42	6,26 \pm 2,44
20–30	8,84 \pm 3,09	6,67 \pm 2,60	6,32 \pm 2,46	25,6 \pm 11,0
Медь (Cu), мг/кг				
0–10	3,25 \pm 1,27	3,37 \pm 1,31	6,31 \pm 2,46	3,38 \pm 1,32
10–20	2,18 \pm 0,85	3,08 \pm 1,20	7,75 \pm 3,02	3,81 \pm 1,48
20–30	1,5 \pm 0,58	1,79 \pm 0,70	2,09 \pm 0,81	10,7 \pm 4,2
Цинк (Zn), мг/кг				
0–10	25,9 \pm 10,1	67,75 \pm 26,42	69,3 \pm 27,0	45,5 \pm 17,7
10–20	54,2 \pm 21,1	36,7 \pm 14,3	56,22 \pm 22,2	37,2 \pm 14,5
20–30	н/о	50,2 \pm 19,6	8,34 \pm 3,25	35,7 \pm 13,9

Минимальное содержание кадмия характерно для торфа с ненарушенного участка VASnat (0,06 \pm 0,02 мг/кг на глубине 0–30 см). Максимальное содержание кадмия определено в образцах торфа с участка Iksa1 (0,16 \pm 0,06 мг/кг). Тенденцию к уменьшению содержания кадмия с глубиной показали участки VASnat и VASdry. На участках Iksa1 и Iksa2 отмечено повышение содержания кадмия на глубине 10–20 см (причём для участка Iksa1 оно увеличилось в 2 раза) с последующим уменьшением на глубине 20–30 см.

Содержание свинца на глубине 0–10 см для всех участков примерно одинаковое (5,5 \pm 1,7 мг/кг). Для участка VASnat характерно небольшое повышение содержания свинца с увеличением глубины. Для участков VASdry и Iksa1 обнаружено резкое увеличение содержания свинца на

глубине 10–20 см с дальнейшим снижением на глубине 20–30 см. Для участка Iksa2 на глубине 20–30 см наблюдалось увеличение содержания свинца в 5 раз относительно глубины 0–10 см.

Самое низкое содержание меди с тенденцией уменьшения с глубиной характерны для торфа с участков VASnat и VASdry ($2,31 \pm 0,88$ и $2,75 \pm 0,84$ мг/кг на глубине 0–30 см). Для участка Iksa1 обнаружено незначительное увеличение содержания меди на глубине 10–20 см с дальнейшим уменьшением примерно в 4 раза на глубине 20–30 см. Для участка Iksa2 наблюдалась обратная картина: незначительное увеличение содержания меди на глубине 10–20 см с дальнейшим увеличением примерно в 3 раза на глубине 20–30 см.

Для участка VASnat выявлено увеличение содержания цинка в 2 раз на глубине 10–20 см относительно глубины 0–10 см, в то время как для остальных участков, наоборот, отмечено уменьшение данного показателя на глубине 10–20 см. На глубине 20–30 см участки VASdry и Iksa2 выявлено увеличение содержания цинка, а участок Iksa 1, наоборот, уменьшение примерно в 7 раз.

Разложение растительных остатков и динамика тяжёлых металлов. Наиболее интенсивное разложение происходит в течение первого года – в среднем 56% от суммарной за три года потери массы. В течение второго года происходило снижение интенсивности процесса разложения – на всех участках (за исключением Iksa) средние потери массы составили 7%, а на участке Iksa2 – 29% (рис. 3). В целом за три года воздействие на постпирогенных участках (Iksa1 и Iksa2) менее интенсивное: потеря массы на постпирогенных участках значительно ниже (20,8%), чем на нативных (VASnat) и высушенных (VASdry) участках (29,2%), различия потери массы достоверны при уровне значимости 5%. После трех лет разложения средняя потеря массы сфагнового оёса составила 25% (от 19,3 до 30,9% в зависимости от участков (табл. 3).

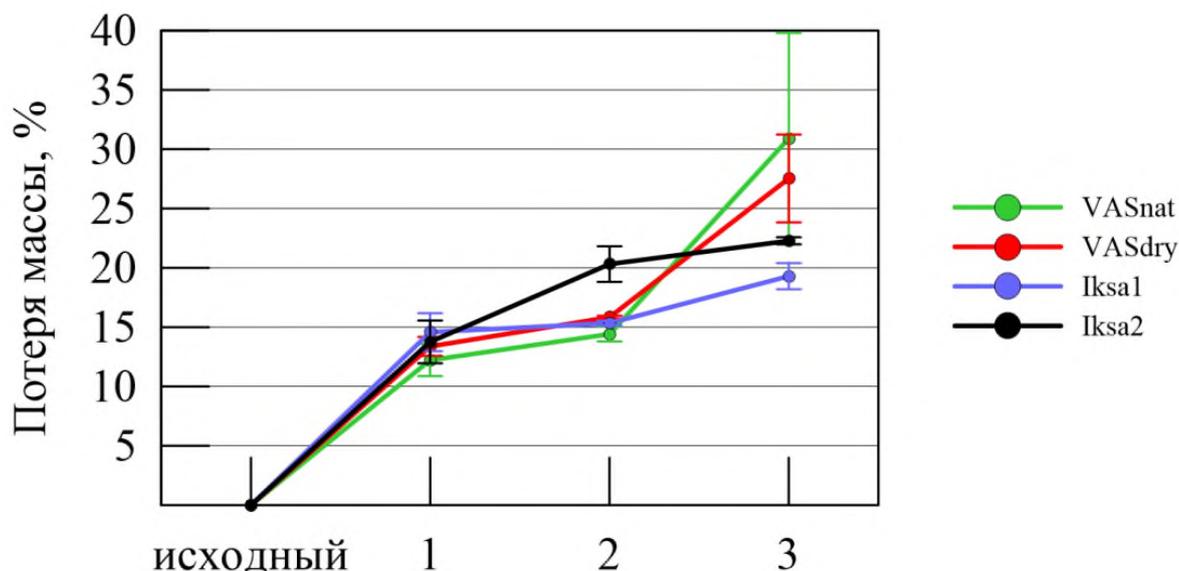


Рисунок 3. Динамика потери массы *Sph. fuscum* в процессе разложения.

Представлены (здесь и на рис. 4): (1) годы исследования: исходный – 2018, 1 – 2019, 3 – 2020, 3 – 2021; (2) среднее арифметическое значение (точка) и стандартное отклонение (вертикальная планка погрешности).

Таблица 3

Элементный состав исходных образцов *Sph. fuscum*, потери массы и изменение элементного состава в процессе разложения растительных остатков на исследуемых участках болот
(среднее \pm стандартное отклонение)

Показатели (I)	VASnat (II)	VASdry (III)	Iksa1 (IV)	Iksa2 (V)
Исходные данные				
Зольность, %	1,77 \pm 0,05			
Общий углерод (C), %	45,1 \pm 1,5			
Общий азот (N), %	0,69 \pm 0,08			
C/N*	65			
Кадмий (Cd), мг/кг	0,1125 \pm 0,0439			
Свинец (Pb), мг/кг	9,66 \pm 3,38			
Медь (Cu), мг/кг	3,76 \pm 1,48			
Цинк (Zn), мг/кг	43,9 \pm 17,1			
Образцы после разложения				
Зольность, %	II	III	IV	V
1 год (2019)	1,76 \pm 0,02	1,06 \pm 0,04	1,81 \pm 0,05	4,02 \pm 0,02
2 год (2020)	2,12 \pm 0,04	0,97 \pm 0,01	2,32 \pm 0,06	2,08 \pm 0,05
3 год (2021)	1,82 \pm 0,01	1,61 \pm 0,01	2,39 \pm 0,04	1,68 \pm 0,01
Потери массы, %				
1 год (2019)	12,23 \pm 1,351	13,38 \pm 0,77	14,58 \pm 1,57	13,77 \pm 1,8
2 год (2020)	2,19 \pm 0,63	2,46 \pm 0,12	0,76 \pm 0,19	6,55 \pm 1,47
3 год (2021)	16,48 \pm 8,96	11,71 \pm 3,74	3,96 \pm 1,11	1,96 \pm 0,26
Общие потери массы**	30,90 \pm 10,61	27,55 \pm 2,31	19,30 \pm 3,55	22,28 \pm 5,39
C, %				
1 год (2019)	41,3 \pm 1,2	40,0 \pm 1,6	42,1 \pm 1,1	40,9 \pm 1,2
2 год (2020)	47,0 \pm 1,5	43,3 \pm 1,5	45,7 \pm 1,3	46,0 \pm 1,2
3 год (2021)	44,8 \pm 1,5	45,9 \pm 1,8	44,2 \pm 1,5	45,5 \pm 1,4
Общие потери C**	27,55	26,28	20,92	21,73
N, %				
1 год (2019)	0,44 \pm 0,05	0,53 \pm 0,03	0,51 \pm 0,06	0,52 \pm 0,06
2 год (2020)	0,42 \pm 0,07	0,45 \pm 0,06	0,40 \pm 0,04	0,44 \pm 0,05
3 год (2021)	0,41 \pm 0,04	0,54 \pm 0,04	0,46 \pm 0,04	0,57 \pm 0,08
Общие потери N**	58,94	43,30	46,21	35,80
C/N*				
1 год (2019)	93	75	82	78
2 год (2020)	118	96	126	104
3 год (2021)	115	85	96	80
Cd, мг/кг				
1 год (2019)	0,1100 \pm 0,0427	0,0786 \pm 0,0306	0,1160 \pm 0,0460	0,0621 \pm 0,0242
2 год (2020)	0,0740 \pm 0,0289	0,0588 \pm 0,0229	0,0451 \pm 0,0176	0,1251 \pm 0,0487
3 год (2021)	0,0649 \pm 0,0253	0,0776 \pm 0,0303	0,0221 \pm 0,0086	0,0566 \pm 0,0221
Общие потери Cd**	-60	-50	-84	-61
Pb, мг/кг				
1 год (2019)	5,03 \pm 1,96	4,91 \pm 1,91	9,94 \pm 3,91	3,08 \pm 1,20

I	II	III	IV	V
2 год (2020)	4,95±1,93	4,29±1,67	2,11±0,82	4,42±1,72
3 год (2021)	7,80±3,25	4,99±1,94	5,66±2,21	11,13±4,77
Общие потери Pb**	-26	-62	-53	-10
Cu, мг/кг				
1 год (2019)	2,18±0,85	3,25±1,27	4,14±1,61	2,73±1,06
2 год (2020)	2,86±1,11	3,16±1,23	1,88±0,74	1,90±0,74
3 год (2021)	2,76±1,08	1,43±0,54	1,90±0,74	1,69±0,66
Общие потери Cu**	-49	-72	-59	-65
Zn, мг/кг				
1 год (2019)	22,6±8,8	34,4±13,4	31,3±12,2	27,3±10,6
2 год (2020)	13,2±5,1	19,1±7,4	18,3±7,1	20,4±7,9
3 год (2021)	15,8±6,2	20,2±7,9	25,7±10,0	19,6±7,6
Общие потери Zn**	-68	-67	-53	-65

Примечание.

*Отношение C/N рассчитано на основе их массовой доли. **Общие потери за 3 года, % от исходного.

За первый год разложения содержание всех ТМ имело тенденцию к уменьшению на всех участках, за исключением участка Iksa1, на котором в первый год эксперимента выявлено увеличение содержания кадмия, свинца и меди (рис. 4).

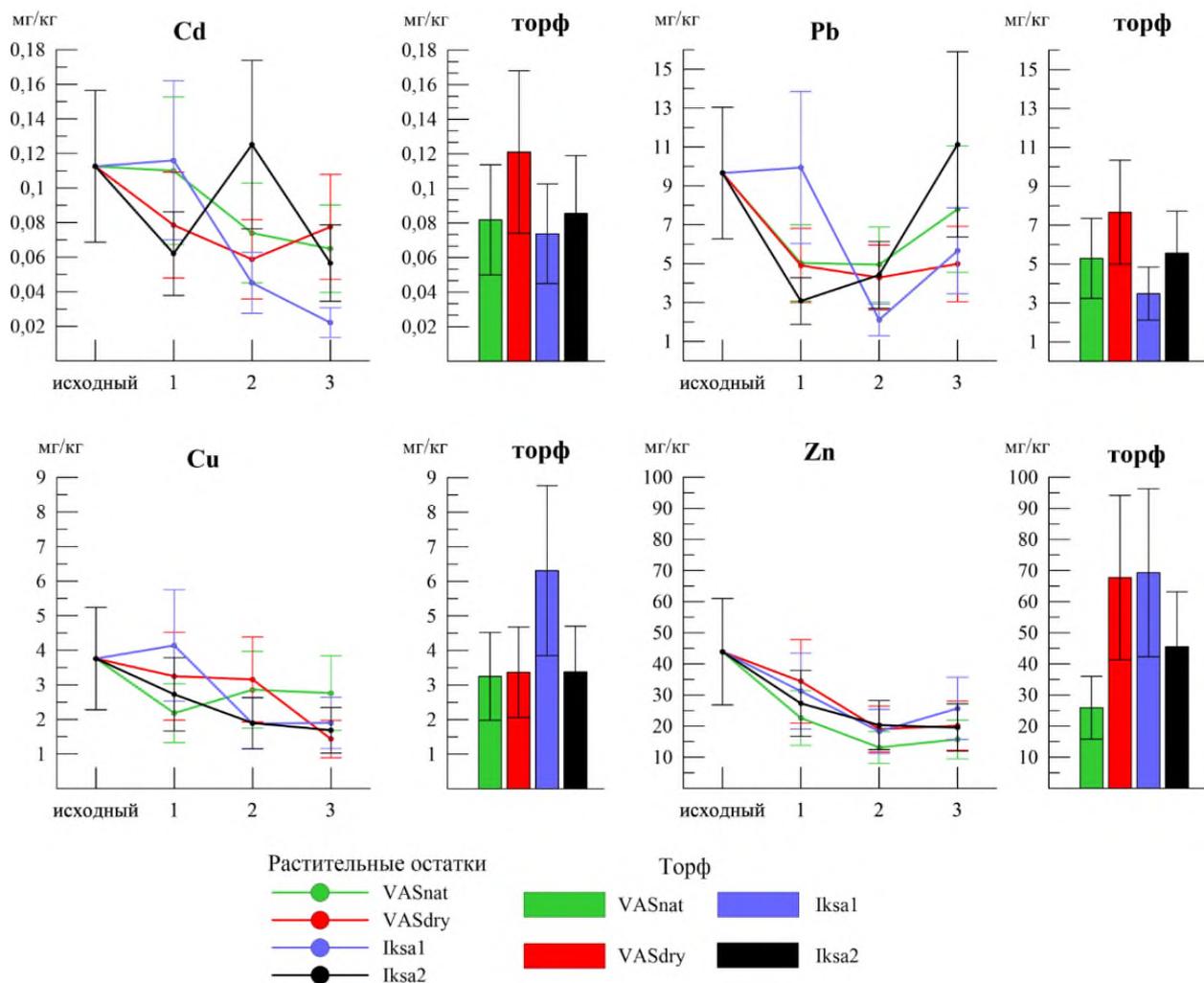


Рисунок 4. Содержание тяжёлых металлов в растительных остатках *Sph. fuscum* (справа) и торфе на глубине 0–10 см (слева).

На второй год разложения также сохранялась общая тенденция к уменьшению содержания ТМ, кроме кадмия и свинца на участке Iksa2, а также меди на участке VASnat, где отмечено увеличение их содержания. В течение 3-го года содержание цинка на участках VASdry и Iksa2 практически не изменялось, а на участках VASnat и Iksa1 происходило незначительное его увеличение. Выявлено снижение содержания кадмия на всех участках за исключением VASdry. Содержание свинца в течение третьего года эксперимента увеличивалось на всех участках. Содержание меди не изменялось на участках Iksa1 и VASnat и снижалось на участках VASdry и Iksa2.

В целом за три года эксперимента содержание всех рассмотренных ТМ на всех участках уменьшилось. Содержание свинца снижалось в 1,9 и 1,7 раза на участках VASdry и Iksa1 и увеличивалось в 1,2 раза на участке Iksa2 (см. рис. 4). Несмотря на равенство исходных значений по содержанию ТМ, в конце эксперимента содержание цинка на естественном участке (VASnat) было в среднем в 1,4 раза ниже, а меди в 1,7 раза выше, чем на участках VASdry, Iksa1, Iksa2 (см. табл. 3). За три года исследования содержание кадмия снизилось в 1,5–5,0 раз в зависимости от места расположения образцов, при этом максимальное снижение выявлено на точке Iksa1.

Влияние свойств почвы на высвобождение/аккумуляцию тяжёлых металлов. К концу эксперимента (на третий год разложения) отмечено высвобождение всех элементов из растительных остатков (рис. 5).

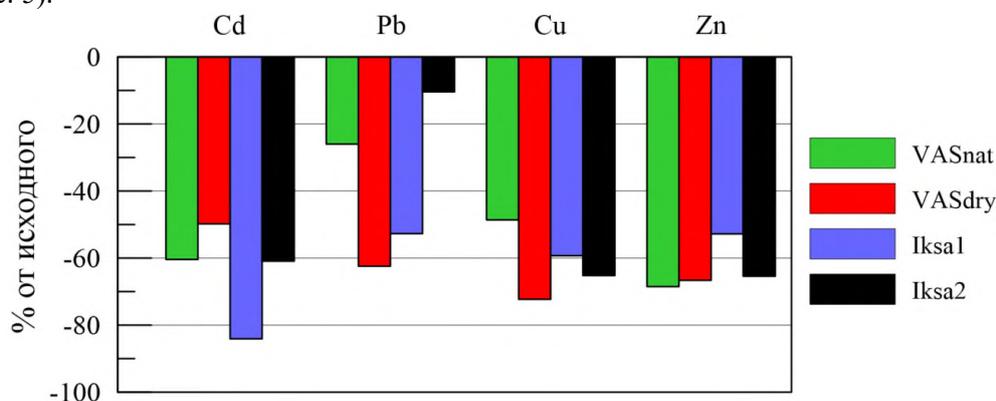


Рисунок 5. Суммарное (за три года) высвобождение/аккумуляция тяжёлых металлов в процессе разложения растительных остатков *Sph. fuscum*.

Максимальное высвобождение кадмия выявлено на постпирогенном участке Iksa1, минимальное – на осушенном участке VASdry. Для свинца (в сравнении с другими элементами) отмечены минимальные потери на всех пунктах за исключением VASdry, а на постпирогенном участке Iksa2 обнаружено самое минимальное высвобождение свинца (-10,5%). Для осушенного участка (VASdry) также характерно максимальное высвобождение меди. Для естественного участка (VASnat) выявлено минимальное высвобождение меди. Потери цинка из фитомассы на всех участках были примерно на одном уровне, за исключением участка Iksa1, где получены минимальные потери. В целом, на осушенном участке (VASdry) высвобождение свинца, меди и цинка больше, чем на постпирогенных участках, а высвобождение кадмия меньше. В то время как на естественном участке (VASnat) высвобождение кадмия больше, чем на осушенном. Данные нашего эксперимента не соответствуют полученным ранее результатам для лесных экосистем, где было выявлено увеличение содержания ТМ со временем разложения (Laskowski, Berg 1993; Tyler 2005; Brun et al. 2008; Gautam et al., 2019; Kondratova, Bryanin, 2021). Следует отметить, что исследований по динамике содержания ТМ при разложении сфагновых мхов нет, в литературе есть сведения только о содержании ТМ в различных видах сфагновых мхов (Шевченко и др., 2011; Гапеева и др., 2015; Shoty et al., 2014).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для растений не существует утверждённого ПДК тяжёлых металлов. За норму содержания ТМ принято считать пределы их концентраций, которые способствуют нормальной регуляции функций у растений (Прохорова, Матвеев, 1996). Указанные разными авторами пределы нормальных концентраций элементов не совпадают, что связано с рядом причин: специфичностью вида растения к аккумуляции металла, погрешностями пробоотбора, аналитических методик и пр.

Проанализировав опубликованные литературные данные по содержанию ТМ в некоторых видах болотных растений Западной Сибири, для *Sph. fuscum* можно встретить следующие значения (не более, мг/кг): Pb – 8,5; Cd – 8,5; Cu – 4; Zn – 45 (Бахнов, 1986; Цыбукова и др., 2000; Московченко и др., 2002; Московченко, 2006). Однако в работе Л.П. Гашковой (2016) для *Sph. fuscum*, отобранного с болот Томской области (в том числе с Бакчарского и Иксинского), значения по содержанию ТМ несколько ниже (мг/кг): Pb – 1,86; Cd – 0,015; Cu – 0,78; Zn – 44,24.

В нашем исследовании средние значения по содержанию тяжелых металлов в *Sph. fuscum* располагаются в следующем порядке: Zn > Pb > Cu > Cd (см. рис. 4, табл. 3). Содержание меди варьирует от 0,01 до 0,17 мг/кг при среднем значении $0,0772 \pm 0,0307$ мг/кг; меди – от 0,90 до 5,75 мг/кг при среднем значении $2,59 \pm 0,84$ мг/кг; свинца – от 1,29 до 15,9 мг/кг со средним значением $6,00 \pm 2,80$ мг/кг; цинка – от 8,1 до 61,0 мг/кг при среднем значении $24,0 \pm 8,5$ мг/кг.

Так как образцы растительных остатков закапывали в торфяную залежь на глубину 10 см, сравним содержание ТМ в образцах растительных остатков и торфа с глубины 0–10 см. Содержание ТМ в образцах торфа на глубине 0–10 см из каждой точки исследования различно (см. табл. 2, рис. 4). Содержание кадмия и свинца имеет максимальные значения на участке VASdry и минимальные на участке Iksa1. Высокое содержание меди (относительно других участков) получено на участке Iksa1. Участки VASdry и Iksa1 характеризуются максимальным содержанием цинка. Содержание кадмия в исходных образцах сфагнового мха выше по сравнению с концентрацией в торфе на всех участках за исключением VASdry. Содержание свинца в торфе на всех участках ниже, чем в исходных образцах сфагнового мха. Содержание меди в исходных образцах сфагнового мха незначительно выше по сравнению с таковым в торфе на всех участках за исключением Iksa1. Для цинка характерны более высокое содержание в торфе по сравнению с *Sph. fuscum* на всех участках, за исключением VASnat.

Динамика высвобождения/аккумуляции тяжёлых металлов в процессе разложения растительных остатков *Sph. fuscum*. Если рассматривать не содержание ТМ в растительных остатках, а динамику (высвобождение/накопление), то получается следующая закономерность: в течение 1-го года на всех участках для всех элементов наблюдалось высвобождение ТМ, причём минимальные значения высвобождения фиксируются на участке Iksa1; для всех элементов, кроме цинка, связь с потерей массы сохраняет ту же закономерность, что и содержание (рис. 6 а).

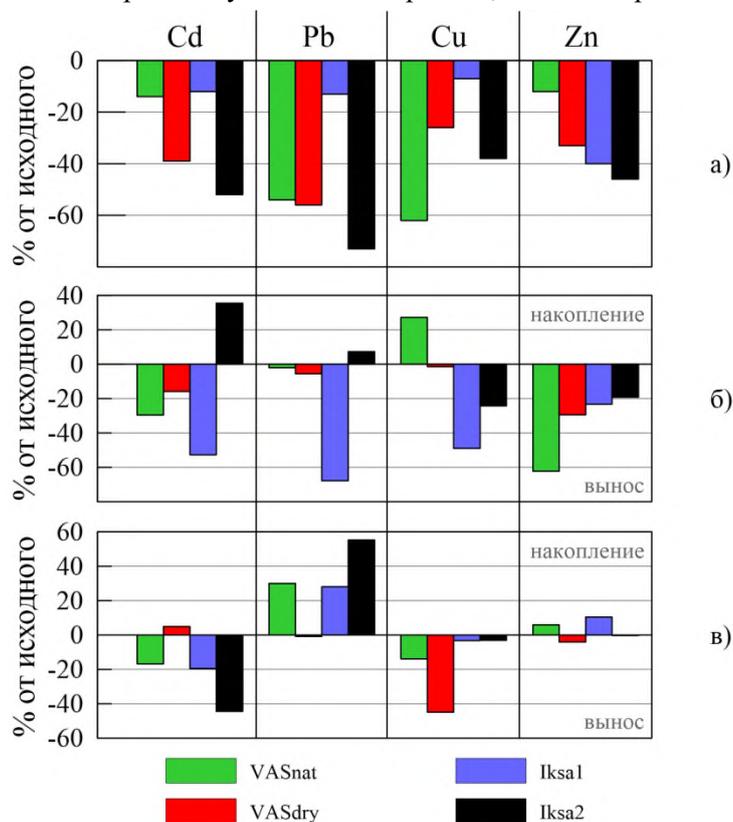


Рисунок 6. Вклад каждого года исследования (а – 1-ый год (2019 г.), б – 2-ой год (2020 г.), в – 3-ий год (2021 г.) в общее высвобождение/накопление тяжёлых металлов в процессе разложения растительных остатков *Sph. fuscum*.

В следующий период (2-ой год) наблюдалось накопление кадмия и свинца на участке Iksa2 и меди на VASnat. Для остальных участков и элементов наблюдалось, по-прежнему, высвобождение. Однако следует отметить следующую закономерность: невысокие значения высвобождения элементов получены для тех участков и элементов, где в 1-ый год высвобождение было высоким, и, наоборот, там, где высвобождение в течение 1-го года было невелико, во второй год высвобождение элементов усилилось (рис. 6 б). В течение 3-го года отмечено накопление свинца и цинка на участках VASnat и Iksa1, также получено накопление свинца на участке Iksa2 и накопление кадмия на участке VASdry. Причём накопление свинца достигает значительных величин – от 28 до 55% (рис. 6).

Интересно поведение свинца на участках VASnat, Iksa1 и Iksa2, где происходит значительное накопление этого элемента. Возможно, это связано с высоким содержанием свинца в нижележащих горизонтах торфяной залежи. Например, для участка Iksa2 содержание свинца на глубине 20–30 см составило 25 мг/кг). Также наблюдалось накопление меди на участке VASnat, возможно, за счёт более высокого содержания меди в верхних горизонтах. Предыдущие исследования в основном объясняли накопление ТМ поступлением из внешних источников (Brun et al., 2008), включая загрязнение воздуха (Rühling et al., 1973; Laskowski et al., 1995). Исследованная территория в настоящее время мало подвержена влиянию антропогенных факторов. Однако следует учитывать, что все участки испытывали антропогенную нагрузку в виде осушения, за исключением участка VASnat. Кроме того, участки расположены на небольшом удалении от автомобильной дороги, а участки Iksa1 и Iksa2 являются постпирогенными. Поэтому можно предположить, что повышенное содержание ТМ в торфах обусловлено не только природными причинами.

Был проведён корреляционный анализ, который выявил стадийно-зависимую корреляцию между содержанием ТМ и потерей массы. Таким образом, на начальном этапе (1-ый год), когда потеря массы происходит более быстро, наблюдалась положительная зависимость между потерей массы и содержанием ТМ для свинца, меди и цинка; для кадмия зависимость не выявлена. В течение 2-го года для всех элементов выявлена связь между потерей массы и содержанием ТМ, причём для кадмия и свинца эта связь положительная, а для меди и цинка – отрицательная. К концу эксперимента (3-ий год), зависимость между потерей массы и содержанием ТМ остаётся отрицательной для цинка; появилась положительная зависимость для кадмия и меди, для свинца зависимость стала отрицательной (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона между потерей массы и содержанием тяжёлых металлов в растительных остатках *Sph. fuscum*

Временной интервал	Cd	Pb	Cu	Zn
2019 г.	–	0,56	0,89	0,63
2020 г.	0,87	0,56	-0,48	-0,36
2021 г.	0,60	-0,38	0,58	-0,68

Примечание.

Прочерк – корреляция незначима, при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Влияние свойств почвы на динамику содержания тяжёлых металлов в растительных остатках *Sph. fuscum*. Содержание элемента является нестационарной характеристикой, отражающей только данное событие отбора проб во всем процессе разложения. Напротив, накопление или высвобождение элемента во время разложения может дать общее представление о поведении элемента и его возможных последствиях для экосистемы. В нашем эксперименте содержание всех рассмотренных ТМ в растительных остатках *Sph. fuscum* к концу периода исследования уменьшалась – происходил высвобождение всех элементов (см. рис. 5). Процессы высвобождения были однонаправленными на всех участках исследования, выявить разницу между высвобождением ТМ для постпирогенных и не горевших участков не удалось.

Установлено, что через 20 лет после пожара содержание ТМ, кроме цинка, имеют значения близкие к естественной точке – VASnat (см. табл. 2). Однако отмечено повышенное содержание кадмия и свинца на участке VASdry и меди на участке Iksa1, что в целом соответствует данным, полученным для бореальных лесных экосистем (Сосорова и др., 2013; Kong et al., 2018). Тем не менее, некоторые свойства торфяных почв на осушенных и постпирогенных участках отличаются

от участка VASnat. Так, зольность и содержание общего азота в два и более раза выше на участке VASdry и постпирогенных участках по сравнению с участком VASnat.

Свойства почвы, а также гидротермические условия могут влиять на процессы трансформации растительных остатков и динамику содержания ТМ. Результаты корреляционного анализа между высвобождением ТМ, свойствами торфа и гидротермическими условиями показали, что чем ниже уровень болотных вод, тем меньше высвобождение кадмия и больше высвобождение цинка (табл. 5). На высвобождение свинца и меди уровень болотных вод достоверно не влияет. Слабая зависимость от температуры выявлена для свинца и цинка, более сильная для кадмия и меди, причём для кадмия – положительная, а для меди – отрицательная. Также выявлена тесная связь между содержанием общего углерода в торфе и высвобождением кадмия, свинца и цинка. Содержание общего азота в торфе не оказывает достоверного влияния на высвобождение кадмия и цинка, тесная связь выявлена между содержанием азота, отношением C/N и высвобождением меди (коэффициент корреляции -0,96 и -0,93 соответственно). Зольность торфа значимо влияет на высвобождение меди и цинка (см. табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции Пирсона между свойствами торфяной почвы, гидротермическими условиями и высвобождением тяжёлых металлов из растительных остатков *Sph. fuscum*

Элемент	Свойства торфа				Т торфа	УБВ
	Общий С	Общий N	C/N	Зольность		
Cd	-0,64	–	–	-0,31	0,54	-0,87
Pb	-0,79	-0,36	–	–	0,32	0,35
Cu	–	-0,96	0,93	-0,73	-0,74	0,28
Zn	0,87	–	–	0,58	-0,38	0,73

Примечание.

Прочерк – корреляция незначима, при уровне значимости $p \leq 0,05$. Т торфа – температура торфа на глубине 10 см. УБВ – уровень болотных вод.

Наши результаты показывают, что последствия торфяных пожаров даже по прошествии 20 лет прослеживаются в повышенной зольности верхних горизонтов торфяной залежи; также для постпирогенных участков характерно более высокое содержание цинка, в два раза превышающее таковое на участке VASnat. Отсутствие существенных различий в убыли массы и динамике содержания ТМ между выгоревшими и негоревшими участками на ранних стадиях разложения может свидетельствовать о том, что изменённые пожаром абиотические и биотические условия не играют решающей роли как в разложении, так и в динамике содержания ТМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования динамики тяжёлых металлов при разложении *Sph. fuscum* в болотных экосистемах, пострадавших от пожара, имеют важное значение для понимания процессов восстановления постпирогенных экосистем. Трёхлетний эксперимент по разложению *Sph. fuscum* в четырёх экосистемах (естественной – участок VASnat, осушенной – участок VASdry, постпирогенных – участки Iksa 1 и Iksa2) показал, что влияние пожара сказывается на скорости разложения – в среднем потери массы на постпирогенных болотах ниже в 1,4–1,6 раза по сравнению с естественным участком. Практически для всех участков выявлена связь между потерей массы и содержанием тяжёлых металлов, за исключением кадмия в течение первого года эксперимента. Содержание всех рассмотренных элементов в растительных остатках сфагновых мхов снижалось в процессе разложения на всех исследуемых участках. Во время разложения мха зафиксирована схожесть высвобождения биогенных элементов меди и цинка на осушенном и постпирогенных участках (VASdry, Iksa1, Iksa2), в то время как для кадмия и свинца, не относящихся к биогенным элементам, подобной схожести высвобождения не зафиксировано.

В результате исследований годовой динамики содержания тяжёлых металлов в растительных остатках выявлена стадийная динамика: на самом начальном этапе происходит высвобождение ТМ, во второй и третий годы в отдельных случаях отмечается их накопление, однако к концу эксперимента для всех элементов наблюдался высвобождение тяжёлых металлов при разложении сфагнового оёса.

Несмотря на выявленные различия в скорости процесса разложения *Sph. fuscum* в естественных и постпирогенных условиях, существенных различий в высвобождение элементов при разложении сфагнового оёса на естественных и нарушенных участках в целом не выявлено. Возможно, это связано с гидрологическим режимом болотных экосистем. Кроме того, за прошедшие 20 лет, за счёт колебания уровня болотных вод, могло произойти вымывание ТМ из торфяной почвы. Так как содержание ТМ в исходных образцах *Sph. fuscum* целом выше, чем в торфяной почве, то при разложении растительных остатков более вероятен процесс вымывания ТМ, чем накопления. Установлено, что на высвобождение ТМ при разложении растительных остатков достоверное влияние оказывает гидротермический режим (уровень болотных вод и температура торфа), а также содержание общего углерода и зольность торфа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят к.ф.-м.н. Е.А. Дюкарева (ИМКЭС СО РАН) за предоставленные данные о температуре торфяной залежи и уровне болотных вод. Авторы выражают благодарность коллективу центра коллективного пользования Томского научного центра Сибирского отделения РАН за предоставление изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00363.

ЛИТЕРАТУРА

- Базанов В.А., Егоров Б.А., Льготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / М.В. Кабанова (отв. ред.). Томск: Институт атмосферной оптики СО РАН, 2002. С. 190–196.
- Бамбалов Н.Н., Хоружик А.В., Лукошко Е.С., Стригутский В.П. Превращение отмерших растений в болотных биогеоценозах // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. Москва: Наука, 1990. С. 53–63.
- Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1986. 192 с.
- Безель В.С., Жуйкова Т.В., Гордеева В.А., Мелинг Э.В., Трубянов А.Б., Глотов Н.В. Надземная фитомасса и скорость деструкции растительных остатков в травянистых сообществах при загрязнении почвы тяжелыми металлами // Экология. 2016. № 47. С. 343–348. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059716040089>.
- Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Ленинград: Наука, 1979. 188 с.
- Веретенникова Е.Э., Головацкая Е.А. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 20 (2). С. 181–187.
- Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Динамика разложения растений на болотах Васюганья // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7 (122). С. 88–93.
- Вомперский С.Е. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценозические особенности болот и их рациональное использование. Москва: Наука, 1994. С. 5–37.
- Воробейчик Е.Л. Изменения пространственной структуры процесса разложения при атмосферном загрязнении лесных экосистем // Биологический вестник. 2002. № 2. С. 368–379.
- Гапеева М.В., Филиппов Д.А., Ложкина Р.А. Тяжёлые металлы, в том числе редкоземельные во мхах Северо-Западного и Центрального регионов России // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. С. 633–633.
- Гашкова Л.П. Особенности накопления тяжелых металлов болотными растениями юго-востока Западной Сибири // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2016. № 4 (53). С. 146–159.
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 3 (23). С. 137–151.
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17030030>.

- Горюнова Т.А., Пузанов А.В., Мальгин М.А. Тяжелые металлы в почвах бассейна реки Алей (Алтайский край) // География и природные ресурсы. 2001. № 3. С. 70–75.
- ГОСТ 11306–83 Торф. Методы определения зольности. Москва: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
- Денисенков В.П. Основы болотоведения. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2000, 224 с.
- Жуйкова Т.В., Безель В.С., Жуйкова В.А., Чанкина О.В., Куценогий К.П. Химические элементы в процессе минерализации растительных остатков при загрязнении почвы тяжелыми металлами // Сибирский экологический журнал. 2013. № 2. С. 266–277.
- Казнина Н.М., Титов А.Ф. Влияние кадмия на физиологические процессы и продуктивность растений семейства Роасае // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133. № 6. С. 588–603.
- Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. Москва: Наука, 2008. 344 с.
- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука ЛО, 1978. 172 с.
- Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 166–167.
- Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. Москва: Техносфера, 2013. 632 с.
- Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Компоненты углеродного баланса на болотах средней тайги и лесотундры Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Томск: Изд-во НТЛ 2007. С. 117–118.
- Михайлова А.В., Подколзин И.В., Ахметева Н.П., Саввин С.Б. Редкие и тяжелые металлы в торфяниках верховых и низинных болот // IX научная конференция «Аналитика Сибири и Дальнего Востока», сборник материалов [Электронный ресурс]. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. URL: http://conf.sfu-kras.ru/conf/asfe12/report?memb_id=4237 (дата обращения 30.11.2023).
- Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
- Московченко Д.В., Валеева Е.И., Лаврентьев С.Ю. Геохимический мониторинг на территории природного парка «Нумто» // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2002. № 3. С. 3–10.
- Методические указания 31–04/04: Методика выполнения измерений массовой концентрации цинка, кадмия, свинца и меди в пищевых продуктах, продовольственном сырье, кормах и продуктах их переработки методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА. Томск: ТПУ, 2004. 25 с.
- Методические указания 31–11/05: Количественный химический анализ проб почв, тепличных почв, илов, донных отложений, сапропелей, твердых отходов. Методика выполнения измерения массовых концентраций цинка, кадмия, свинца, меди, магния, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА. ПНД Ф 16.1:2:2:2:3.48–06. Томск: Томаналит, 2006. 44 с.
- Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1092–1103. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065>.
- Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Томск: ТГУ, 2009. 23 с.
- Помазкина Л.В. Интегральная оценка влияния техногенного загрязнения и климатических факторов на агроэкосистемы Байкальской природной территории // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 2. С. 194–203.
- Прохорова Н.В., Матвеев Н.М. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза // Вестник Самарского государственного университета. 1996. № 3. С. 125–144.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Г.А. Заварзин (отв. ред.) Москва: Наука, 2007. 315 с.
- Санитарные правила и нормы 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека и факторов среды обитания. Москва, 2021.

- Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Пирогенное изменение содержания микроэлементов в почвах и растениях сосновых лесов Западного Забайкалья // *Сибирский экологический журнал*. 2013. № 5. С. 661–674.
- Татаринцева В.Г., Котова Е.И., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 6. С. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37842>.
- Федорова Е.В., Одинцева Г.Я. Накопление металлов растительностью в малых водосборных бассейнах, подверженных аэротехногенному загрязнению // *Российский журнал экологии*. 2005. № 1. С. 21–26.
- Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Интегральная оценка пирогенных нагрузок по содержанию Cu, Pb, Zn и Cd в компонентах Васюганского болота (Западная Сибирь) // *Геосферные исследования*. 2019. № 4. С. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.17223/25421379/13/6>.
- Цыбукова Т.Н., Инишева Л.И., Тихонова О.К., Зейле Л.А., Юсубова М.С. Характеристика элементного состава торфяного сырья олиготрофных болот // *Химия растительного сырья*. 2000. № 4. С. 29–34.
- Шевченко В.П., Филиппов Д.А., Гордеев В.В., Демина Л.Л. Содержание тяжелых металлов в сфагновых мхах Вологодской области // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 14. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4714> (дата обращения 02.11.2023).
- Abollino O., Giacomino A., Malandrino M. Voltammetry. Stripping Voltammetry / *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* / P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, M. Miró (eds.). Academic Press. 2019. Vol. 10. P. 238–257. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14491-9>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // *Ecosystems*. 2008. Vol. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 78. P. 222–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>.
- Berg B., Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scots pine forest. VII // *Canadian Journal of Botany*. 1991. Vol. 69. No. 7. P. 1449–1456. DOI: <https://doi.org/10.1139/b91-187>.
- Brun C.B., Åström M.E., Peltola P., Johansson M–B. Trends in major and trace elements in decomposing needle litters during a long-term experiment in Swedish forests // *Plant and Soil*. 2008. Vol. 306. P. 199–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9572-x>.
- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry // *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. Vol. 39. No. 1. P. 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>.
- Bragazza L., Buttler A., Siegenthaler A., Mitchell E.A. Plant Litter Decomposition and Nutrient Release in Peatlands // *Carbon Cycling in Northern Peatlands* / A.J. Baird, L.R. Belyea, X. Comas, A.S. Reeve, L.D. Slater (editors). Published by the American Geophysical Union as part of the Geophysical Monograph Series, 2009. Vol. 184. P. 99–100. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM184>.
- Chew I., Obbard J.P., Stanforth R.R. Microbial cellulose decomposition in soils from a rifle range contaminated with heavy metals // *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 111. No. 3. P. 367–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00094-4).
- Coggins A.M., Jennings S.G., Ebinghaus R. Accumulation rates of the heavy metals lead, mercury and cadmium in ombrotrophic peatlands in the west of Ireland // *Atmospheric environment*. 2006. Vol. 40. No. 2. P. 260–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.049>.
- De Santo A.V., Fierro A., Berg B., Rutigliano F.A., De Marcoet A. Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests // *Developments in Soil Science*. 2002. Vol. 28. Part A. P. 63–78. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(02\)80044-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7).
- Gautam M.K., Lee K.S., Berg B., Song B.-Y., Yeon J.-Y. Trends of major, minor and rare earth elements in decomposing litter in a cool temperate ecosystem, South Korea // *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. P. 214–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.114>.
- Gifford R.M., Howden M. Vegetation thickening in an ecological perspective: significance to national greenhouse gas inventories // *Environmental Science & Policy*. 2001. Vol. 4. No. 2–3. P. 59–72. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00109-X).

- Goix S., Leveque T., Xiong T.T., Schreck E., Baeza-Squiban A., Geret F., Uzu G., Austruy A., Dumat C. Environmental and health impacts of fine and ultrafine metallic particles: assessment of threat scores // *Environmental Research*. 2014. Vol. 133. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.015>.
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Simonova G.V., Kalashnikova D.A. Variability of the Carbon Isotope Composition of Peat-Forming Plants during the Biochemical Transformation // *Water*. 2022. Vol. 14. No. 24. P. 4035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244035>.
- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological applications*. 1991. Vol. 1. No. 2. P. 182–195. DOI: <https://doi.org/10.2307/1941811>.
- Harguinteguy C.A., Noelia Cofré M.N., Fernández-Cirelli A., Luisa Pignata M.L. The macrophytes *Potamogeton pusillus* L. and *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. as potential bioindicators of a river contaminated by heavy metals // *Microchemical Journal*. 2016. Vol. 124. P. 228–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.014>.
- Hattori H. Influence of heavy metals on soil microbial activities // *Soil Science and Plant Nutrition*. 1992. Vol. 38. P. 93–100. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.1992.10416956>.
- Jonczak J. Dynamics, structure and properties of plant litterfall in a 120-year old beech stand in Middle Pomerania between 2007–2010 // *Soil Science Annual*. 2013. Vol. 64. No. 1. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0002>.
- Kondratova A.V., Bryanin S.V. Dynamics of heavy metals during litter decomposition in fire e-affected boreal forests // *Journal of Soils and Sediments*. 2021. Vol. 21. P. 3682–3691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03027-5>.
- Kong J., Yang J., Bai E. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest // *Science of the total environment*. 2018. Vol. 642. P. 1353–1361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.154>.
- Laskowski R., Berg B. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1993. Vol. 8. No. 1–4. P. 446–456. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589309382791>.
- Laskowski R., Maryański M., Niklińska M. Effect of heavy metals and mineral nutrients on forest litter respiration rate // *Environmental Pollution*. 1994. Vol. 84. No. 1. P. 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90076-0).
- Laskowski R., Niklinska M., Maryanski M. The dynamics of chemical elements in forest litter // *Ecology*. 1995. Vol. 76. No. 5. P. 1393–1406. DOI: <https://doi.org/10.2307/1938143>.
- Leadley P., Pereira H.M., Alkemade R., Fernandez-Manjarrés J.F., Proença V., Scharlemann J.P.W., Walpole M.J. Biodiversity Scenarios: Projections of 21st century change in biodiversity and associated ecosystem services. Secretariat of the Convention on Biological Diversity: Montreal, Canada. 2010, 132 p.
- Leroy F., Gogo S., Buttler A., Bragazza L., Laggoun-Défarge F. Litter decomposition in peatlands is promoted by mixed plants // *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. P.739–749. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1820-3>.
- Leveque T., Capowiez Y., Schreck E., et al. Earthworm bioturbation influences the phytoavailability of metals released by particles in cultivated soils // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 191. P. 199–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.005>.
- Niazi N.K., Bishop T.F.A., Singh B. Evaluation of spatial variability of soil arsenic adjacent to a disused cattle-dip site, using model-based geostatistics // *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. No. 24. P. 10463–10470. DOI: <https://doi.org/10.1021/es201726c>.
- Parish F., Sirin A.A., Charman D., Joosten H., Minaeva T.Y., Silvius M. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Kuala Lumpur, Wageningen: Wetlands International, 2008. 179 p.
- Peltoniemi K., Strakova P., Fritze H., Iraizoz P.A., Pennanen T., Laiho R. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands // *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 51. P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.013>.
- Richardson J., Friedland A., Kaste J., Jackson B. Forest floor lead changes from 1980 to 2011 and subsequent accumulation in the mineral soil across the northeastern United States // *Journal of Environmental Quality*. 2014. Vol. 43. No. 3. P. 926–935. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0435>.
- Rühling Å., Tyler G., Rühling A. Heavy metal pollution and decomposition of spruce needle litter // *Oikos*. 1973. Vol. 24. No. 3. P. 402–416. DOI: <https://doi.org/10.2307/3543816>.

Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 325. P. 36–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>.

Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: *Advances in Environmental Research*. Nova Science Publishers, 2010. Vol. 4. P. 99–119.

Shotyk W., Belland R., Duke J., Kempter H., Krachler M., Noernberg T., Pelletier R., Vile M.A., Wieder K., Zaccone C., Zhang S. Sphagnum mosses from 21 ombrotrophic bogs in the Athabasca bituminous sands region show no significant atmospheric contamination of “heavy metals” // *Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 48. No. 21. P. 12603–12611. DOI: <https://doi.org/10.1021/es503751v>.

Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage // *Applied Geochemistry*. 2014. Vol. 53. P. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>.

Su Y., Liang Y. Foliar uptake and translocation of formaldehyde with Bracket plants (*Chlorophytum comosum*) // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 291. P. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.001>.

Sun Y., Zhou Q., Xie X., Liu R. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174. No. 1–3. P. 455–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.074>

Sun Zh., Mou X., Sun W. Decomposition and heavy metal variations of the typical halophyte litters in coastal marshes of the Yellow River estuary, China // *Chemosphere*. 2016. Vol. 147. P. 163–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.079>.

Tyler G. Changes in the concentrations of major, minor and rare-earth elements during leaf senescence and decomposition in a *Fagus sylvatica* forest // *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 206. No. 1–3. P. 167–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.065>.

Uzu G., Sauvain J.-J., Baeza-Squiban A., Riediker M., Sánchez Sandoval Hohl M., Val S., Tack K., Denys S., Pradère P., Dumat C. In vitro assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead-rich particles from a lead recycling plant // *Environmental science and technology*. 2011. Vol. 45. No. 18. P. 7888–7895. DOI: <https://doi.org/10.1021/es200374c>.

Verhoeven J.T.A., Arts H.H.M. *Carex* litter decomposition and nutrient release in mires with different water chemistry // *Aquatic Botany*. 1992. Vol. 43. No. 4. P. 365–377. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(92\)90048-N](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90048-N).

Weis J.S., Weis P. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration // *Environment International*. 2004. Vol. 30. No. 5. P. 685–700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.002>.

Поступила в редакцию 01.12.2023

Принята 11.12.2023

Опубликована 12.12.2023

Сведения об авторах:

Головацкая Евгения Александровна – доктор биологических наук, профессор РАН, директор, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); golovatskayaea@gmail.com

Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); lili12358@mail.ru

Калашникова Дарья Андреевна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); terrezaprk@mail.ru

Симонова Галина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биоинформационных технологий, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); galina_simonova@inbox.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/)

DYNAMICS OF THE HEAVY METALS (Zn, Cd, Pb, Cu) CONTENT DURING THE DECOMPOSITION OF SPHAGNUM MOSS AT THE DRAINED AND POST-PYROGENIC SITES OF OLIGOTROPHIC BOGS

© 2023 E. A. Golovatskaya , L. G. Nikonova , D. A. Kalashnikova , G. V. Simonova 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

The aim of the study. Assessment of heavy metals (Zn, Cd, Pb, Cu) dynamic during the decomposition of *Sphagnum fuscum* L. in native, drained and post-pyrogenic oligotrophic peatlands.

Location and time of the study. The study was carried out in 2019–2021 in two oligotrophic bogs: “Bakcharskoye” (field station “Vasyuganye” (IMCES SB RAS)) and “Iksinskoye”, which are the north-eastern spurs of the Great Vasyugan mire and located in the Bakcharsky district of the Tomsk region.

Methods. Decomposition rate of *Sph. fuscum* L. was determined by the method of partially isolated samples, which is widely used to study the processes of transformation of plant material and peat. In the original and decomposed samples of sphagnum moss and peat soil (in layers 0–10, 10–20, 20–30), the ash content of peat was determined according to GOST-11306-83. The percentage of total carbon and nitrogen in samples of peat (up to 30 cm from the surface) and plant residues was determined together with the determination of isotopic composition using EA-IRMS (Elemental Analyzer/Isotope Ratio Mass Spectrometry). The concentrations of heavy metals (Zn, Cd, Pb, Cu) in samples of peat and plant residues were determined by stripping voltammetry.

Results. Three-year experiment on decomposition of *Sph. fuscum* in four ecosystems (natural – VASnat, drained – VASdry, post-pyrogenic – Iksa 1 and Iksa2) showed that fire affected the decomposition rate: on average, mass loss in post-pyrogenic bogs was 1.4–1.6 times lower compared to the natural site. For almost all sites, a relationship was found between the mass loss and the concentration of heavy metals, with the exception of Cd during the first year of the experiment. The concentration of all elements in moss residues decreased during the decomposition process at all study sites. During moss decomposition the similarity in the release of biogenic elements Cu and Zn was recorded in the drained and post-pyrogenic sites (VASdry, Iksa1, Iksa2), while for Cd and Pb, which are not biogenic elements, such similarity was not revealed.

Conclusions. Peat fires affect plant residue decomposition by decreasing its rate of decomposition. The study revealed incremental dynamics of HMs content in plant residues: at the initial stage, HMs are released, whereas during the second and third years, in some cases, the accumulation of HMs is observed. However, by the end of the experiment, the release of heavy metals during decomposition was observed for all elements.

Key words: transformation of plant residues; heavy metals; biogeochemical cycle; pyrogenic peatlands; drained peatlands; West Siberia.

How to cite: Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Dynamics of the heavy metals content (Zn, Cd, Pb, Cu) during the decomposition of sphagnum moss at the drained and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e237. DOI: [10.31251/pos.v6i3.237](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.237). (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank E.A. Dyukarev (IMKES SB RAS, Russia) for providing data on the temperature of the peat deposits and the levels of bog waters. The authors are thankful to the Core Research Facilities of the Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS for providing the DELTA V Advantage isotope mass spectrometer.

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-27-00363).

REFERENCES

- Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. Modern spatian dynamics of the Great Vasugan Mire (the case of the Iksa-Shegarka interfluve). In book: *The Great Vasugan Mire. Current status and development processes*. M.V. Kabanov (ed.). Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAN, 2002. P. 190–196. (in Russian).
- Bambalov N.N., Horuzhik A.V., Lukoshko E.S., Strigutsky V.P. Transformation of dead plants in marsh biogeocenoses. In book: *Experiment and mathematical modeling in the study of biogeocenoses of forests and bog*. Moscow: Nauka Publ., 1990. P. 53–63. (in Russian).

- Bakhnov V.K. Biogeochemical aspects of the bog formation process. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1986. 192 p. (in Russian).
- Bezel' V.S., Zhuikova T.V., Gordeeva V.A., Meling E.V., Trubyanov A.B., Glotov N.V. Aboveground phytomass and rate of plant debris decomposition in herbaceous communities exposed to soil pollution with heavy metals. Russian journal of ecology. 2016. Vol. 47. No. 47. P. 343–348. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1067413616040081>.
- Boch M.S., Masing V.V. Wetland Ecosystems of the Soviet Union/ Leningrad: Nauka Publ., 1979. 188 p. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Golovatskaya E.A. Lead and Mercury Distribution in the Peat Deposits of West Siberia (Vasyuganye Peat Bogs). *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. No. 20 (2). P. 181–187. (in Russian).
- Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P. Decomposition Dynamics of Plants of Bogs (Data: Vasyugan Bog). Tomsk State Pedagogical University Bulletin. 2012. No. 7 (122). P. 88–93. (in Russian).
- Vomperskiy S.E. Role in the carbon cycle bogs. In book: Biogeocenotic features of bogs and their rational use. Moscow: Nauka Publ., 1994. P. 5–37. (in Russian).
- Vorobeichik E.L. Changes in the Spatial Structure of the Decomposition Process under Conditions of Atmospheric Pollution of Forest Ecosystems. *Biologicheskii vestnik*. 2002. No. 2. P. 368–379. (in Russian).
- Gapeeva M. V., Filippov D.A., Lozhkina R.A. Heavy metals, including rare earth in mosses of Northwest and Central regions Russia. *Modern problems of science and education*. 2015. No. 5. P. 633–633. (in Russian).
- Gashkova L.P. The peculiarities of heavy metal accumulation in wetland plants of the South-East of Western Siberia. *The Bulletin of Ryazan State University named for S.A. Yesenin*. 2016. No. 4 (53). P. 146–159. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Decomposition of plant residues in peat soils of oligotrophic peatlands. Tomsk State University Journal of Biology. 2013. No. 3 (23). P. 137–151. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Influence of the level of bog waters on the processes of transformation of sphagnum mosses in peat soil of oligotrophic bogs. *Eurasian Soil Science*. 2017. No. 5. P. 580–588. DOI: <https://doi.org/10.7868/80032180X17030030>.
- Goryunova T.A., Puzanov A.V., Malgin M.A. Heavy metals in soils of the Alei River (Altai region). *Geografia i prirodnye resursy*. 2001. No. 3. P. 70–75. (in Russian).
- GOST 11306-83 Peat. Methods for determining ash content. Moscow: Standards Publishing House, 1984. 6 p. (in Russian).
- Denisenkov V.P. Basics of swamp science. St. Petersburg: St. Petersburg University Publ., 2000, 224 p. (in Russian).
- Zhuykova T.V., Bezel V.S., Zhuykova V.A., Chankina O.V., Kutsenogiy K.P. Chemical Elements in the Mineralization of Plant Residues under Soil Pollution with Heavy Metals. *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 213–222.
- Kaznina N.M., Titov A.F. The influence of cadmium on physiological processes and productivity of Poaceae plants. *Uspekhi Sovremennoi Biologii*. 2013. Vol. 133. No. 5. P. No. 4. P. 588–603. (in Russian).
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G. Carbon Exchange in Cryogenic Ecosystems. Moscow: Nauka Publ., 2008. 344 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Piavchenko N.I. Dynamics of organic matter in the process of peat formation. Leningrad: Nauka LO Publ., 1978. 172 p. (in Russian).
- Kurakov S.A., Krutikov V.A., Ushakov V.G. Autonomous meter of the temperature profile of the AIPT. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2008. No. 5. P. 166–167. (in Russian).
- Lebedev A.T. Mass Spectrometry for the Analysis of the Environment. Moscow: Tekhnosfer Publ., 2013. 632 p. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Carbon balance components of wetlands in the middle taiga and the forest-tundra. In book: West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present. Tomsk: NTL Publ., 2007. P. 117–118. (in Russian).
- Mikhailova A.V., Podkolzin I.V., Akhmeteva N.P., Savvin S.B. Rare and heavy metals in the peatlands of upland and lowland bogs. In book: IX scientific conference "Analytics of Siberia and the Far East", collection of materials [Electronic resource]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011. URL: http://conf.sfu-kras.ru/conf/asfe12/report?memb_id=4237 (accessed on 30.11.2023). (in Russian).
- Moskovchenko D.V. Biogeochemical characteristics of peat bogs in Western Siberia. *Geografia i prirodnye resursy*. 2006. No. 1, P. 63–70. (in Russian).

Moskovchenko D.V., Valeeva E.I., Lavrent'ev S.Yu. Geochemical monitoring in the territory of the Numto Nature Park. *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*. 2002. No. 3. P. 3–10, (in Russian).

Methodological Recommendations 31–04/04: Numerical Chemical Analysis of Food Products, Food Stock, Provender and Products of Its Processing, Dietary Food Supplements, Biological Objects. The Way to Measure Mass Concentrations of Zink, Cadmium, Lead and Copper by Means of Inversion Volt-Ampere-Measuring with TA Type Analyzers. Tomsk: TPU Publ., 2004. 25 p. (in Russian).

Methodological Recommendations 31–11/05: Quantitative Chemical Analysis of Soil Samples, Hothouse Soils, Slits, Bottom Deposits, Sapropels, Solid Wastes. The Way to Measure Mass Concentrations of Zink, Cadmium, Lead, Copper, Magnesium, Arsenic, Mercuric by Means of Inversion Volt-Ampere-Measuring with TA Type Analyzers. PND F 16.1:2:2:3.48–06. Tomsk: Tomanalit, 2006. 44 p. (in Russian).

Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1101–1111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319090060>.

Parshina E.K. Destruction of plant matter in bog ecosystems of the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Tomsk: Tomsk State University, 2009. 23 p. (in Russian).

Pomazkina L.V. Integrated assessment of the impact of technogenic pollution and climatic factors on agrosystems in the Baikal Natural Area. *Uspekhi sovremennoi biologii*. 2011. Vol. 131. No. 2. P. 194–203. (in Russian).

Prochorova N.V., Matvejev N.M. Heavy metals in soils and plants during technogenic conditions. *Vestnik of Samara State University*. 1996. No. 3. P. 125–144. (in Russian).

Carbon Pools and Fluxes in Terrestrial Ecosystems of Russia / G.A. Zavarzin (ed.). Moscow: Nauka Publ., 2007. 315 p. (in Russian).

Sanitary Rules and Norms 1.2.3685–21. Hygienic Standards and Requirements for Ensuring Safety and (or) Harmlessness to Human Health of Environmental Factors. Moscow, 2021. (in Russian).

Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L. Pyrogenic changes in microelement content in soils and plants from the pine forests of western Transbaikal. *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. Vol. 6. No. 5. P. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425513050168>.

Tatarintseva V.G., Kotova E.I., Orlov A.S., Ponomareva T.I., Selyanina S.B., Daibova E.B. Metals and As in the peat of upland bogs of the Arkhangelsk region. *Advances in current natural sciences*. 2022. No. 6. P. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37842>. (in Russian).

Fedorova E.V., Odintseva G.Ya. Accumulation of metals by vegetation in a small drainage area exposed to aerotechnogenic pollution. *Russian Journal of Ecology*. 2005. No. 1. P. 21–26. (in Russian).

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Integral estimation of pyrogenic loads on the contents of Cu, Pb, Zn and Cd in the components of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *Geosphere Research*. 2019. No. 4. P. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.17223/25421379/13/6>. (in Russian).

Cybukova T.N., Inisheva L.I., Tikhonova O.K., Zeile L.A., and Yusubova M.S. Characteristics of the elemental composition of peat raw material from an oligotrophic bog. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2000. No. 4. P. 29–34. (in Russian).

Shevchenko V.P., Filippov D.A., Gordeev V.V., Demina L.L. Contents of heavy metals in sphagnum moss of Vologodsk region. *Modern Problems of Science and Education*. 2011. No. 14. P. 1–8. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4714> (accessed on 02.11.2023). (in Russian).

Abollino O., Giacomino A., Malandrino M. Voltammetry. Stripping Voltammetry / *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* / P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, M. Miró (eds.). Academic Press. 2019. Vol. 10. P. 238–257. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14491-9>.

Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence. *Ecosystems*. 2008. Vol. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.

Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 78. P. 222–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>.

Berg B., Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scots pine forest. VII. *Canadian Journal of Botany*. 1991. Vol. 69. No. 7. P. 1449–1456. DOI: <https://doi.org/10.1139/b91-187>.

- Brun C.B., Åström M.E., Peltola P, Johansson M–B. Trends in major and trace elements in decomposing needle litters during a long-term experiment in Swedish forests. *Plant and Soil*. 2008. Vol. 306. P. 199–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9572-x>.
- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry. *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. Vol. 39. No. 1. P. 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>.
- Bragazza L., Buttler A., Siegenthaler A. Mitchel E.A. Plant Litter Decomposition and Nutrient Release in Peatlands. In book: *Carbon Cycling in Northern Peatlands* / A.J. Baird, L.R. Belyea, X. Comas, A.S. Reeve, L.D. Slater (editors). Published by the American Geophysical Union as part of the Geophysical Monograph Series, 2009. Vol. 184. P. 99–100. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM184>.
- Chew I., Obbard J.P., Stanforth R.R. Microbial cellulose decomposition in soils from a rifle range contaminated with heavy metals. *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 111. No. 3. P. 367–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00094-4).
- Coggins A.M., Jennings S.G., Ebinghaus R. Accumulation rates of the heavy metals lead, mercury and cadmium in ombrotrophic peatlands in the west of Ireland. *Atmospheric environment*. 2006. Vol. 40. No. 2. P. 260–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.049>.
- De Santo A.V., Fierro A., Berg B., Rutigliano F.A., De Marcoet A. Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science*. 2002. Vol. 28. Part A. P. 63–78. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(02\)80044-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7).
- Gautam M.K., Lee K.S., Berg B., Song B.-Y., Yeon J.-Y. Trends of major, minor and rare earth elements in decomposing litter in a cool temperate ecosystem, South Korea. *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. P. 214–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.114>.
- Gifford R.M., Howden M. Vegetation thickening in an ecological perspective: significance to national greenhouse gas inventories. *Environmental Science & Policy*. 2001. Vol. 4. No. 2–3. P. 59–72. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00109-X).
- Goix S., Leveque T., Xiong T.T., Schreck E., Baeza-Squiban A., Geret F., Uzu G., Austruy A., Dumat C. Environmental and health impacts of fine and ultrafine metallic particles: assessment of threat scores. *Environmental Research*. 2014. Vol. 133. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.015>.
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Simonova G.V., Kalashnikova D.A. Variability of the Carbon Isotope Composition of Peat-Forming Plants during the Biochemical Transformation. *Water*. 2022. Vol. 14. No. 24. P. 4035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244035>.
- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological applications*. 1991. Vol. 1. No. 2. P. 182–195. DOI: <https://doi.org/10.2307/1941811>.
- Harguinteguy C.A., Noelia Cofré M.N., Fernández-Cirelli A., Luisa Pignata M.L. The macrophytes *Potamogeton pusillus* L. and *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. as potential bioindicators of a river contaminated by heavy metals. *Microchemical Journal*. 2016. Vol. 124. P. 228–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.014>.
- Hattori H. Influence of heavy metals on soil microbial activities. *Soil Science and Plant Nutrition*. 1992. Vol. 38. P. 93–100. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.1992.10416956>.
- Jonczak J. Dynamics, structure and properties of plant litterfall in a 120-year old beech stand in Middle Pomerania between 2007–2010. *Soil Science Annual*. 2013. Vol. 64. No. 1. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0002>.
- Kondratova A.V., Bryanin S.V. Dynamics of heavy metals during litter decomposition in fire e-affected boreal forests. *Journal of Soils and Sediments*. 2021. Vol. 21. P. 3682–3691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03027-5>.
- Kong J., Yang J., Bai E. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest. *Science of the total environment*. 2018. Vol. 642. P. 1353–1361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.154>.
- Laskowski R., Berg B. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1993. Vol. 8. No. 1–4. P. 446–456. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589309382791>.
- Laskowski R., Maryański M., Niklińska M. Effect of heavy metals and mineral nutrients on forest litter respiration rate. *Environmental Pollution*. 1994. Vol. 84. No. 1. P. 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90076-0).
- Laskowski R., Niklińska M., Maryanski M. The dynamics of chemical elements in forest litter. *Ecology*. 1995. Vol. 76. No. 5. P. 1393–1406. DOI: <https://doi.org/10.2307/1938143>.

- Leadley P., Pereira H.M., Alkemade R., Fernandez–Manjarrés J.F., Proença V., Scharlemann J.P.W., Walpole M.J. Biodiversity Scenarios: Projections of 21st century change in biodiversity and associated ecosystem services. Secretariat of the Convention on Biological Diversity: Montreal, Canada. 2010, 132 p.
- Leroy F., Gogo S., Buttler A., Bragazza L., Laggoun-Défarge F. Litter decomposition in peatlands is promoted by mixed plants. *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. P.739–749. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1820-3>.
- Leveque T., Capowiez Y., Schreck E., et al. Earthworm bioturbation influences the phytoavailability of metals released by particles in cultivated soils. *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 191. P. 199–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.005>.
- Niazi N.K., Bishop T.F.A., Singh B. Evaluation of spatial variability of soil arsenic adjacent to a disused cattle–dip site, using model–based geostatistics. *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. No. 24. P. 10463–10470. DOI: <https://doi.org/10.1021/es201726c>.
- Parish F., Sirin A.A., Charman D., Joosten H., Minaeva T.Y., Silvius M. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Kuala Lumpur, Wageningen: Wetlands International, 2008. 179 p.
- Peltoniemi K., Strakova P., Fritze H., Iraizoz P.A., Pennanen T., Laiho R. How water–level drawdown modified litter–decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 51. P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.013>.
- Richardson J., Friedland A., Kaste J., Jackson B. Forest floor lead changes from 1980 to 2011 and subsequent accumulation in the mineral soil across the northeastern United States. *Journal of Environmental Quality*. 2014. Vol. 43. No. 3. P. 926–935. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0435>.
- Rühling Å., Tyler G., Rühling A. Heavy metal pollution and decomposition of spruce needle litter. *Oikos*. 1973. Vol. 24. No. 3. P. 402–416. DOI: <https://doi.org/10.2307/3543816>.
- Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 325. P. 36–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>.
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: *Advances in Environmental Research*. Nova Science Publishers, 2010. Vol. 4. P. 99–119.
- Shotyk W., Belland R., Duke J., Kempter H., Krachler M., Noernberg T., Pelletier R., Vile M.A., Wieder K., Zaccone C., Zhang S. Sphagnum mosses from 21 ombrotrophic bogs in the Athabasca bituminous sands region show no significant atmospheric contamination of “heavy metals”. *Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 48. No. 21. P. 12603–12611. DOI: <https://doi.org/10.1021/es503751v>.
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro–landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*. 2014. Vol. 53. P. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>.
- Su Y., Liang Y. Foliar uptake and translocation of formaldehyde with Bracket plants (*Chlorophytum comosum*). *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 291. P. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.001>.
- Sun Y., Zhou Q., Xie X., Liu R. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174. No. 1–3. P. 455–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.074>.
- Sun Zh., Mou X., Sun W. Decomposition and heavy metal variations of the typical halophyte litters in coastal marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*. 2016. Vol. 147. P. 163–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.079>.
- Tyler G. Changes in the concentrations of major, minor and rare–earth elements during leaf senescence and decomposition in a *Fagus sylvatica* forest. *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 206. No. 1–3. P. 167–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.065>.
- Uzu G., Sauvain J.-J., Baeza–Squiban A., Riediker M., Sánchez Sandoval Hohl M., Val S., Tack K., Denys S., Pradère P., Dumat C. In vitro assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead–rich particles from a lead recycling plant. *Environmental science and technology*. 2011. Vol. 45. No. 18. P. 7888–7895. DOI: <https://doi.org/10.1021/es200374c>.
- Verhoeven J.T.A., Arts H.H.M. *Carex* litter decomposition and nutrient release in mires with different water chemistry. *Aquatic Botany*. 1992. Vol. 43. No. 4. P. 365–377. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(92\)90048-N](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90048-N).

Weis J.S., Weis P. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International*. 2004. Vol. 30. No. 5. P. 685–700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.002>.

Received 01 December 2023

Accepted 11 December 2023

Published 12 December 2023

About the authors:

Golovatskaya Evgeniya Aleksandrovna – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); golovatskayaea@gmail.com

Nikonova Liliya Garifullovna – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory for monitoring the carbon balance of terrestrial ecosystems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); lili112358@mail.ru

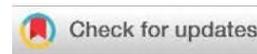
Kalashnikova Daria Andreevna – Candidate of Chemical Sciences, junior researcher at the laboratory for monitoring the carbon balance of terrestrial ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk, Russia); terrezaprk@mail.ru

Simonova Galina Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Bioinformation Technologies, Federal State Budgetary Institution Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk, Russia); galina_simonova@inbox.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/)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ГОРНЫХ ЭКОСИСТЕМ
БАЗАР-КОРГОНСКОГО РАЙОНА (КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА)© 2023 Ж. А. Кожомбердиев ¹, А. В. Кенжебаева ², Б. У. Абылмейзова ³,
Н. В. Кенжебаева ³¹Общественный фонд САМР Алатоо, Уфимский переулок 3, г. Бишкек, 720031, Кыргызская Республика. E-mail: jyrgalbeck@gmail.com²Кыргызский национальный аграрный университет им. К. И. Скрябина, ул. Медерова 68, г. Бишкек, 720005, Кыргызская Республика. E-mail: sezim73@mail.ru³Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики, ул. Фрунзе 533, г. Бишкек, 720033, Кыргызская Республика. E-mail: abylmeizova@yandex.com; nazgulvictorovna@gmail.com

Цель исследования. Проанализировать структуру видового состава растительности горных экосистем Базар-Коргонского района по основным биоморфам, экологическим группам и экотипам.

Место и время проведения. Объектом исследований послужила растительность как основной компонент горных экосистем Базар-Коргонского района, расположенного в юго-центральной части Джалал-Абадской области Кыргызской Республики. Обследования ключевых участков проводили два раза в год (с 2016 по 2022 гг.) в начале июня и во второй половине сентября.

Методы исследований: маршрутный (выявление видового состава сосудистой флоры); стационарный (заложение ключевых участков, выполнение геоботанических описаний); лабораторный (гербаризация и определение растений, обработка материала). При описании растительности было выделено 16 ключевых участков. Заложена стандартная геоботаническая площадка размером 10×10 м для травянистых сообществ (лугово-степных ценозов). Ключевые участки заложены в центре основных по площади экосистем и однородных растительных сообществ как наиболее подверженных антропогенному влиянию (перевыпасу). На данных участках отмечены растительные сообщества, доминанты и содоминанты, приведено общее проективное покрытие травостоя, составлена таблица флористического состава травостоя с указанием обилия видов по шкале Друде, фенологической фазы развития растений и жизненной формы.

Основные результаты. Выявлено флористическое разнообразие растительных сообществ горных экосистем Базар-Коргонского района; проведена классификация растительности по экотипам, основным биоморфам и экоморфам; составлен систематический список растений; отмечены основные типы почв. Видовой состав фитоценозов включает 127 видов высших растений, относящихся к 98 родам и 35 семействам. Устойчивость растительности обеспечивают такие компоненты биоморф как многолетние травянистые растения (75 видов, 59%). По способам адаптации к климатическим факторам (низким температурам воздуха) в наиболее многочисленны были гемикриптофиты (72 вида, 57%). Преобладание лесных и луговых экосистем, их большую увлажненность наглядно отражают мезофиты (55 видов, 43%). Из основных экотипов доминирующую позицию занимают лугово-степные: процент их участия составляет 35%.

Заключение. Исследования по текущему состоянию растительных сообществ Базар-Коргонского района фактически проведены впервые. Результаты исследования могут быть использованы для решения вопросов, связанных с сохранением горных экосистем Юго-Западного Тянь-Шаня и устойчивым развитием сельского хозяйства Кыргызской Республики.

Ключевые слова: горные экосистемы; растительные сообщества; биоморфы; экологические группы; экотипы; почвы.

Цитирование: Кожомбердиев Ж.А., Кенжебаева А.В., Абылмейзова Б.У., Кенжебаева Н.В. Исследование растительного компонента горных экосистем Базар-Коргонского района (Кыргызская Республика) // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e219. DOI: [10.31251/pos.v6i3.219](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.219).

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое использование природных экосистем тесно связано с сохранением биологического разнообразия. Наиболее уязвимыми естественными экосистемами являются горные экосистемы (Третий национальный ..., 2006). Растительность как основной компонент

горных экосистем создаёт условия для формирования и развития других организмов и их ценозов. Именно многообразие биоты обеспечивает устойчивость горных экосистем. По растительному покрову можно установить характер передвижения подземных вод, переходы растительных сообществ в разные экосистемы. Входящие вместе с животным миром в состав экосистем растительные сообщества представляют собой открытую систему, состояние которой зависит от множества факторов. Растительные сообщества точнейшим образом отражают малейшие изменения климата, почвенного покрова, гидрологических условий, антропогенное влияние, в целом, экологическую нагрузку (Ионов, Шукуров, 2003).

В последнее время природные экосистемы Кыргызстана находятся под влиянием антропогенного пресса, в основном перевыпаса. Многолетний выпас скота сопровождается процессами дигрессии почвы и растительного покрова, которые приводят к снижению видового разнообразия, продуктивности надземной фитомассы, кормовой ценности травостоев, образованию трансформированных антропогенных фитоценозов. Деграция пастбищных экосистем, в качестве важных сельскохозяйственных ресурсов, неизбежно ведет к разрушению травяного покрова, появлению почвенной эрозии, селям и оползням. Управление пастбищами, планирование и мониторинг природоохранных мероприятий в горных районах требуют подробной информации о составе растительности, особенно о биомассе и качестве кормов. В этой связи для настоящего исследования была выбрана территория Базар-Коргонского района в качестве горной экосистемы Юго-Западного Тянь-Шаня, испытывающей чрезмерную пастбищную нагрузку. Кроме того, на территории Юго-Западного Тянь-Шаня Кыргызской Республики находится один из крупнейших ореховых лесов в Центральной Азии общей площадью 13 000 га и самый большой естественный лес плодовых и ореховых деревьев на планете (Schmidt, 2005). Базар-Коргонский район расположен в самом большом из трех массивов естественных ореховых лесов республики – Кугарт-Арстанбабский (Сарымсаков, Мамаджанов, 2012). С начала 1990-х годов пастбищная нагрузка, растущая за счет чрезмерного выпаса скота, оказывает сильное влияние на растительный покров данного района. Одновременно, Базар-Коргонский район является одним из слабоизученных по видовому составу растительных сообществ горных экосистем Юго-Западного Тянь-Шаня Кыргызской Республики.

В соответствии с вышеизложенным, авторами статьи была определена цель исследования – проанализировать структуру видового состава растительности горных экосистем Базар-Коргонского района по основным биоморфам, экологическим группам и экотипам. Проведенные исследования по текущему состоянию растительных сообществ данного района Кыргызской Республики являются фактически первичными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований послужила растительность в качестве основного компонента горных экосистем Базар-Коргонского района, расположенного в юго-центральной части Джалал-Абадской области Кыргызской Республики (рис. 1).

С точки зрения климата Базар-Коргонский район находится в самом теплом регионе Кыргызстана. За исключением юго-запада, эта климатическая зона окружена горными хребтами. На северо-западе и севере находится Чаткальский хребет и его отроги, на юге – Алайский и Туркестанский хребты, а Ферганский хребет охватывает всю территорию с запада на восток до северо-востока. Эти физические особенности оказали значительное влияние на климат данной территории, что напрямую отразилось на росте растительности на пастбищах. Влияние холодных воздушных потоков, идущих с севера, слабое. Климат Ферганской области характеризуется тремя основными чертами: он континентальный, сухой и имеет сильную вертикальную климатическую зональность.

Земли на территории изучаемого района используются как сельскохозяйственный ресурс. В основном это пастбищные угодья, характеризующиеся высокой нагрузкой выпаса скота. Ключевые участки размером 10×10 м были заложены в центре основных по площади экосистем и однородных растительных сообществ как наиболее подверженных антропогенному влиянию (перевыпасу).

Методы исследований: маршрутный (количественный состав растительных сообществ); стационарный (ключевые участки, геоботанические описания); лабораторный (классификация растительности по экотипам, основным биоморфам и экоморфам, систематический список растений с указанием их жизненной формы, экологических и эколого-фитоценологических групп).

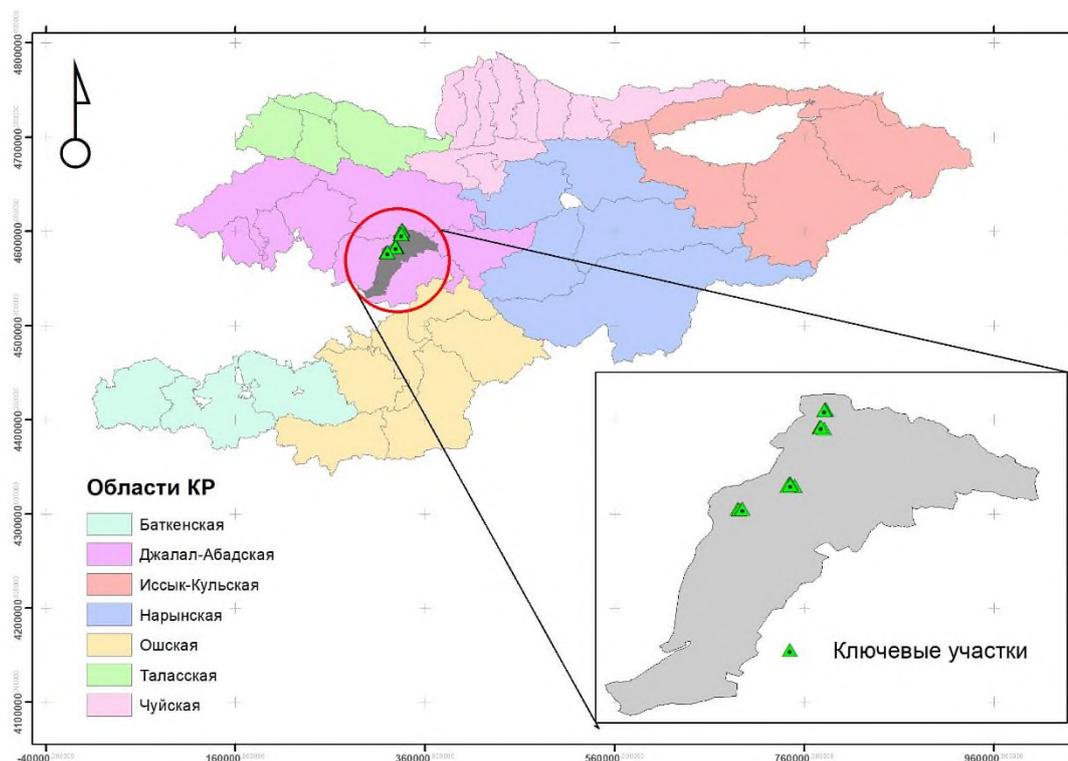


Рисунок 1. Карта территории исследования Базар-Коргонского района (Кыргызская Республика, на карте обозначена КР).

Описание растительности проводили по стандартным геоботаническим методикам (Корчагин, 1964). Для определения видов растений использованы многотомные флористические сводки: Флора Киргизской ССР (1965); Определитель растений Средней Азии (1993); Лазьков, Султанова (2014). Приведены местные (кыргызские) названия растений (Русско-Кыргызский словарь ..., 2013). Экологические группы растений выделены по приуроченности к типу местообитания с определённым режимом влаги согласно А.Г. Шенникову (1950). Состав биоморф растений отмечен по классификации И.Г. Серебрякова (1962; 1964); состав жизненных форм растений – по системе Раункиера (Серебряков, 1962). Описание почвенного покрова проведено в основном по литературным данным (Мамытов и др., 1995; Ройченко, 1960).

Всего было заложено 16 ключевых участков размером 10×10 м, описание которых приведено нами в ранее опубликованных статьях (Абылмейизова и др., 2022; Кожомбердиев и др., 2022). Обследования участков проводили два раза в год (с 2016 по 2022 гг.) в начале июня и во второй половине сентября.

Список обнаруженных видов растений Базар-Коргонского района составлен в виде таблицы и представлен в приложение на ботаническом (латинском), русском и кыргызском языках с указанием их жизненной формы, экологических и эколого-фитоценологических групп.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Камеральная обработка полевого материала показала высокий и устойчивый уровень видового разнообразия растительности Базар-Коргонского района: на 16 ключевых участках и вне их было выявлено 127 видов высших/сосудистых растений, относящихся к 98 родам и 35 семействам.

В таблице 1 представлен анализ спектров семейств и родов растительности изученного района. В этих 10-ти ведущих семействах сосредоточено 42% видов флоры. Остальные 25 семейств составляют 58%: 3 семейства содержат от 4 до 3 видов, 7 семейств – по 2 вида, 15 семейств – по 1 виду.

На изучаемой территории представлены компоненты биоморф растительного покрова по длительности жизни: однолетние, двулетние и многолетние травы, деревья, кустарники, полукустарнички (табл. 2).

Таблица 1

Спектр основных семейств флоры по количеству родов и видов

№	Семейство	Количество родов	Количество видов	% от общего состава
1	<i>Compositae</i>	14	18	14
2	<i>Rosaceae</i>	12	17	13
3	<i>Labiatae</i>	12	12	9
4	<i>Poaceae</i>	7	9	7
5	<i>Liliaceae</i>	5	7	6
6	<i>Umbelliferae</i>	4	6	5
7	<i>Scrophullariaceae</i>	3	5	4
8	<i>Fabaceae</i>	3	5	4
9	<i>Caryophyllaceae</i>	4	5	4
10	<i>Cruciferae</i>	4	4	3
10 ведущих семейств		68	88	42
Остальные семейства		30	39	58
Итого		98	127	100

Из таблицы 2 видно заметное преобладание травянистых растений, их вклад в видовое разнообразие изучаемой территории колеблется от 6 до 59%. Основу растительного покрова формируют многолетники – 59%. Однолетники составляют 21%, двулетники – 6%. Доля участия древесных и кустарниковых видов растений достигает от 1 до 7%.

Таблица 2

Биоморфологическая структура флоры по длительности жизни

№	Биоморфы	Количество видов	% от общего состава
1	Однолетние травы (Одн.)	27	21
2	Двулетние травы (Двл.)	8	6
3	Многолетние травы (Мн.)	75	59
4	Полукустарнички (Плкч.)	1	1
5	Кустарники (Куст.)	9	7
6	Деревья (Дер.)	7	6
Всего		127	100

Биоморфы растительного покрова распределены по системе Раункиера, для определения их приспособлений к климатическим факторам, а именно к низким температурам, их способы/формы перезимовывания (переживания неблагоприятного времени года), защищённости от неблагоприятных условий зимы или жаркого и сухого лета (табл. 3)

Таблица 3

Жизненные формы растительного покрова по Раункиеру

№	Жизненная форма	Количество видов	% от общего состава
1	Фанерофиты (Ф)	16	13
2	Хамефиты (Х)	2	1
3	Гемикриптофиты (Г)	72	57
4	Криптофиты (К)	10	8
5	Терофиты (Т)	27	21
Всего		127	100

Как видно из таблицы 3, преобладающее большинство составляют гемикриптофиты – 57%, далее следуют терофиты – 21%, фанерофиты – 13%, на последнем месте криптофиты и хамефиты (8 и 1%).

В экологическом отношении, а именно по приуроченности к типу местообитания с определённым режимом влаги, доминируют мезофиты и мезоксерофиты (43 и 40%), ксерофиты насчитывают 14%, в наименьшем количестве представлены гигрофиты – 3% (табл. 4)

Таблица 4

Основные экологические группы растений

№	Экологическая группа	Количество видов	% от общего состава
1	Мезофиты (М)	55	43
2	Мезоксерофиты (Мз)	51	40
3	Ксерофиты (Кс.)	18	14
4	Гигрофиты (Гиг.)	3	3
	Всего	127	100

Выделены следующие экотипы по приуроченности к определенным типам местообитаний (эколого-фитоценотические группы): лесные, луговые, степные и лугово-степные (табл. 5).

Таблица 5

Распределение видов растений по экотипам

№	Эколого-фитоценотическая группа	Количество видов	% от общего состава
1	Лесные (Л)	24	19
2	Луговые (Луг)	37	29
3	Степные (С)	21	17
4	Лугово-степные (Л-С)	45	35
	Всего	127	100

Доля участия лугово-степных экотипов растительности велика и составила 35%, к луговому экотипу относятся 29%, к лесному и степному экотипам – 19 и 17%.

На основе описания фитоценозов составлен систематический список растений ключевых участков изучаемого района (см. Приложение).

Согласно данным Г.И. Ройченко (1960), А.М. Мамытов и др. (1995), в Базар-Коргонском районе распространены следующие почвы:

✓ Серозёмы туранские типичные. Распространены в зоне низких и адырных предгорий в пределах абсолютных отметок от 700 до 1300 м над уровнем моря (н.у.м.) По гранулометрическому составу почвы относятся к пылеватым средним суглинкам, реже лёгким; содержание гумуса колеблется в пределах 1,8–2,5%. Почвы слабо обеспечены азотом и фосфором.

✓ Серозёмы туранские тёмные. Формируются в пределах 1200–1500 м н.у.м. Гранулометрический состав – пылеватые суглинки. Содержание гумуса составляет 2,1–4,6%. Почвы слабо обеспечены основными элементами питания растений.

✓ Горные коричневые карбонатные. Распространены в верхней части степного пояса низкогорий, на высоте 1300–1600 м н.у.м., а также в лесном поясе, поднимаясь ещё выше (до 2000 м) по сухим южным склонам. По гранулометрическому составу почвы относятся к тяжёлым пылеватым суглинкам. Содержание гумуса варьирует от 6,7 до 8%.

✓ Горные коричневые типичные. Широко распространены на абсолютных высотах 1500–1700 м н.у.м. на южных относительно сухих склонах, поднимаются до высоты 1900 м н.у.м. По гранулометрическому составу почвы относятся к тяжёлым пылеватым суглинкам. В верхнем горизонте содержится от 4,5 до 6% гумуса.

✓ Горные коричневые выщелоченные. Занимают более увлажнённые склоны хребтов северных и северо-западных экспозиций на высотах 1600–1900 (2100) м н.у.м. По гранулометрическому составу, в большинстве случаев, почвы относятся к пылеватым тяжёлым и средним суглинкам. Содержание гумуса достигает 8–14%.

✓ Горно-лесные чёрно-коричневые. Наиболее крупные массивы этих почв расположены на увлажнённых юго-западных склонах. Относятся к тяжелосуглинистым почвам. Содержание гумуса в верхнем горизонте достигает 10–15%, иногда до 20%. Эти почвы являются одними из наиболее обеспеченными элементами питания и высокопроизводительными в Кыргызской республике.

✓ Горные лугово-степные субальпийские. Формируются под субальпийскими лугостепями в пределах 2500 м н.у.м. Гранулометрический состав разнообразный – от лёгких до тяжёлых суглинков, часто каменистые. Содержание гумуса в дерновом и в верхней части гумусового горизонта составляет 6–10%.

Результаты исследования почвенно-растительного покрова Базар-Коргонского района могут быть использованы природоохранными организациями для решения проблем деградации и восстановления земель, устойчивого использования пастбищных экосистем и при планировании выпаса, а также в вопросах сохранения горных экосистем Юго-Западного Тянь-Шаня и устойчивого развития сельского хозяйства Кыргызской Республики.

ВЫВОДЫ

На основе полученных результатов составлен систематический список растений (см. Приложение) и дана качественная оценка текущего состояния растительных сообществ горных экосистем Базар-Коргонского района (Кыргызская Республика), включая:

1. Общее видовое богатство растительных сообществ 16 ключевых участков и вне их в изученном районе составило 127 видов высших/сосудистых растений.

2. На ключевых участках из основных биоморф растительных сообществ доминирующее положение занимают многолетники (75 видов, 59%), обеспечивающие устойчивость растительного покрова. Лесной характер растительности отражает значительное количество древесных (7 видов, 6%) и кустарниковых (9 видов, 7%) растений.

3. По составу жизненных форм растительного покрова, согласно системе Раункиера, в наибольшем количестве отмечены гемикриптофиты (72 вида, 57%).

4. По влагообеспеченности территории на всех ключевых участках основное место отводится мезофитным видам (55 видов, 43%), что наглядно характеризует гумидную растительность, большую увлажненность, преобладание лесных и луговых экосистем. Большинство растений являются мезоксерофитами (51 вид, 40%) и произрастают в условиях с периодически недостаточным увлажнением, что, в целом, подтверждает принадлежность изучаемой территории к аридной зоне.

5. Из основных эколого-фитоценологических групп преобладает лугово-степной тип растительности (45 видов, 35%), далее следуют луговой (37 видов, 29%), лесной (24 вида, 19%) и степной (21 вид, 17%).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта Института водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики, часть 5 «Эколого-географические особенности устойчивого развития экосистем речных бассейнов Кыргызстана в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки». Полевые работы проведены при финансовой поддержке Общественного Фонда САМР Алатоо по проекту «Сохранение биоразнообразия и сокращение бедности через управление орехоплодовыми лесами и пастбищами с участием местных сообществ».

ЛИТЕРАТУРА

Абылмейзова Б.У., Кожомбердиев Ж.А., Кенжебаева Н.В. Обзор современного состояния растительного покрова Базар-Коргонского района // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 3. С. 138–142. DOI: [10.26104/NNTIK.2022.38.14.022](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2022.38.14.022).

Ионов Р.Н., Шукуров Э.Дж. Оценка основных экосистем Западного Тянь-Шаня // Межгосударственный проект ТАСИС по сохранению биоразнообразия Западного Тянь-Шаня. Бишкек, 2003. 38 с.

Кожомбердиев Ж.А., Кенжебаева Н.В., Абылмейзова Б.У. Некоторые результаты изучения растительности бассейна реки Кара-Ункур Базар-Коргонского района // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 7. С. 60–64. DOI: [10.26104/NNTIK.2022.58.41.011](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2022.58.41.011).

Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения: методическое руководство // Полевая геоботаника / Под ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. С. 39–62.

Лазьков Г.А., Султанова Б.А. Кадастр флоры Кыргызстана. Сосудистые растения. Бишкек, 2014. 126 с.

Мамытов А.М., Воронов С.И., Мамытова Д.А., Эсенбаев К.Э. Систематический список почв Кыргызской Республики. Бишкек: НАН КР, 1995. 77 с.

Определитель растений Средней Азии: Критический конспект флоры. В 10-ти томах. Т. 1–10. Ташкент: ФАН, 1968–1993.

Ройченко Г.И. Почвы Южной Киргизии. Фрунзе, 1960. 80–110 с.

Русско-кыргызский словарь названий растений и ботанических терминов / Сост. Б.А. Султанова и др. Бишкек, 2013. 340 с.

Сарымсаков З.Х., Мамаджанов Д.К. Типы лесов Кыргызстана и их устойчивое использование: иллюстрированное учебно-методическое пособие. Бишкек, 2012. 216 с.

Серебряков И. Г. Экологическая морфология растений. Москва, 1962. 378 с.

Серебряков И. Г. Жизненные формы высших растений и их изучение // Полевая геоботаника / Под ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. С. 46–205.

Третий национальный отчет по сохранению биоразнообразия Кыргызской Республики [Электронный ресурс]. Бишкек, 2006. URL: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/biom/lib/book/shukurov_3national_report_kr_biodiv.pdf. (дата обращения 20.11.2023).

Флора Кыргызской ССР: Определитель растений Кыргызской ССР. В 11-ти томах. Т. 1–11. Фрунзе: Изд-во АН КиргССР, 1952–1965.

Шенников А.Г. Экология растений. Москва, 1950. С. 133–192.

Schmidt M. Utilisation and management changes in South Kyrgyzstan's mountain forests // Journal of Mountain Science. 2005. Vol. 2. No. 2. P. 91–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02918325>.

Поступила в редакцию 10.10.2023

Принята 30.11.2023

Опубликована 05.12.2023

Сведения об авторах:

Кожомбердиев Жыргалбек Алтымышович – координатор проекта Общественного фонда САМР Алатоо (г. Бишкек, Кыргызская Республика); jyrgalbeck@gmail.com

Кенжебаева Айгуль Викторовна – кандидат биологических наук, исполняющая обязанности доцента кафедры экологии и защиты окружающей среды факультета гидромелиорации, экологии и землеустройства, Кыргызский национальный аграрный университет имени К.И. Скрябина (г. Бишкек, Кыргызская Республика); sezim73@mail.ru

Абылмейзова Бермет Умуткуловна – кандидат географических наук, заведующая лабораторией горных экосистем Института водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики (г. Бишкек, Кыргызская Республика); abylmeizova@yandex.com

Кенжебаева Назгуль Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории горных экосистем Института водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики (г. Бишкек, Кыргызская Республика); nazgulvictorovna@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

RESEARCH OF THE PLANT COMPONENT OF THE MOUNTAIN ECOSYSTEMS OF BAZAR-KORGON DISTRICT (THE KYRGYZ REPUBLIC)

© 2023 Zh. A. Kozhombardiev ¹, A. V. Kenjebaeva ², B. U. Abylmeizova ³,

N. V. Kenjebaeva ³

¹Public Foundation CAMP Alatoo, 3 Ufimskiy pereulok, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: jyrgalbeck@gmail.com

²Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Skryabin, Mederova st. 68, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: sezim73@mail.ru

³Institute for Water Problems and Hydropower, the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Frunze st. 533, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: abylmeizova@yandex.com; nazgulvictorovna@gmail.com

The aim of the study. To study the current status of the mountain ecosystems of the South-Western Tien Shan using for the ecological assessment the vegetation composition and cover of the Bazar-Korgon district in the Jalal-Abad region.

Location and time of the study. The object of the study was vegetation as the main component of the mountain ecosystems of the Bazar-Korgon district, located in the south-central part of the Jalal-Abad region.

Methods. The research methods employed were as following: itinerary (identification of species composition of vascular flora); stationary (laying of key sites, fulfillment of geobotanical descriptions); laboratory (herbarization and identification of plants, processing of material). After the vegetation description, sixteen sites were chosen as the key study sites. A standardized geobotanical plot (a square area of 10x10 m was established for studying herbaceous communities (meadow-steppe cenoses). Key plots were located in the center of the main ecosystems and homogeneous plant communities as the most exposed to anthropogenic influence (overgrazing). At these plots the following characteristics of the plant communities were obtained: their dominants and co-dominants, total projective grass cover, total projective grass cover, and total projective cover of the herbage, total table of floristic composition of the grassland with indication of species abundance according to the Drude scale, phenological phase of plant development and life form.

Results. Floristic diversity of the mountain ecosystems of plant communities of the mountain ecosystems of the Bazar-Korgon district in the Jalal-Abad region was inventoried. The vegetation was classified according to according to ecotypes, basic bio - and ectomorphs. The systematic list of plants was compiled in association with the main types. The species composition of phytocenoses included 127 species of higher plants, belonging to 98 genera and 35 families. The sustainability of vegetation is provided by such biomorphs as perennial herbaceous plants (75 species, 59%). According to the adaptation modes to climatic factors (low air temperature), the hemikryptophytes (72 species, 57%) were the most numerous. Mesophytic (55 species, 43%) predominated in the forest and meadow ecosystems due to high moisture content there. Meadow-steppe ecotypes were dominant, contributing 35.

Conclusions. The conducted research inventoried for the first time the current composition of the plant communities of the Bazar-Korgon district, assessing their current condition as well. The obtained results can be used for solving problems of preserving the mountain ecosystems of the South-West Tien-Shan and promoting sustainable agriculture in the Kyrgyz Republic.

Key words: mountain ecosystems; vegetation; plant communities; biomorphs; water ecotypes; ecotypes; soils.

How to cite: Kozhombardiev Zh.A., Kenjebaeva A.V., Abylmeizova B.U., Kenjebaeva N.V. Research of the plant component of the mountain ecosystems in the Bazar-Korgon district (the Kyrgyz Republic) // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e219. DOI: [10.31251/pos.v6i3.219](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.219). (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was completed within of the section five of Institute's budget project «Ecological and geographical features of sustainable development of ecosystems of river basins of Kyrgyzstan in the conditions of climate change and anthropogenic influence». The field work was carried out with the financial support of the Public Foundation CAMP Alatoo.

REFERENCES

- Abylmeizova B., Kozhombardiev Zh., Kenjebaeva N. Overview of the current state of vegetation cover of Bazar-Korgon district. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*. 2022. No. 3. P. 138–142. DOI: [10.26104/NNTIK.2022.38.14.022](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2022.38.14.022). (in Russian).
- Ionov R.N., Shukurov E.J. Assessment of the main ecosystems of the Western Tien-Shan. Interstate TACIS project on conservation of biodiversity of the Western Tien-Shan. Bishkek, 2003. 38 p.
- Kozhombardiev Zh., Kenjebaeva N., Abylmeizova B. Some results of studying the vegetation of the Kara-Unkur river basin of Basar-Korgon district. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*. 2022. No. 7. P. 60–64. DOI: [10.26104/NNTIK.2022.58.41.011](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2022.58.41.011). (in Russian).
- Korchagin A.A. Species (floristic) composition of plant communities and methods for its study: methodological guide. In book: *Field geobotany* / E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin (ed.). Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1964. Vol. 3. P. 39–62. (in Russian).
- Lazkov G.A., Sultanova B.A. Cadastre of the flora of Kyrgyzstan. Vascular plants. Bishkek, 2014. 126 p. (in Russian).
- Mamytov A.M., Voronov S.I., Mamytova D.A., Esenbaev K.E. Systematic list of soils of the Kyrgyz Republic. Bishkek: NAS KR, 1995. 77 p. (in Russian).

Central Asiatic Plant Identifier: Critical. synopsis of flora. In 10 volumes. Vol. 1–10. Tashkent: FAN, 1968–1993. (in Russian).

Roychenko G.I. Soils of Southern Kyrgyzstan. Frunze, 1960. 80–110 p. (in Russian).

Russian-Kyrgyz Dictionary of Plant Names and Botanical Terms / Comp. B.A. Sultanova et al. Bishkek, 2013. 340 p.

Sarymsakov Z.H., Mamadjanov D.K. Types of forests of Kyrgyzstan and their sustainable use: illustrated teaching manual. Bishkek, 2012. 216 p. (in Russian).

Serebryakov I.G. Ecological morphology of plants. Moscow, 1962. 378 p. (in Russian).

Serebryakov I.G. Life forms of higher plants and their study. In book: Field geobotany / E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin (ed.). Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1964. Vol. 3. P. 46–205. (in Russian).

The Third National Report on Biodiversity Conservation of the Kyrgyz Republic [Electronic resource]. Bishkek, 2006. URL: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/biom/lib/book/shukurov_3national_report_kr_biodiv.pdf. (accessed on 20.11.2023).

Flora of the Kyrgyz SSR: The determinant of plants of the Kyrgyz SSR. In 11 volumes. Vol. 1–11. Frunze: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kyrgyz SSR, 1952–1965. (in Russian).

Schennikov A.G. Plant ecology. Moscow, 1950. P. 133–192. (in Russian).

Schmidt M. Utilisation and management changes in South Kyrgyzstan's mountain forests. Journal of Mountain Science. 2005. Vol. 2. No. 2. P. 91–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02918325>.

Received 10 October 2023

Accepted 30 November 2023

Published 05 December 2023

About the author(s):

Kozhombardiev Zhyrgalbek Altymyshovich – Public Foundation CAMP Alatau, project coordinator (Bishkek, Kyrgyz Republic); jyrgalbeck@gmail.com

Kenzhebaeva Aigul Viktorovna – Candidate of Biological Sciences, Chair of Ecology and Environmental Protection, Faculty of Hydromelioration, Ecology and Land Management, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Skryabin (Bishkek, Kyrgyz Republic); sezim73@mail.ru

Abylmeyizova Bernmet Umutkulovna – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of the mountain ecosystems in the Institute of water issues, hydropower of National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (Bishkek, Kyrgyz Republic); abylmeyizova@yandex.com

Kenzhebaeva Nazgul Viktorovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of the mountain ecosystems in the Institute of water issues, hydropower of National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (Bishkek, Kyrgyz Republic); nazgulvictorovna@gmail.com

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/)

Список растений ключевых участков Базар-Коргонского района (Кыргызская Республика)

№	Наименование (семейство, род, вид)			Био-морфы	По Раункиеру	По отношению к влаге	Эколого-фитоцен. гр.
I	II			III	IV	V	VI
<i>Pinaceae</i> // Сосновые // Карагайлар уруусу							
1	<i>Picea schrenkiana</i> Fisch.et C.A.Mey.	Ель Шренка	Шренк карагайы	Дер.	Ф	М	Л
<i>Cupressaceae</i> // Кипарисовые // Кипаристер уруусу							
2	<i>Juniperus semiglobosa</i> Regel	Можжевельник полушаровидный	Саур арчасы, карагай арча	Дер.	Ф	МК	Л
<i>Poaceae/Gramineae</i> // Злаки // Дан өсүмдүктөр уруусу							
3	<i>Phleum phleoides</i> (L.) Karst.	Тимофеевка степная	Кайракчы ат конок, ак-сокто	Мн.	Г	МК	ЛС
4	<i>Agrostis gigantea</i> Roth	Полевица гигантская	Бийик айдың чөп	Мн.	Г	Гиг.	Лг
5	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Свиной пальчатый	Манчадай ажырык	Мн.	Г	К	С
6	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Ежа сборная	Топтолушкан ак сокто	Мн.	Г	М	Лг
7	<i>Poa annua</i> L.	Мятлик однолетний	Бир жылдык жылган	Двл.-одн	Г	М	ЛС
8	<i>Poa bulbosa</i> L.	Мятлик луковичный	Түймөкчөлү жылган	Мн.	Г	МК	С
9	<i>Poa pratensis</i> L.	Мятлик луговой	Шалбаа жылганы	Мн.	Г	М	Лг
10	<i>Festuca valesiaca</i> Gaudin	Овсяница валлисская	Валлисса бетегеси	Мн.	Г	К	С
11	<i>Hordeum leporinum</i> Link	Ячмень заячий	Коен арпасы	Одн.	Т	К	С
<i>Cyperaceae</i> // Осоковые // Өлөң чөптөрдөн							
12	<i>Carex polyphylla</i> Kar. et Kir.	Осока многолистная	Көп жалбырактуу өлөң чөп	Мн.	К	М	Лг
13	<i>Carex turkestanica</i> Regel	Осока туркестанская	Түркстан өлөң чөбү	Мн.	Г	К	С
<i>Araceae</i> // Ароидные // Ароиддер уруусу							
14	<i>Arum korolkowii</i> Regel	Аронник Королькова	Корольков аруму, күчаласы	Мн.	К	МК	Л
<i>Liliaceae</i> // Лилейные // Лилиялар уруусу							
15	<i>Eremurus fuscus</i> (O. Fedtsch.) Vved.	Эремурус загорелый	Күрөң чыраш	Мн.	К	МК	ЛС
16	<i>Eremurus robustus</i> (Regel) Regel	Эремурус мощный	Зор түштүү чыраш	Мн.	К	МК	ЛС
17	<i>Gagea turkestanica</i> Pasch.	Гусиный лук туркестанский	Түркстан каз пиязы	Мн.	К	М	ЛС
18	<i>Allium aflatunense</i> B.Fedtsch.	Лук афлатунский	Афлатун пиязы	Мн.	К	М	Лг
19	<i>Allium barsczewskii</i> Lipsky	Лук Барщевского	Барщевский пиязы	Мн.	К	М	Лг
20	<i>Tulipa ferganica</i> Vved.	Тюльпан ферганский	Фергана мандалагы, жоогазын	Мн.	К	М	ЛС
21	<i>Scilla puschkinioides</i> Regel	Пролеска пушкиниевидная	Пушкиндей сцилла	Мн.	К	М	Лг

I	II		III	IV	V	VI	
Iridaceae // Ирисовые // Чекилдектер уруусу							
22	<i>Iris ruthenica</i> Ker-Gawl.	Ирис русский	Орус чекилдеги	Мн.	К	М	ЛС
Juglandaceae // Ореховые // Жангактар уруусу							
23	<i>Juglans regia</i> L.	Орех грецкий	Грек жаңгагы	Дер.	Ф	М	Л
Urticaceae // Крапивные // Чалкандардан							
24	<i>Urtica dioica</i> L.	Крапива двудомная	Эки үйлүү чалкан	Мн.	Г	М	ЛС
Polygonaceae // Гречишные // Кымыздыктар уруусу							
25	<i>Rumex acetosa</i> L.	Щавель кислый	Кычкыл козу кулак кадимки козу кулак	Мн.	Г	М	Лг
26	<i>Rumex crispus</i> L.	Щавель курчавый	Тармал ат кулак	Мн.	Г	М	Лг
27	<i>Polygonum aviculare</i> L.	Горец птичий	Төшөлмө кымыздык, машра кымыздыгы	Одн.	Т	МК	ЛС
Chenopodiaceae // Маревые // Шакардуулар уруусу							
28	<i>Chenopodium foliosum</i> Aschers.	Марь многолистная	Көп жалбырактуу шакар чөп	Одн.	Т	МК	ЛС
Caryophyllaceae // Гвоздичные // Чеге гүлдүүлөр уруусу							
29	<i>Cerastium davuricum</i> Fisch. ex Spreng.	Ясколка даурская	Даурия серастиуму	Мн.	Г	М	Лг
30	<i>Cerastium holosteoides</i> Fr.	Ясколка дернистая	Чымдак серастиум	Мн.	Г	М	Лг
31	<i>Minuartia biflora</i> (L.) Schinz et Thell.	Минуарция двухцветковая	Эки гүлдүү минуарциясы	Мн.	Г	МК	Лг
32	<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	Песчанка чабрецелистная	Кийик от жалбырактуу кумдакчыл	Одн.	Т	К	С
33	<i>Herniaria glabra</i> L.	Грыжник голый	Түксүз самын чөп	Одн.	Т	МК	С
Ranunculaceae // Лютиковые // Лютиктер уруусу							
34	<i>Ceratocephala testiculata</i> (Crantz) Besser	Рогоглавник яичковидный	Жумурткадай темир тикен	Одн.	Т	К	С
35	<i>Ranunculus polyanthemos</i> L.	Лютик многоцветковый	Көп гүлдүү лютиги	Мн.	Г	М	Лг
Berberidaceae // Барбарисовые // Бөрү карагаттар уруусу							
36	<i>Berberis integerrima</i> Bunge	Барбарис цельнокрайний	Тегиз жээктүү бөрү карагат	Куст.	Ф	МК	Л
Brassicaceae/Cruciferae // Крестоцветные // Кайчы гүлдүүлөр уруусу							
37	<i>Sisymbrium loeselii</i> L.	Гулявник Лезеля	Лезель заргыны	Одн.	Т	МК	ЛС
38	<i>Drabopsis nuda</i> (Belanger) Stapf	Крупичка голая	Түксүз драбопсис	Одн.	Т	МК	С
39	<i>Barbarea vulgaris</i> R.Br.	Сурепка обыкновенная	Кадимки кычы	Двл.	Г	Гиг.	Лг
40	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik.	Пастушья сумка обыкновенная	Кадимки койчу баштык	Одн.	Т	МК	ЛС
Rosaceae // Розоцветные // Роза гүлдүүлөр уруусу							
41	<i>Spiraea hypericifolia</i> L.	Таволга зверобоелистная	Сары чай чөптөй табылгы	Куст.	Ф	МК	Л
42	<i>Cotoneaster melanocarpus</i> (Bunge) Loudon	Кизильник черноплодный	Кара мөмөлүү ыргай	Куст.	Ф	М	Л
43	<i>Cotoneaster multiflorus</i> Bunge	Кизильник многоцветковый	Көп гүлдүү ыргай	Куст.	Ф	М	Л
44	<i>Malus sieversii</i> (Ledeb.) M. Roem.	Яблоня Сиверса	Сиверс алмасы	Дер.	Ф	М	Л
45	<i>Crataegus korolkowii</i> L.Henry	Боярышник Королькова	Корольков долоносу	Дер.	Ф	М	Л

I	II			III	VI	V	VI
Rosaceae // Розоцветные // Роза гүлдүүлөр уруусу (продолжение)							
46	<i>Crataegus turkestanica</i> Pojark.	Боярышник туркестанский	Түркстан долоносу	Дер.	Ф	М	Л
47	<i>Rubus caesius</i> L.	Ежевика сизая	Көгүлтүр кара бүлдүркөн, маймынжан, уй бөйрөк	Куст.	Х	МК	Л
48	<i>Potentilla asiatica</i> (Th. Wolf) Juz.	Лапчатка азиатская	Азия сары каз таманы	Мн.	Г	МК	ЛС
49	<i>Potentilla orientalis</i> Juz.	Лапчатка восточная	Чыгыш сары каз таманы	Мн.	Г	МК	С
50	<i>Potentilla reptans</i> L.	Лапчатка ползучая	Сойломо сары каз таман	Мн.	Г	М	Лг
51	<i>Geum urbanum</i> L.	Гравилат городской	Шаардык геум	Мн.	Г	М	Лг
52	<i>Alchemilla retropilosa</i> Juz.	Манжетка отклоненноволосяная	Кайрма түктүү тогуз төбөл	Мн.	Г	М	Лг
53	<i>Poterium polygamum</i> Waldst. et Kit.	Черноголовник многобрачный	Көп үйлүү потериум	Мн.	Г	МК	ЛС
54	<i>Rosa fedtschenkoana</i> Regel	Шиповник Федченко	Федченко ит муруну	Куст.	Ф	МК	Л
55	<i>Rosa kokanica</i> (Regel) Juz.	Шиповник кокандский	Кокон ит муруну	Куст.	Ф	МК	Л
56	<i>Prunus divaricata</i> Ledeb. (<i>P. sogdiana</i> Vass.)	Слива растопыренная	Тарбагай кара өрүк	Куст.	Ф	М	Л
57	<i>Louiseania ulmifolia</i> (Franch.) Pachom. (<i>Aflautonia ulmifolia</i> (Franch.) Vass.)	Луизеания вязолистная, афлатуния	Кара жыгычтай катын жаңгак	Куст.	Ф	М	Л
Fabaceae/Leguminosae // Бобовые // Чанактуулар уруусу							
58	<i>Medicago lupulina</i> L.	Люцерна хмелевидная	Кулмактай беде	Одн.- двл.	Г	М	ЛС
59	<i>Trifolium pratense</i> L.	Клевер луговой	Шалбаа уй бедеси	Мн.	Г	М	Лг
60	<i>Trifolium repens</i> L.	Клевер ползучий	Сойломо уй беде	Мн.	Г	М	ЛС
61	<i>Astragalus schanginianus</i> Pall.	Астрагал Шангина	Шангин астрагалы	Мн.	Г	МК	ЛС
62	<i>Astragalus sieversianus</i> Pall.	Астрагал Сиверса	Түлкү куурай, Сиверс астрагалы	Мн.	Г	МК	ЛС
Geraniaceae // Гераниевые // Каз тамандардан							
63	<i>Geranium collinum</i> Steph. ex Willd.	Герань холмовая	Дөңсөө каз таманы	Мн.	Г	М	Лг
64	<i>Geranium divaricatum</i> Ehrh.	Герань раскидистая	Чачырак каз таман	Одн.	Т	МК	Лг
65	<i>Geranium pratense</i> L.	Герань луговая	Шалбаа каз таманы	Мн.	Г	М	Лг
66	<i>Geranium robertianum</i> L.	Герань Роберта	Робет каз таманы	Одн.	Т	М	Л
Rutaceae // Рутовые // Руталар уруусу							
67	<i>Haplophyllum latifolium</i> Kar. et Kir.	Цельнолистник широколистный	Жазы жалбырактуу бүтүн жалбыракчан	Мн.	Г	МК	ЛС
68	<i>Dictamnus angustifolius</i> G. Don ex Sweet	Ясенец узколистный	Ичке жалбырактуу диктамнус	Мн.	Г	МК	Л
Polygalaceae // Истодовые // Истоддордон							
69	<i>Polygala hybrida</i> DC.	Истод гибридный	Аргын истод	Мн.	Г	М	Лг
Euphorbiaceae // Молочайные // Сүттүү чөптөрдөн							
70	<i>Euphorbia alata</i> Boiss.	Молочай алатавский	Ала-Тоолук сүттүү чөп	Мн.	Г	МК	ЛС
71	<i>Euphorbia lamprocarpa</i> Prokh.	Молочай светлоплодный	Агыш мөмөлүү сүттүү чөп	Мн.	Г	МК	ЛС

I	II		III	VI	V	VI	
Aceraceae // Клёновые // Зараңдардан							
72	<i>Acer turkestanicum</i> Pax	Клён туркестанский	Түркстан зараңы	Дер.	Ф	М	Л
Balsaminaceae // Бальзаминовые // Кыналар уруусу							
73	<i>Impatiens brachycentra</i> Kar. et Kir.	Недотрога короткошпорцевая	Кыска учтуу кына	Одн.	Т	М	Л
74	<i>Impatiens parviflora</i> DC.	Недотрога мелкоцветная	Майда гүлдүү кына	Одн.	Т	М	Л
Malvaceae // Мальвовые // Гүлкайырлар уруусу							
75	<i>Malva neglecta</i> Wallr.	Провирник пренебреженный	Катарда жок топчу баш, көмөч нан	Мн.	Г	М	Лг
Hypericaceae // Зверобойные // Сары чай чөптөрдөн							
76	<i>Hypericum perforatum</i> L.	Зверобой продырявленный	Тешикчелүү сары чай чөп	Мн.	Г	МК	Лг
77	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Зверобой шероховатый	Бодурактай сары чай чөп	Мн.	Г	МК	ЛС
Violaceae // Фиалковые // Ала гүлдүүлөрдөн							
78	<i>Viola isopetala</i> Juz.	Фиалка равнолепестная	Тең желекчелүү ала гүл	Мн.	Г	МК	Л
Umbelliferae/Apiaceae // Зонтичные // Чатырдуулар уруусу							
79	<i>Turgenia latifolia</i> (L.) Hoffm.	Тургия широколистная	Жазы жалбырактуу тургия	Одн.	Т	К	С
80	<i>Conioselinum tataricum</i> Fisch. ex Hoffm.	Гирчовник татарский	Татар керечи	Мн.	Г	М	Лг
81	<i>Ferula kelleri</i> K.-Pol.	Ферула Келлера	Келлер чайыры	Мн.	Г	МК	Лг
82	<i>Ferula kuhistanica</i> Korovin	Ферула кухистанская	Кухистан чайыры	Мн.	Г	МК	ЛС
83	<i>Ferula ovina</i> (Boiss.) Boiss.	Ферула овечья	Кой чайыры	Мн.	Г	МК	ЛС
84	<i>Heracleum dissectum</i> Ledeb.	Борщевик рассеченный	Бөлүктүү балтыркан	Мн.	Г	М	Лг
Convolvulaceae // Бьюнковые // Чырмооктор уруусу							
85	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	Бьюнок полевой	Талаа чырмоогу	Одн.	Т	МК	С
Polemoniaceae // Синюховые // Полемондор уруусу							
86	<i>Polemonium caucasicum</i> N.Busch.	Синюха кавказская	Кавказ полевону	Мн.	Г	М	Лг
Boraginaceae // Бурачниковые // Эндиктер уруусу							
87	<i>Lycopsis orientalis</i> L.	Кривоцвет восточный	Чыгыш ликопсиси	Одн.	Т	К	С
88	<i>Asperugo procumbens</i> L.	Асперуга простертая	Төшөлмө асперуга	Одн.	Т	М	ЛС
89	<i>Solenanthes circinnatus</i> Ledeb.	Трубкоцвет завитковый	үлүлдөй соланантус	Мн.	Г	М	Лг
Verbenaceae // Вербеновые // Вербеналар уруусу							
90	<i>Verbena officinalis</i> L.	Вербена лекарственная	Дары вербена, наркайсар	Одн.	Т	МК	ЛС
Labiatae // Губоцветные // Эрин гүлдүүлөр уруусу							
91	<i>Marrubium anisodon</i> C.Koch	Шандра неравнозубая	Арсак тиштүү ачуулук	Мн.	Г	К	С
92	<i>Sideritis montana</i> L.	Железница горная	Тоолук безчек	Одн.	Т	К	С
93	<i>Prunella vulgaris</i> L.	Черноголовка обыкновенная	Кадимки прунелла	Мн.	Г	М	Лг
94	<i>Stachyopsis oblongata</i> (Schrenk) Popov et Vved.	Стахиопсис продолговатый	Тууралжын стахиопсис	Мн.	Г	М	Лг
95	<i>Lamium album</i> L.	Яснотка белая	Ак дүлөй чалкан	Мн.	Г	М	Лг

I	II		III	VI	V	VI	
Labiatae // Губоцветные // Эрин гүлдүүлөр уруусу (продолжение)							
96	<i>Leonurus turkestanicus</i> V.Krecz. et Kuprian.	Пустырник туркестанский	Түркстан кан басымы	Мн.	Г	МК	ЛС
97	<i>Salvia sclarea</i> L.	Шалфей мускатный	Мускаттуу көк катын	Мн.	Г	К	С
98	<i>Ziziphora clinopodioides</i> Lam.	Зизифора пахучковидная	Жыттуу көкөмерен	Плжч.	Х	К	ЛС
99	<i>Melissa officinalis</i> L.	Мелисса лекарственная	Дарылык мелисса	Мн.	Г	М	Л
100	<i>Clinopodium integerrimum</i> Boriss.	Пахучка цельнокрайная	Жээги бүтүн клиноподиум	Мн.	Г	М	Лг
101	<i>Origanum tyttanthum</i> Gontsch.	Душица мелкоцветковая	Майда гүлдүү көк чай чөп	Мн.	Г	М	Лг
102	<i>Mentha asiatica</i> Boriss.	Мята азиатская	Азия жалбызы	Мн.	Г	Гиг.	Лг
Scrophulariaceae // Норичниковые // Чакалайчандардан							
103	<i>Verbascum songaricum</i> Schrenk	Коровяк джунгарский	Жунгар аюу кулагы	Двл.	Г	МК	ЛС
104	<i>Veronica biloba</i> Schreb.	Вероника двулопастная	Эки айчыктуу көк сайкал	Одн.	Т	МК	ЛС
105	<i>Veronica persica</i> Poir.	Вероника персидская	Персия көк сайкал	Одн.	Т	МК	ЛС
106	<i>Veronica verna</i> L.	Вероника весенняя	Жазгы көк сайкал	Одн.	Т	МК	ЛС
107	<i>Leptorhabdos parviflora</i> (Benth.) Benth.	Лепторабдос мелкоцветковый	Майда гүлдүү лепторабдос	Одн.	Т	МК	ЛС
Plantaginaceae // Подорожниковые // Бака жалбырактардан							
108	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Подорожник ланцетовидный	Устарадай бака жалбырак	мн.	Г	МК	ЛС
109	<i>Plantago major</i> L.	Подорожник большой	Чоң бака жалбырак	мн.	Г	МК	ЛС
Compositae // Сложноцветные // Татаал гүлдүүлөр уруусу							
110	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	Кониза канадская	Канада конизасы	Одн.	Т	М	ЛС
111	<i>Filago arvensis</i> L.	Жабник полевой	Талаа филагосу	Одн.	Т	К	С
112	<i>Achillea millefolium</i> L.	Тысячелистник обыкновенный	Кадимки каз таңдай	Мн.	Г	МК	ЛС
113	<i>Pyrethrum partheniifolium</i> Willd.	Поповник девичьелистный	Бийкечтей поповник	Мн.	Г	М	Л
114	<i>Lepidotheca suaveolens</i> (Pursh) Nutt. (<i>Matricaria matricarioides</i> (Less.) Porter)	Лепидотека душистая	Жыпар жыттуу лепидотека	Одн.	Т	МК	ЛС
115	<i>Artemisia absinthium</i> L.	Полынь горькая	Эрмен шыбак	Мн.	Г	МК	ЛС
116	<i>Ligularia thomsonii</i> (Clarke) Pojark.	Бузульник Томсона	Томсон кой жалбырагы	Мн.	Г	М	Лг
117	<i>Arctium leiospermum</i> Juz. et C.Serg.	Лопух гладкосемянный	Жылмакай уруктуу уйгак	Двл.	Г	МК	ЛС
118	<i>Arctium tomentosum</i> Mill.	Лопух войлочный	Тытыш түктүү уйгак	Двл.	Г	МК	ЛС
119	<i>Cirsium polyacanthum</i> Kar. et Kir.	Бодяк многоиглый	Жыш ийнелүү бука тикен	Мн.	Г	К	ЛС
120	<i>Cirsium turkestanicum</i> (Regel) Petrak	Бодяк туркестанский	Түркстан бука тикени	Мн.	Г	К	ЛС
121	<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.	Бодяк обыкновенный	Кадимки коко тикен	Мн.	Г	М	ЛС
122	<i>Onopordum acanthium</i> L.	Татарник колючий	Кадимки төө тикен	Двл.	Г	К	С
123	<i>Centaurea iberica</i> Trev. ex Spreng.	Василек иберийский	Иберия козу уйгагы, көз тикен	Двл.	Г	К	С
124	<i>Centaurea squarrosa</i> Willd.	Василек растопыренный	Барпагай козу уйгак	Двл.	Г	К	С

I	II		III	VI	V	VI	
<i>Compositae</i> // Сложноцветные // Тагаал гүлдүүлөр уруусу (продолжение)							
125	<i>Cichorium intybus</i> L.	Цикорий обыкновенный	Кадимки дарчын	Мн.	Г	МК	ЛС
126	<i>Lactuca serriola</i> L.	Латук дикий	Жапайы сүт тикен	Одн.	Т	М	ЛС
127	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	Одуванчик лекарственный	Дары каакым	Мн.	Г	М	ЛС

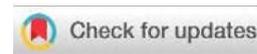
Примечание.

Список растений включает 127 видов высших/сосудистых растений, относящихся к 98 родам и 35 семействам.

Название растений приведено на ботаническом (латинском) // русском // киргизском языках.

В тексте приняты следующие сокращения по:

- ✓ биоморфам: дерево – Дер., полукустарничек – Плкч., кустарник – Куст., многолетник – Мн., двулетник – Двл., однолетник – Одн.;
- ✓ системе Раункиера: фанерофиты – Ф, хамефиты – Х, гемикриптофиты – Г, криптофиты – К, терофиты – Т.;
- ✓ экологическим группам (по отношению к влаге): мезофиты – М, мезоксерофиты – МК, ксерофиты – К, гигрофиты – Гиг.;
- ✓ эколого-фитоценотическим группам: лесные – Л, луговые – Лг, степные – С, лугово-степные – ЛС.



КРИОГИДРОМОРФНЫЕ ПАЛЕОПОЧВЫ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ КАК ИНДИКАТОРЫ ТЁПЛЫХ СТАДИЙ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА И ИХ СВЯЗЬ С ХОДОМ КРИОГЕНЕЗА

© 2023 В. С. Шейнкман ¹, С. Н. Седов ^{1,2}, В. А. Андроханов ³

¹Институт криосферы Земли, ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, ул. Малыгина, 86, Тюмень, 625026, Россия. E-mail: vlad.sheinkman@mail.ru

²Институт геологии Национального автономного университета Мексики, Университетский городок, Дель. Койоакан, г. Мехико, С.Р.04510, Мексика. E-mail: serg_sedov@yahoo.com

³ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: androhanov@issa-siberia.ru

Цель исследования. Установить и обосновать закономерности развития палеопочв севера Западной Сибири, выявить почвенные уровни, связанные с потеплениями климата во время морских изотопных стадий (МИС), а именно МИС-5, МИС-3 и в конце МИС-2.

Место и время проведения. Исследования проводили в течение последних 10 лет на репрезентативной территории между полярным кругом и широтным течением Средней Оби. Проведены палеопедологические и палеокриологические исследования с полевыми работами в бассейне р. Вах (правый приток Оби), р. Таз и р. Надым, где изучены разрезы с позднплейстоценовыми палеопочвами.

Методы. Основной методологией являлось детальное исследование плейстоценовых палеопочв на базе изучения взаимодействия процессов палеокриогенеза и криопедогенеза. Обнаруженные палеопочвы были сопоставлены с поверхностными голоценовыми почвенными профилями, что является важным элементом анализа палеопедологических летописей. Для возрастной диагностики палеопочв применяли ¹⁴C-датирование содержащихся в них органических остатков и гумусового вещества, а также U/Th-датирование по материалу палеопочв.

Основные результаты. Выявлено несколько палеопочвенных уровней: у почвы начальной подстадии МИС-5 (МИС-5e) были признаки лесного педогенеза, развивавшегося вне криолитозоны; у почв, завершающих подстадий МИС-5 и почвы МИС-3 – черты оглеения и участия криогенеза; почва конца МИС-2 лучше представлена оглеенными педоседиментами в псевдоморфозах по полигонально-жильным льдам. Изученные почвы указывают на мерзлотный характер почвообразующих осадков во все фазы позднего плейстоцена, кроме МИС-5e, что важно при оценке окружающей среды. В работе приведены данные о широком распространении в рассматриваемом регионе полигонально-жильных структур, представленных псевдоморфозами по эпигенетическим полигонально-жильным льдам, которые образовывались в самые холодные фазы МИС-4 и МИС-2. Псевдоморфозы образовались еще в условиях существования криолитозоны, имели синкриогенное развитие и были тесно связаны с формированием криогидроморфных палеопочв. Кроме того, по всей толще отложений МИС-3 характерны изначально-грунтовые жилы, также фиксирующие синкриогенное развитие этой толщи, но в условиях промерзания горных пород меньшей силы, чем в МИС-2. Тем не менее, в конце МИС-3, в верхних слоях ее толщи, тоже появляются криогидроморфные палеопочвы, фиксирующие приближение холодного времени МИС-2. Показано, что в заполнениях псевдоморфоз по полигонально-жильному льду хорошо сохраняется переотложенный материал криогидроморфных палеопочв, включая фрагменты гумусовых горизонтов. Продемонстрировано, что материал из таких переотложенных педоседиментов может быть использован для инструментального ¹⁴C- и U/Th-датирования и при отборе проб в палеоботанических исследованиях.

Заключение. Совокупность полученных данных отвергает гипотезу о формировании на исследованной территории в холодные эпохи плейстоцена холодных пустынь и ледниковых щитов и, соответственно, об образовании только климакстремальных почв. Показано существование на севере Западной Сибири в холодные эпохи плейстоцена развитого растительного и почвенного покрова при достаточном и местами избыточном увлажнении почв из-за близкого залегания кровли многолетней мерзлоты. Взаимодействия процессов палеопедогенеза и палеокриогенеза оставляет весьма информативные реликты, а их изучение позволяет получать высоко представительные данные о специфике почвообразования в прошлом.

Ключевые слова: палеопочвы; криогидроморфный педогенез; север Западной Сибири; плейстоцен.

Цитирование: Шейнкман В.С., Седов С.Н., Андроханов В.А. Криогидроморфные палеопочвы севера Западной Сибири как индикаторы тёплых стадий позднего плейстоцена и их связь с ходом криогенеза // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. е236. DOI: [10.31251/pos.v6i3.236](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.236).

ВВЕДЕНИЕ

Цель освещаемых в настоящей статье исследований обусловлена необходимостью обоснования надежных критериев прогноза климатических изменений и связанной с ними трансформации природной среды, что определяется ростом интереса к реконструкциям соответствующих процессов и явлений в прошлом, поскольку именно такие реконструкции, как правило, кладутся в основу прогностических построений. Все это вызывает повышенный интерес к различным палеоэкологическим летописям – палеогеографическим архивам, содержащим информацию об изменениях различных природных обстановок для разных интервалов геохронологической шкалы, прежде всего – для позднего плейстоцена, поскольку именно экстраполяция его событий наиболее реальна для создания базы прогностических сценариев развития природной среды.

Нужно подчеркнуть, что среди источников информации об эволюции природной среды важное место занимает почвенная память (Таргульян, Бронникова, 2019). Известно значение лессово-почвенных серий, рассматриваемых как одна из важнейших континентальных летописей четвертичных климатических циклов (Velichko, 1990; Bronger et al., 1998). Исследования объектов такого рода успешно проводили, например, на юге Западной Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012), но на территории к северу от лессовых областей информация о плейстоценовых палеопочвах была или весьма ограниченной, или отсутствовала вовсе. Так, на севере Западной Сибири (под которым мы понимаем ее территорию, расположенную севернее широтного течения Средней Оби) подобные объекты вообще ранее не изучали. Причина – традиционные представления о распространении на севере евроазиатского материка обширных ледниковых покровов и морских трансгрессий, из чего следовало: бесперспективно заниматься поиском палеопочв на данной территории, поскольку они не могли развиваться под мощной толщей льда или морской воды.

Тем не менее, в последние десятилетия произошёл пересмотр масштабов древних оледенений в Евразии в сторону их уменьшения. По крайней мере, эта точка зрения уже принята многими исследователями для позднего плейстоцена, главным образом, в восточном, континентальном секторе евроазиатского суперматерика (Svendsen et al., 2014; Möller et al., 2019). Была обоснована концепция и об отсутствии ледниковых щитов в плейстоцене на территории Сибири вообще, в том числе, на территории Западно-Сибирской низменности, где долгое время такие щиты предполагались в различных палеогеографических реконструкциях (Шейнкман и др., 2017; 2020). Отсюда следует, что на подобном свободном от ледникового покрова пространстве должны были формироваться ландшафты, предполагающие образование и возможное сохранение впоследствии древних почв.

Данный посыл послужил для авторов настоящей статьи стимулом для постановки соответствующей научной задачи, а затем и для организации и проведения комплекса исследовательских работ по поиску, анализу и интерпретации плейстоценовых палеопочв на севере Западной Сибири. Встретившись 10 лет назад на площадке одной из организованных силами Института почвоведения и агрохимии СО РАН Международных научных школ «Палеопочвы – хранители информации о природной среде прошлого», авторы обсудили постановку отмеченной научной задачи, решили объединить усилия и подключиться к ее решению, а затем начали реализацию непосредственно на территории севера Западной Сибири.

В качестве представительного региона был выбран ареал северной части Западной Сибири на пространстве между полярным кругом и субширотным участком среднего течения р. Оби, поскольку именно на этой территории большинство сторонников развития плейстоценовых ледниковых покровов предполагали (а некоторые из них считают возможным и сегодня) формирование подобного рода покровов, размещая их в своих построениях в ареале от Карского моря до отмеченного отрезка р. Обь.

В конечном итоге, применив свой опыт работы в области палеопочвоведения и палеокриологии, авторы настоящей статьи приступили к решению, по сути, принципиально нового круга проблем, ранее не освещавшихся в литературе. После проведения необходимого комплекса исследований были получены репрезентативные результаты, включающие открытие целого спектра палеопочв, в том числе, криогидроморфных палеопочв, которые, как оказалось,

имеют широкое распространение на севере Западной Сибири. Эти результаты и освещены в предлагаемой статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу настоящей статьи легли материалы изучения позднеплейстоценовых и голоценовых палеопочв, обнаруженных в ходе исследований, проведенных на рассматриваемой территории в течение последнего десятилетия. Для хроностратиграфической привязки отмеченных палеопочв использована, главным образом, морская изотопно-кислородная шкала (рис. 1) в варианте, представленном авторами работы (Lisiecki, Raymo, 2005), поскольку именно **морские изотопные стадии (МИС)** стали в настоящее время общепризнанной основой для глобальной стратиграфии и корреляции четвертичных геологических образований и событий – доступная детальная информация о морской изотопно-кислородной летописи имеется в монографии А.Е. Додонова (2002). Используются для идентификации обнаруженных палеопочв также терминология и названия, соответствующие подразделениям «Унифицированной стратиграфической схемы четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины» (2000). Это касается сопоставимого с МИС-5 – казанцевского, с МИС-4 – ермаковского, с МИС-3 – каргинского и, наконец, отождествляемого с МИС-2 – сартанского горизонта позднего плейстоцена, тогда как МИС-1 отражает ход голоцена (см. рис. 1). Именно эти стадии охватывают выявленные авторами настоящей статьи события с циклами активизации педогенеза на рассматриваемой территории.

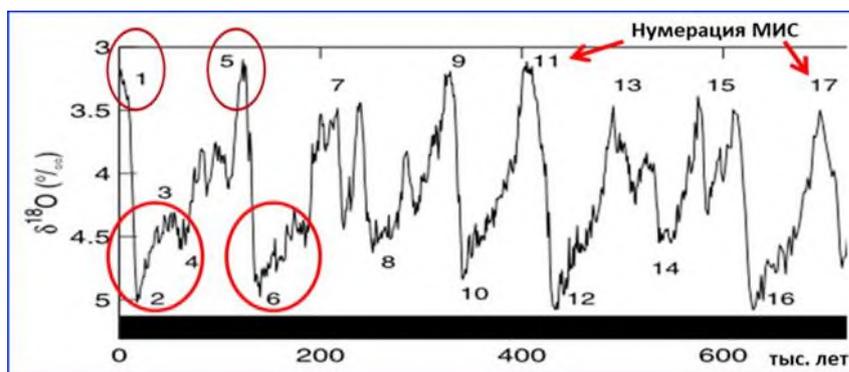


Рисунок 1. Палеогеографическая летопись для второй половины плейстоцена (по: Lisiecki, Raymo, 2005). Красным овалом выделен ход криохронов и термохронов в конце плейстоцена.

Поскольку главными климатическими циклами для последнего 1 млн лет геологической истории являются 100-тысячелетние макроциклы, а на протяжении их выделяются циклы меньшего ранга – **нечетные МИС**, отождествляемые с теплыми временами, или **термохронами**, и **четные МИС**, фиксирующие холодные времена или **криохроны** (см. рис. 1), то методически проводимые работы базировались на выявлении термохронов, в ходе которых могло активно развиваться почвообразование. Добавим, что холодные стадии в литературе обычно называются **стадиалами**, а теплые – **интерстадиалами**; отдельно выделяют главные термохроны, отделяющие друг от друга 100-тысячелетние циклы и нередко привычно называемые **межледниковьями** – исходя из устойчивой терминологии, используемой для районов покровных оледенений. В нашем случае главным термохроном является МИС-5, отделяющий поздний плейстоцен от среднего. Следующий термохрон, МИС-3, был обычного стадиального ранга и не достигал уровня, глубины и длительности главных термохронов; тем не менее, он, как и другие стадиальные циклы, соответствующие ходу МИС внутри главного 100-тысячелетнего цикла, представительно демонстрирует особенности протекания последнего, детализируя его ход. Чтобы не было путаницы, **теплые МИС** целесообразно называть **интерстадиальными термохронами**, а **холодные МИС** – **стадиальными криохронами**; такая терминология будет использована в дальнейшем тексте.

В целом в статье представлены результаты исследований педокомплексов, сформированных во время главного термохрона, имевшего место в МИС-5 и отделяющего последний (на протяжении геологической истории) 100-тысячелетний климатический цикл от аналогичного предыдущего цикла, а также палеопочвенных уровней, отражающих особенности хода данного

100-тысячелетнего климатического цикла. Это палеопочвенные уровни, образованные в интерстадиальный термохрон МИС-3 и в теплые фазы стадиальных криохронов МИС-4 и МИС-2. Отметим также, что палеопочвы, связанные с МИС-5 и МИС-4, изучены пока только в разрезе Белая Гора в долине р. Вах (рис. 2, участок 8); почвенные профили, сформировавшиеся в МИС-3 – в двух разрезах в бассейне этой реки (рис. 2, участки 7 и 8); по более молодым палеопочвам, сформировавшимся в терминальную фазу МИС-2, накопленный материал уже довольно обширен: к настоящему времени они изучены в шести разрезах в бассейнах р. Таз и р. Надым (рис. 2, участки 1–6), и в данной публикации рассмотрены наиболее репрезентативные из них.

Добавим также, что полученные результаты включают морфологическую характеристику изученных палеопочв, итоги определения их инструментального датирования различными методами абсолютной геохронометрии и палеоботаническую информацию, фиксированную в палеопочвенных уровнях и извлечённую из формирующего их субстрата. Все имевшиеся данные интерпретированы в плане сходства и различий природных обстановок отмеченных термохронов, а также в аспекте показа представительности места, которое занимают реликтовые признаки, свойства и горизонты в профилях современных поверхностных почв.



Рисунок 2. Расположение исследованных участков. Пояснения в тексте.

Методически сформированный авторами подход заключается в том, что, если покровных оледенений на изучаемой ими территории не было, то с большой вероятностью палеопочвенные объекты должны были в ее пределах сохраняться. Соответственно, выявленные почвенные горизонты смогут, как и в широко используемых лессово-почвенных палеолетописях, созданных по материалам юга Западной Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012), фиксировать теплые эпохи, но индикатором холодных эпох выступят не лессовые комплексы, как в этих летописях, а мерзлые толщи с чертами глубокого промерзания горных пород, которое должно быть характерно для рассматриваемого региона в плейстоцене в условиях отсутствия ледниковых покровов.

Иными словами, был поставлен вопрос о том, что для севера Западной Сибири нужно осуществить поиск и расшифровку палеолетописей нового типа – почвенно-мерзлотных летописей. Для этого требовалось разработать оптимальную стратегию выявления соответствующих криопедогенных объектов, причем с учетом параллельного существования, пока еще, на севере Западной Сибири разных моделей развития природы в холодные эпохи

плейстоцена, включая гипотезы и о формировании ледниковых покровов, и о безледниковом развитии этого региона. Поиск такого рода, собственно, и был проведен на репрезентативной территории между полярным кругом и широтным течением Средней Оби – на всем протяжении этого пространства выполнены палеопедологические и палеокриологические исследования с полевыми работами в бассейне р. Вах (правый приток р. Оби), р. Таз и р. Надым (см. расположение опорных участков на рис. 2), где и исследованы разрезы с обнаруженными позднеплейстоценовыми палеопочвами (Шейнкман и др., 2019).

Изученные палеопочвы были сопоставлены с поверхностными голоценовыми профилями, представленными альфегумусовыми почвами, что является важным элементом анализа палеопедологических летописей. Проанализированы и учтены работы исследователей, посвященные различиям дифференцированного перекрытия рассматриваемой территории в разные криохроны предполагаемыми ледниками. Если до 1990-х годов модели такого рода предполагали покрытие льдом всего севера Сибири (включая акваторию Карского моря), начиная с криохрона МИС-2 и дальше в глубь прошлого (Архипов, Волкова, 1994; Гросвальд, 2009), то затем началось обсуждение концепции ограниченности сибирских оледенений по причине недостаточной влагообеспеченности региона. Такой подход был весьма важен: в последующих моделях (Svendsen et al., 2014; Möller et al., 2019) покрытие ледниками рассматриваемого региона касалось лишь криохронов более древних, чем криохрон МИС-2, непосредственно для которого данная территория показывалась свободной от ледниковых щитов. Было учтено и то, что закономерности промерзания водоемов сегодня хорошо известны (Зубов, 1945; Деев, 2002); с этих позиций предположение о промерзании Карского моря в криохроны и формировании в его пределах в такие периоды ледникового щита, впоследствии надвигавшегося на континент, вообще мало реально. Уже простейшие расчеты, использующие разновидности решений известной задачи Стефана, в частности – по формуле видного исследователя морских льдов Арктики проф. Н.Н. Зубова (1945), показали, что даже в самые сильные криохроны Карское море могло промерзнуть только на первые десятки метров, и образующийся тогда морской лед не смог бы ни лечь на шельф, ни стать, тем более, базой для мощного ледникового щита (Шейнкман и др., 2017; 2020).

Авторы настоящей статьи остановились на следующей точке зрения: если в криохрон МИС-2 ледниковый покров на рассматриваемой территории отсутствовал, то он должен был отсутствовать и в предыдущие криохроны с близкими параметрами их хода – амплитудой и длительностью. Основывается такой подход на том, что глубина и объем основных криохронов и термохронов плейстоцена, особенно для последнего 1 млн лет – времени преобладания 100-тысячелетнего климатического цикла, однотипны на шкалах всех основных палеоклиматических летописей; наиболее четко это показано в сводке (Lisiecki, Raymo, 2005) – см. рис. 2. Такая ситуация обусловлена тем, что характер и закономерности общей циркуляции атмосферы, определяющий питание и режим ледников, имел в плейстоцене одни и те же черты (Шейнкман, Мельников, 2019; Sheinkman, 2016); в этом случае их размеры контролировались именно однотипной глубиной и длительностью криохронов.

Так или иначе, принимая во внимание, что, по крайней мере, для позднего плейстоцена среди исследователей консенсус относительно преимущественно безледникового развития севера Западной Сибири уже достигнут, было решено сосредоточить усилия на поиске палеопочв именно этого хроноинтервала – как репрезентативного для всего плейстоцена. Добавим, что недавно авторами было подготовлено обобщение по всем палеопедологическим результатам, полученным ими по северу Западной Сибири, включая составление сводной педостратиграфической колонки (в настоящее время оно находится в процессе публикации в журнале «Почвоведение») и ее корреляцию с палеопедологическими летописями сопредельных регионов. Поэтому ракурс предлагаемой в данном случае работы несколько иной – в ней подробнее рассмотрен феномен палеопедогенеза, который развивался на фоне стадийных событий внутри 100-тысячелетних климатических циклов: периодов относительных потеплений и похолоданий климата, соответствующих ритмике МИС – прежде всего, термохронам и криохронам.

Дело в том, что ранее, при базировании на лессово-почвенные серии, на относительно слабо развитые мерзлотные палеопочвы в Сибири вообще обращали мало внимания, поскольку основные усилия были направлены на исследование зрелых профилей почв с богатым набором педогенетических признаков. Такие почвы формировались длительное время в теплые эпохи, отделяя друг от друга толщи, маркирующие крупные климатические циклы. Однако, в последние десятилетия и палеопедологические уровни более низкого ранга стали привлекать внимание

исследователей (Sedov et al., 2022) – как маркеры для более детальных корреляций с геологическими летописями высокого разрешения, таких как полномасштабные керны ледниковых щитов или озерно-осадочные керны (Карабанов и др., 2001; Haesaerts et al., 2010; Rasmussen et al., 2014), а также как объекты геоархеологических исследований на памятниках среднего и верхнего палеолита (Седов и др., 2022). Собственно, учитывая востребованность материалов такого рода, акцент в настоящей статье и был поставлен на показе мало освещенных в литературе вопросов маркирования деталей эволюции природной среды севера Западной Сибири посредством выявленных механизмов криопедогенеза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Педогенез и особенности его проявления в хроноинтервале МИС-5 – МИС-4. Самая древняя из изученных палеопочв относится к казанцевскому времени – это один из главных термохронов плейстоцена, отделяющий, в нашем случае, поздний плейстоцен от среднего. Почва была обнаружена (Sheinkman et al., 2021) в разрезе Белая гора, расположенном на левом берегу р. Вах – в среднем её течении (см. рис. 1, участок 8). Как образованная в МИС-5, она была определена, будучи подтвержденной сначала запредельными для ^{14}C -метода возрастными определениями в виде ^{14}C -датировок > 40 тыс. лет назад (SOAN-7551, SOAN-7552) и $> 43,5$ тыс. лет назад (Beta 410188), а потом и более точной U/Th-датировкой LUU 1298TSD, которая дала возраст $103 \pm 9/7$ тыс. лет назад.

Характерно, что у данной палеопочвы мощный полигенетический профиль, который отражает длительное и многофазное развитие сформированного здесь древнего педокомплекса. Его суммарная мощность около 2 м (рис. 3), и он специфичен тем, что в нем выделяется два индивидуальных субпрофиля, которые связаны с разными этапами накопления аллювия и фиксируют разные фоновые условия седиментогенеза.

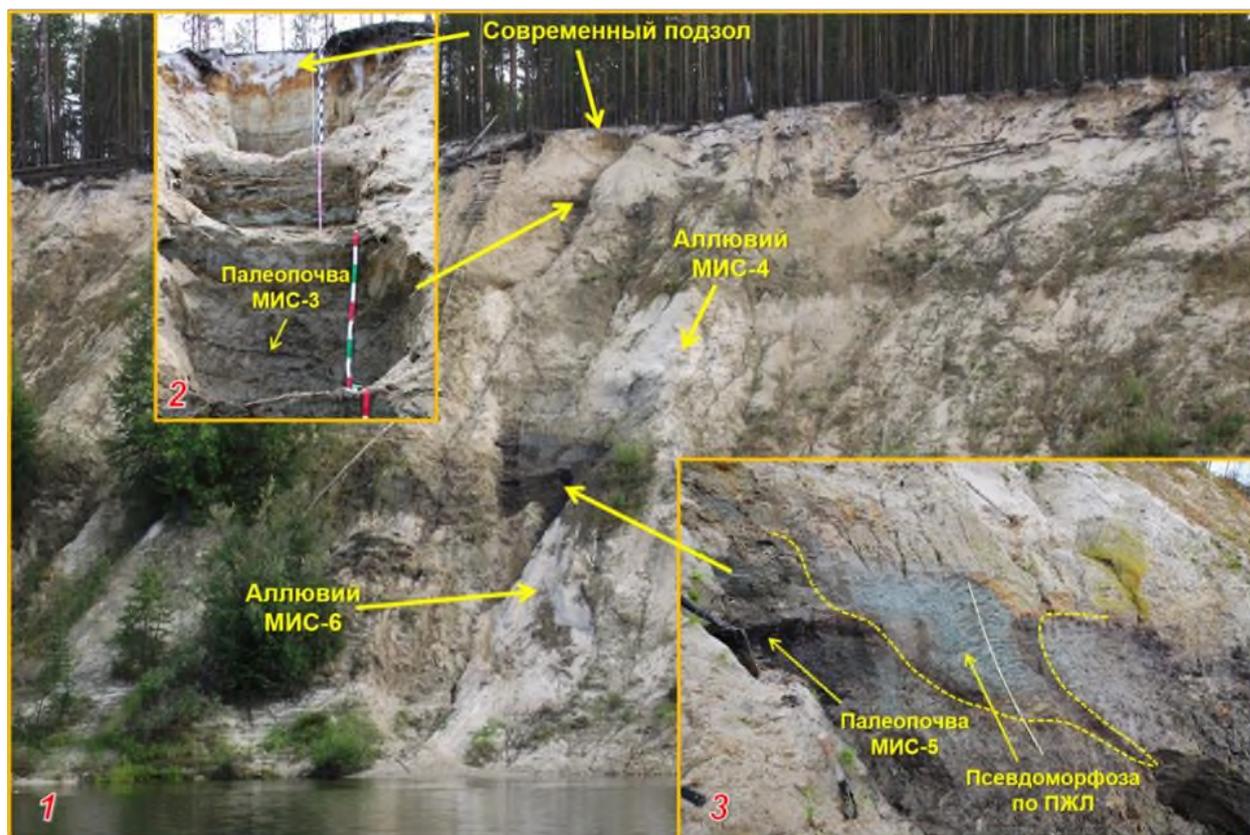


Рисунок 3. Разрез Белая гора: 1 – общий вид 35-метровой террасы р. Вах; 2 – верхняя часть разреза с палеопочвой МИС-3; 3 – центральная часть разреза с палеопочвой МИС-5. Фото В.С. Шейнкмана.

Верхний субпрофиль маломощный: его характеризует оглеенный горизонт с железистыми пятнами и разводами мощностью около 15 см, причем этот горизонт не отделен от кровли

нижележащего профиля горизонтом материнской почвообразующей породы и образует непосредственно с нижним субпрофилем единый педокомплекс. По простирацию верхнего субпрофиля прослеживается тонкий серый гумусо-глеевый горизонт; важно, что его черты свидетельствуют о том, что он активно подвергался мерзлотным деформациям.

На нижний субпрофиль приходится остальная часть мощности данного педокомплекса, и он более сложный по строению: верхняя его часть представлена торфянистым органомным горизонтом, который содержит фрагменты слаборазложившейся древесины; под ним залегают гумусовый и минеральный горизонты с сильными признаками застойного оглеения – с серо-сизой окраской. Таким образом, в нижнем субпрофиле отслеживаются признаки педогенетических процессов, относящихся к различным фазам почвообразования, что делает полигенетическим и этот субпрофиль. Фиксация в нем хорошо выраженных признаков сильного оглеения и накопления слаборазложившейся органики в верхнем оторфованном горизонте указывает на застойное переувлажнение; учитывая геоморфологическую позицию разреза, приуроченного к высокой террасе, сложенной хорошо дренируемым песчаным аллювием, и состав подстилающих профиль отложений – пески с высокой водопроницаемостью, реально предположить, что наиболее вероятной причиной застоя влаги в профиле было наличие в его основании водоупора из многолетнемерзлых пород.

При исследовании шлифов из горизонтов нижнего субпрофиля под микроскопом были вскрыты интересные явления. В торфянистом горизонте слаборазложившиеся растительные остатки сохраняли субпараллельную ориентацию (рис. 4-1). Отдельные фрагменты растительных тканей были включены в минеральную массу лежащего ниже горизонта – вероятно в результате процессов, обусловленных криотурбациями (рис. 4-2). Обнаружены внизу этого горизонта и глинистые натеки – не связанные с порами в теле почвы; причем они были существенно деформированными и включены в основную массу горизонта.

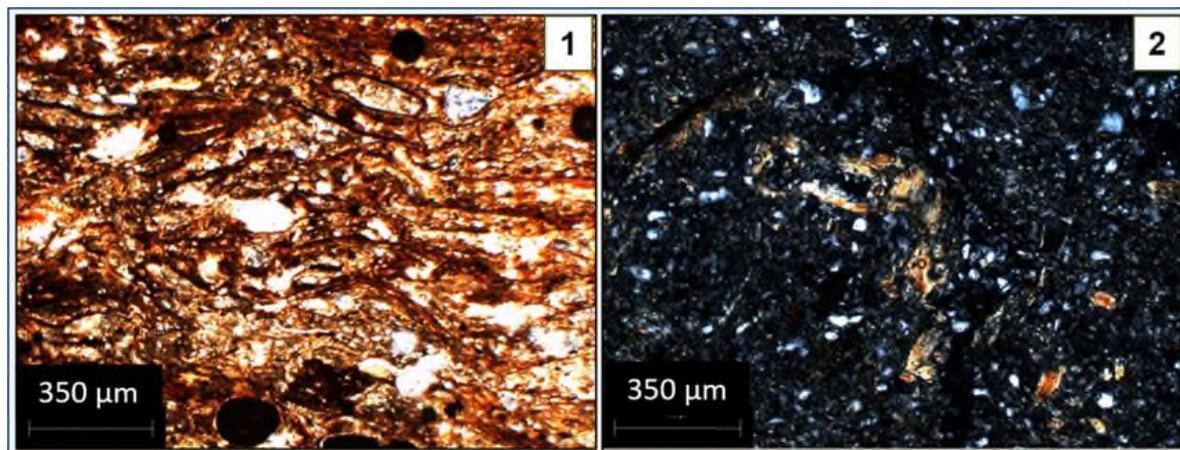


Рисунок 4. Микроморфологическое строение отдельных частей сформированной в МИС-5 палеопочвы. Фото С.Н. Седова. Пояснения в тексте.

Следовательно, с одной стороны, данный субпрофиль на одном этапе педогенеза фиксирует в своем строении мерзлотный характер почвообразования, протекавшего в прошлом, скорее всего, в тундровых экосистемах, а, с другой стороны – в нижней части этого субпрофиля наблюдаются признаки иллювирирования глины. Последнее требует свободного внутреннего дренажа в почвах, характерного для преимущественно влажных лесных экосистем; таким образом, можно сделать вывод о фиксации в данном случае смены фазы лесного почвообразования фазой криогидроморфного типа, сопровождавшейся образованием оглеенных горизонтов. Эта вторая фаза началась уже на завершающих этапах образования нижнего субпрофиля, приведя к оглеению сформировавшегося в лесных условиях субстрата почвы, а также к деформации и транслокации глинистых натеков. Затем этот процесс продолжился при формировании верхнего субпрофиля, связанного с большей активизацией мерзлотных процессов, и, соответственно, с большей степенью мерзлотного преобразования почвенного тела.

Наличие ранней фазы лесного почвообразования подтверждается и палеоботаническими материалами, показавшими обилие древесной пыльцы таежных видов в гумусово-глеевом горизонте нижнего субпрофиля, которые выше по разрезу сменяются представителями тундровых

экосистем. В подтверждение данного вывода говорят, в целом, и полученные в процессе проведенных исследований спорово-пыльцевые спектры по различным горизонтам рассмотренного педокомплекса.

Согласно результатам анализа, выполненного в ходе проведенных исследований Е.В. Безруковой и Л.С. Шумиловских (Sheinkman et al., 2021), в непосредственно перекрывающем педокомплекс суглинистом аллювии состав спектра, будучи весьма характерен, показателен для конца периода формирования педокомплекса: в нем преобладают травянистые растения – злаки, полыни, маревые; древесных видов меньше и среди них превалирует карликовая береза. Такой состав спорово-пыльцевого спектра резко отличен от спектров по расположенным ниже горизонтам педокомплекса – они фиксируют значительные изменения растительного покрова. У полученных по этим горизонтам спектров состав радикально меняется: они характеризуются обилием древесной пыльцы (до 60%), причем в ее составе больше всего ели и березы, но присутствует также пихта, ель и сосна. Следовательно, эти данные свидетельствуют о смене лесных ландшафтов тундровыми, подтверждая закономерность отмеченного перехода от лесных почв к характерным для тундры криогидроморфным почвам.

Упомянутая U/Th-датировка LUU 1298TSD, давшая возрастное определение $103 \pm 9/7$ тыс. лет назад, была получена по материалу отмеченного выше торфянистого горизонта и соответствует времени МИС-5с, отражая минимальный возраст педокомплекса. Предполагаем, что лесная фаза почвообразования была связана с достаточно длительной тёплой подстадией МИС-5е. Проявившаяся позднее криогидроморфная фаза может быть тогда обусловлена последующими более холодными подстадиями МИС-5, переходящими в ермаковский стадийный криохрон МИС-4, во время которого промерзание горных пород резко усилилось, что подтверждается тем, что весь педокомплекс в то время был рассечен клиньями полигонально-жильного льда. На рисунке 3-3 видно, что по такому льду впоследствии была сформирована ясно выраженная псевдоморфоза, заполненная оглеенными педоседиментами.

Характерно, что во время холодного стадийного криохрона МИС-4 процесс почвообразования в значительной мере должен был быть замедлен, а порой и законсервирован. Но затем он был несколько активизирован в терминальную фазу данного стадийного криохрона, когда еще на продолжающем существовать некоторое время, лежащем на небольшой глубине основании сезонно-талого слоя стал протекать процесс почвообразования криогидроморфного типа. Этот процесс был сопряжен с процессами терминальной фазы стадийного криохрона МИС-4, когда началось, на наш взгляд, таяние полигонально-жильного льда, сформировавшегося ранее в этом криохроне: оно завершилось с наступлением следующей теплой эпохи – интерстадийного термохрона МИС-3. Свидетельствует об этом процессе то, что описанная палеопочва обрамляет каймой, в несколько сантиметров толщиной, псевдоморфозу по отмеченному полигонально-жильному льду (см. рис. 3-3). Возможен такой процесс, когда температура горных пород становится выше значений, благоприятных для развития полигонально-жильного льда, вызывая его таяние и постепенное освобождение занимаемого им пространства. Если при этом вмещающие лед породы останутся определенное время мерзлыми, почва, ранее сопряженная с поверхностью головки полигонально-жильного льда, начинает оползать по его еще холодным стенкам, примерзая к ним, образуя своеобразное окаймление, и затем захораниваться. Иными словами, процесс формирования псевдоморфозы с заполнением ее сползающими по стенкам тающего полигонально-жильного льда педоседиментов и минерального субстрата носил синкриогенный характер.

Подчеркнем только, что речь идет в данном случае о событиях не термохрона, а более короткого своеобразного хроноинтервала – тёплой терминальной фазе стадийного криохрона МИС-4. Подобная фаза была отражена и в седиментогенезе конца сартанского, по сибирской терминологии, стадийного криохрона МИС-2, о чем речь пойдет ниже.

Таким образом, все палеопочвы, сформированные в МИС-5, благодаря проявлению процессов накопления в них гумуса и сопутствующих им процессов, маркируют теплые периоды, в которые они были образованы. Только в одном случае это один из главных плейстоценовых термохронов, отделяющий поздний плейстоцен от среднего, а в другом – теплые фазы, показывающие в рассматриваемом регионе одну из ситуаций, отражающих специфику хода последнего 100-тысячелетнего климатического цикла, и демонстрирующие, что их проявление имело место в относительно прохладной среде, сопровождаясь развитием, по крайней мере, высокотемпературных многолетнемерзлых пород, но, тем не менее, эти фазы отличались

относительно теплыми климатическими условиями. Конкретно в описанной ситуации это касается условий проявления терминальной фазы стадийного криохрона МИС-4, когда низкотемпературную криолитозону, развитие которой сопровождалось формированием полигонально-жильного льда, сменили условия промерзания горных пород меньшей силы, обеспечивая таяние этого льда и формирование наследующих его псевдоморфоз.

Педогенез и особенности его проявления в хроноинтервале МИС-3. В отложениях МИС-3 – каргинской, по сибирской терминологии, эпохи, были встречены аллювиальные синседиментационные палеопочвы и криогидроморфные палеопочвы. Аллювиальные палеопочвы, формирующиеся в результате разложения намывного детрита, встречались во многих местах в каргинских, МИС-3, отложениях. Хорошо выраженные профили палеопочв с соответствующим набором горизонтов, относящиеся к каргинскому, МИС-3, интерстадийному термоохрону, встречаются реже. Они обнаружены и изучены в упомянутом выше разрезе Белая Гора на р. Вах (см. рис. 1, участок 8, и рис. 3-2) и в разрезе Зеленый остров (см. рис. 1, участок 7) на р. Сабун, правом притоке р. Вах (Sheinkman et al., 2016; Sedov et al., 2016). Эти палеопочвы приурочены к слоям, расположенным в верхних частях разрезов аллювиальных отложений, сформировавшихся, как показало ^{14}C -датирование по органическому веществу палеопочв, в конце каргинского МИС-3 времени. Проведенное датирование и полученные возрастные определения, располагающиеся в интервале 26 – 35 тыс. лет назад, ясно свидетельствуют об этом (Sheinkman et al., 2022).

Представлены данные почвы профилями с ярко выраженным застойным оглеением: сизые и зеленоватые тона у них сочетаются с наблюдаемыми в шлифах почв железистыми новообразованиями – стяжениями и полосами. Кроме того, в их строении наблюдаются признаки мерзлотного воздействия, например, проявление деформации гумусового горизонта и вовлечения органических остатков в материал минерального горизонта, что обычно связано с криотурбациями, тогда как фиксируемое формирование компактных микроагрегатов относится к результатам криогенного структурообразования. Все говорит о том, что эти почвы являются продуктом криогидроморфного педогенеза, протекавшего на основании сезонно-талого слоя в условиях неглубокого расположения кровли многолетней мерзлоты. Их современными аналогами являются тундровые глеевые или мерзлотно-таёжные почвы холодных континентальных бореально-лесных областей.

Приуроченность отмеченных палеопочв именно к верхним слоям каргинской, МИС-3, толщи аллювиальных отложений закономерно. Причина – как и в описанном выше случае с казанцевской, МИС-5, палеопочвой – прогрессирующее при приближении к последующему стадийному криохрону промерзание горных пород должно было создать соответствующие условия для проявления криогидроморфизма.

Проблема заключается в том, что недавно была опубликована точка зрения (Слагодина и др., 2022), согласно которой в пределах рассматриваемой территории каргинское время своей большей частью сопровождалось формированием полигонально-жильных льдов, являющихся индикатором низкотемпературной криолитозоны. Вопрос этот принципиальный, поскольку касается внесения кардинальных правок в освещение позднеплейстоценовых событий на севере Западной Сибири. Поэтому остановимся на нем подробнее.

В работе Е.А. Слагодина с соавторами (2022) представлено описание керна малого диаметра (5 см) из 9-метровой скважины, пройденной по аллювиальным отложениям на междуречье рек Пур и Таз в их низовьях, вблизи побережья Тазовской губы. В этой толще на глубине 5,2 и 7,7 м, судя по представленным материалам (Слагодина и др., 2022), были отобраны образцы растительного детрита, по которому получены две ^{14}C -датировки, показавшие, как и в нашем случае, каргинский МИС-3, возраст изучаемых отложений, а точнее, первой половины каргинского времени (рис. 5). Добавим, что данные возрастные определения оказались близки по величине к возрасту, полученному по ряду возрастных ^{14}C -определений по отобраным нами образцам (Шейнкман и др., 2020; Sheinkman et al., 2021; Sedov et al., 2022) в низовьях р. Надым вблизи Обской губы – из разрезов, вскрывающих каргинские отложения, сопряженные с теми, что описаны в работе (Слагодина и др., 2022).

Интересным оказалось и сравнение палеоботанических данных, полученных в ходе проведенных авторами настоящей статьи исследований, с теми, что приведены в литературе (Слагодина и др., 2022). В двух образцах растительного детрита, представленных в работе (Слагодина и др., 2022) в нижней части каргинской толщи (см. рис. 5), описаны мхи рода *Drepanocladus spp.* Согласно анализу, выполненному Е.В. Безруковой в ходе исследований (Шейнкман и др., 2022),

эти мхи распространены в хвойных и смешанных лесах, кустарниковых зарослях, на покрытых гумусно-мелкоземным слоем скалах и валунах, на гнилой древесине, пнях, валежнике, выступающих корнях и стволах деревьев и, реже, увлажненной гумусной почве. В арктических тундрах и лесах это широко распространенные виды, для которых главное, чтобы местные условия были влажными. По мнению с Е.В. Безруковой, представленному в совместной работе (Шейнкман и др., 2022), мхи рода *Calliergon* spp. в образце на глубине 7,7 м (см. рис. 5) растут во влажных условиях – на сфагновых болотах или самостоятельно, в переувлажненной среде обитания. Тогда как мхи рода *Brachythecium* spp., фиксированные там же, обычны в Арктике, наиболее часто встречаясь в ивняках; сегодня они широко распространены, например, в Якутии, где растут на почве и скальных выходах в зарослях ольховника и лиственничных редколесьях, т.е. предпочитая влажную среду обитания.

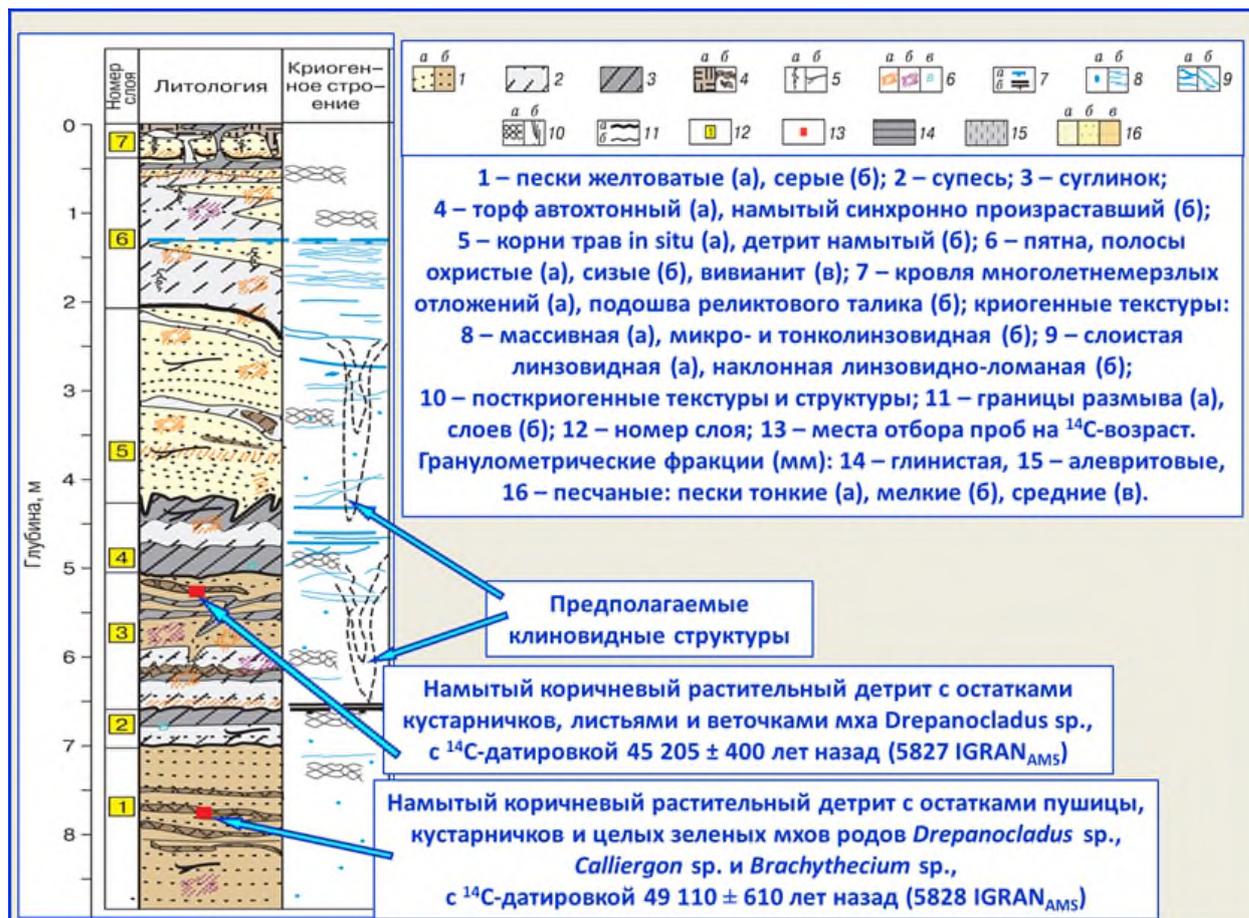


Рисунок 5. Данные по керну 9-метровой скважины, пробуренной на междуречье рек Пур и Таз в их низовьях (по: Слагода и др., 2022, с пояснениями авторов настоящей статьи).

Иными словами, упомянутые виды мхов выбирают холодные и влажные условия среды обитания: на болотах, в поймах рек, просто на влажной почве. Они характеризуют, таким образом, прохладные и влажные климатические условия, что согласуется с характеристиками среды, реконструируемой по каргинским, МИС-3, отложениям и в изученных, в ходе проведенных авторами настоящей статьи исследованиях, разрезах, отмеченных на рис. 2 (см. ниже).

Противоречие заключается в том, что в работе Е.А. Слагоды с соавторами (2022) на основании косвенных данных в виде фиксации отдельных деталей клиновидных структур, полученных по керну малого диаметра (5 см), сделано предположение о возможной фиксации двух ярусов крупных клиновидных структур (см. рис. 5), которые там обозначены как псевдоморфозы по полигонально-жильному льду. Однако полигонально-жильные льды, как представители низкотемпературной криолитозоны, согласно Н.Н. Романовскому (1977) в песках образуются, как отмечено выше, при температуре многолетнемерзлых пород -5 – -6°C и характерны в рассматриваемом регионе для стадияльных криохронов, в частности, для сартанского стадияльного криохрона, протекавшего в МИС-2, а не для каргинского, МИС-3,

интерстадиального термохрона. Хотя время последнего и было, как свидетельствуют палеоботанические данные и палеоклиматические летописи, довольно прохладным (Шейнкман и др., 2022; Sheinkman et al., 2016; 2022; Sedov et al., 2022), оно, тем не менее, характеризовалось не настолько сильным охлаждением окружающей среды, чтобы могла формироваться низкотемпературная криолитозона, обеспечивающая формирование в песках полигонально-жильного льда. Развитие криолитозоны с подобными показателями не согласуется с фоновыми условиями криолитогеоза каргинского, МИС-3, времени. Кроме того, только косвенных данных, в виде фиксации отдельных деталей клиновидных структур в керне малого диаметра, для реконструкции полигонально-жильных льдов недостаточно. На наш взгляд, для этого нужны репрезентативные, полноценно представленные структуры, отраженные в строении осадков, вскрытых соответствующими разрезами (подобно тем, что описаны ниже).

Что касается реконструкции клиновидных структур, предполагаемых в работе (Слагода и др., 2022) как псевдоморфозы по полигонально-жильному льду, их формирование, на наш взгляд, отражает процесс развития изначально грунтовых жил. Это те же клиновидные структуры, того же генезиса, что и полигонально-жильный лед, поскольку суть и тех, и других – образование ледяных жил по полигонам морозобойных трещин. Только в случае изначально грунтовых жил это (Романовский, 1977) изначально небольшие сезонные, вытаявающие к концу лета ледяные жилы, обычно замещаемые к концу теплого сезона года грунтовой массой, оседающей вдоль стенок, окаймляющих жилы. Иными словами, развитие изначально-грунтовых жил сопровождается развитием ледяных тел, но имеющих небольшие размеры и являющихся сезонными формами, порой представленных летующими образованиями – перелетками, формирующимися в условиях высокотемпературной криолитозоны. Такие формы в ходе прогрессирующего похолодания климата фактически являются предшественниками полигонально-жильного льда, отражая ситуации с менее холодными условиями. Они, как будет показано ниже, широко представлены на рассматриваемой территории в каргинских, МИС-3, отложениях по всей их толще, располагаясь на разной глубине и нередко образуя в этой толще многоярусные системы. Размеры и положение изначально грунтовых жил, изученных авторами настоящей статьи, вполне соответствуют предполагаемым клиновидным структурам, отображенным (см. рис. 5) в работе (Слагода и др., 2022).

Рассмотрим детали формирования криогидроморфных палеопочв, выявленных в ходе проведенных исследований, как характерных для каргинского, МИС-3, времени педогенных образований. В разрезе Белая гора такая палеопочва залегает, как отмечалось выше, неглубоко от поверхности – в 4,5 м от нее (см. рис. 3-3) и состоит из оглеенного гумусового и сизого глеевого горизонтов. Она маломощная – толщина ее наиболее хорошо выраженного реликта составляет всего несколько сантиметров. Тем не менее, палеопочва хорошо выражена и особенностью вмещающего ее слоя является то, что в нем гумусовый горизонт деформирован и порой разорван, а глеевый горизонт хорошо оструктурен – он характеризуется мелкоореховатой структурой, сформированной по густой сети трещин, и, на наш взгляд, связан с формированием сетчатой криогенной текстуры вмещающих почву отложений.

Каргинский, МИС-3, возраст данной палеопочвы подтверждается результатом ^{14}C -датирования ее гумусового вещества, калиброванный возраст формирования которого определен в 35170 ± 350 лет (Beta-410187). Это соответствует второй половине каргинского, МИС-3, интерстадиального времени (Sheinkman et al., 2016; 2021) и, в целом, данная почва дает неплохое представление об особенностях педогенеза, хотя ее профиль был неполный. Наиболее репрезентативным представителем каргинского, МИС-3, криохрона оказалась палеопочва, изученная в ходе проведенных исследований в разрезе Зеленый остров – обрыве речной террасы на р. Сабун, правом притоке р. Вах (см. рис. 1, участок 7). Здесь представлен практически полный профиль относящейся к каргинскому, МИС-3, интерстадиальному термохрону погребенной почвы: общая мощность образуемого ею педокомплекса составляет около полуметра, а ее возраст подтвержден результатом ^{14}C -датирования ее органического вещества – по гумусу верхних почвенных горизонтов, по которому получен калиброванный возраст 25 693 – 27 748 лет назад (SOAN-7550).

Данная палеопочва расположена на небольшой глубине в 3,5 м от поверхности (рис. 6). Ее датирование проведено по верхним почвенным горизонтам, в силу чего результат указывает на возраст, близкий ко времени погребения почвы, и позволяет судить о том, что, как и в разрезе Белая Гора, процесс почвообразования в разрезе Зеленый остров, в основном, протекал во второй

половине МИС-3. В верхней части профиля располагался гумусово-глеевый горизонт серо-бурой окраски, с обильными включениями растительного детрита, а ниже залегал серовато-желтый пятнистый оглеенный горизонт с ржавыми разводами. Проведение микроморфологического анализа выявило для этой палеопочвы ряд педогенетических признаков, специфичных для данного педокомплекса.



Рисунок 6. Разрез Зеленый остров. Фото В.С. Шейнкмана.

С одной стороны, в строении педокомплекса обнаружены явные следы криогенных процессов, таких, как сепарация крупных песчаных зёрен, стяжения железа. С другой стороны, к нашему удивлению, были диагностированы и карбонатные новообразования; тем не менее, их присутствие закономерно и ниже будет дано объяснение фиксируемому феномену.

Если по верхнему горизонту палеопочвы микроморфологические исследования в рассматриваемом разрезе показали обилие слабо разложившихся растительных остатков, интегрированных в гумусированную массу и имеющих разнообразное пространственное расположение (рис. 7-1), то в глеевом горизонте этой палеопочвы, как выяснилось, основная минеральная масса имеет компактное сложение; однако распределение частиц разного размера в ней неравномерное: кластеры песчаных зёрен чередуются с участками концентрации тонкодисперсного материала, вероятно, за счёт криогенной сортировки. Обнаружены также многочисленные железистые стяжения округлой и полосчатой конфигурации (рис. 7-2) и неожиданная находка (рис. 7-3) упомянутых карбонатных новообразований в виде небольших спаритовых стяжений. Присутствие новообразованных карбонатов, а также выявленное преобладание в составе гумуса данной почвы фракций гуминовых и фульвокислот, связанных с кальцием и слабым выщелачиванием, указывает на фоновые условия формирования подобных

почв в обстановке достаточно холодного континентального климата с ограниченным увлажнением.

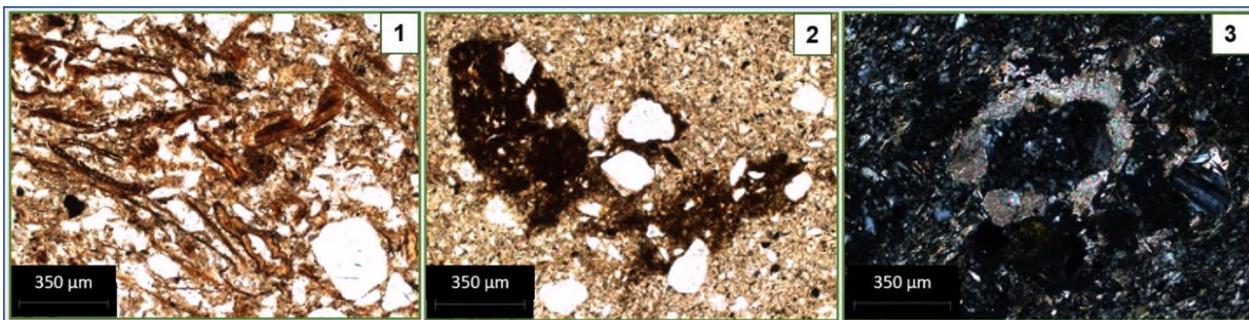


Рисунок 7. Микроморфоскопия палеопочвы МИС-3. Фото С.Н. Седова. Пояснения в тексте.

Выполненные Л. Шумиловских в ходе проведённых работ палинологические исследования (Sheinkman et al., 2016) подтверждают эту версию (рис. 8). Они демонстрируют состав спорово-пыльцевых спектров тундрово-степной тип древнего растительного покрова во время накопления осадков рассматриваемой толщи, которое можно ассоциировать со второй половиной каргинского, МИС-3, термохрона. В образцах, отобранных из данной палеопочвы, прослеживается однообразие спорово-пыльцевых спектров и доминирование видов *Artemisia* и *Poaceae*, вместе с видами *Betula sect. Nanae/Fruticosae* отражает развитие открытой тундро-степи с березой в сухой, хорошо дренированной местности вблизи лиственничного леса. При этом анализ таких растительных остатков, как *Eriophorum*, *Carex*, *Potentilla* и *Luzula* с берёзой и ивой, в верхних горизонтах палеопочвы показал, что во время их формирования стало проявляться развитие заболоченной местности. Тогда как в перекрывающих палеопочву слоях суглинка выявлено резкое сокращение отмеченных видов и доминирование представителей кустарниковой тундры, характеризующей местность уже с усилением регионально обусловленного увлажнения, что хорошо объясняется меньшим испарением и ухудшением дренажа, связанным с появлением мерзлотного водоупора.

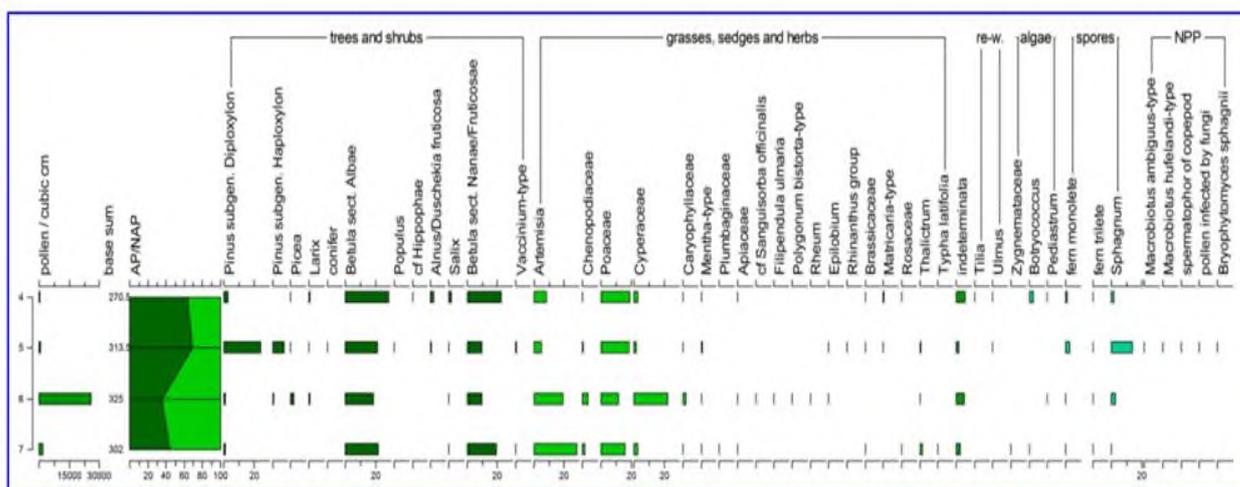


Рисунок 8. Палинологическая диаграмма по разрезу Зеленый остров (по: Sheinkman et al., 2016).

Подчеркнем: в обоих, из упомянутых, разрезах каргинских отложений уровни описанной палеопочвы были прослежены по простираю на значительных пространствах и нигде не было обнаружено связанных с ними псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам. В отложениях этой генерации осадков прослеживались клиновидные структуры, но только иного типа – изначально грунтовые жилы, требующие для своего возникновения промерзания горных пород намного меньшей силы, чем необходимо для формирования полигонально-жильных льдов.

Таким образом, все полученные материалы говорят о том, что, с одной стороны, потепление климата в интерстадиальный термохрон МИС-3 не достигало уровня главного термохрона

позднего плейстоцена – МИС-5е, казанцевского, и МИС-1 – голоцена, когда многолетняя мерзлота исчезала в дренированных позициях песчаных отложений. С другой стороны, это потепление было достаточным, чтобы не допустить развитие полигонально-жильных льдов в песчаных толщах, но, в то же время, не настолько глубоким, чтобы в этих толщах не могли образовываться многолетнемерзлые породы, обеспечиваемые промерзанием меньшей силы, чем то, что необходимо для формирования полигонально-жильных льдов.

Педогенез и особенности его проявления при переходе от МИС-2 к МИС-1. Интересны и специфичны палеопочвы, соответствующие потеплению климата в конце сартанского, МИС-2, стадийного криохрона – в его терминальную фазу. Они выявлены как криогидроморфные палеопочвы в разрезах, отражающих трансформацию, в ходе криохрона МИС-2, приповерхностных частей каргинской, МИС-3, толщи аллювиальных отложений, причем на всем протяжении рассматриваемого региона к северу от Сибирских Увалов (см. рис. 1, участки 1–6). Реликты криогидроморфной палеопочвы, формировавшейся в терминальную фазу сартанского, МИС-2, стадийного криохрона, были обнаружены, прежде всего, на былом основании сезонно-талого слоя; как заполняющие псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам глеевые педоседименты они были вскрыты в виде переотложенного материала сильно оглеенных горизонтов криогидроморфных палеопочв с включениями гумусированных и оторфованных фрагментов.

Напомним, что ранее в регионе на такие почвы или не обращали должного внимания, или, если в основу развития природы в прошлом брали формирование ледниковых щитов, сохранение палеопочв под которыми отрицалось, или холодных пустынь, в пределах которых развитие почвообразование должно было отсутствовать, поиск реликтов палеопочв просто не проводился. Нужно также учесть, что криогидроморфные палеопочвы, которые должны закономерно образовываться (Горячкин и др., 2019) в выявленных в регионе условиях криохронов (Sheinkman et al., 2016; 2021), в первозданном виде обнаружить непросто. Залегая неглубоко от поверхности, чаще они проявляют себя в виде реликтов, редуцированных иллювиальным горизонтом вышележащих подзолов, и в представительной форме сохраняются именно как переотложенные педоседименты в заполнении псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам. Главное состоит в том, что такой переотложенный материал весьма информативен, он содержит фрагменты гумусовых горизонтов с содержанием органического вещества, характеризующих палеопочвы, и позволяет проводить по нему ^{14}C -датирование. Кроме того, как было отмечено выше, из образцов заполнений псевдоморфоз удавалось получать репрезентативные спорово-пыльцевые спектры.

С другой стороны, коллизия заключается в том, что различные авторы интерпретировали строение осадков на рассматриваемой территории по-разному. Появилось мнение (Зыкина и др., 2017), что на ее пространстве в позднем плейстоцене могли существовать ландшафты, подобные тем, что формируются в крайне сухих и холодных условиях Сухих долин Мак-Мёрдо в Антарктиде, где возможно развитие только климаэкстремальных, по (Горячкин и др., 2019), почв.

Суть таких предположений отражает факт того, что на входе строящихся моделей в качестве доминант могли ставиться те их элементы, которые доминантами не являются (Шейнкман, Мельников, 2019). Ранее в работе А.А. Величко с соавторами (Velichko et al., 2011) было выдвинуто предположение, что в сартанский, МИС-2, криохрон на севере Западной Сибири формировалась холодная пустыня с активным протеканием эоловых процессов; обосновано это было тем, что в песках под голоценовыми торфяниками авторами работы (Velichko et al., 2011) отмечены следы эоловой обработки. Однако во многих районах с низкотемпературной криолитозоной это характерно для аллювия в качестве локального явления и без доминирования пустынных экосистем (Галанин, 2021).

После выполнения в ходе проведенных исследований микроморфоскопического анализа кварцевых зёрен в изученных осадках МИС-2 (Sheinkman et al., 2022), было отмечено эоловое участие в обработке исходных отложений, но при этом выявлено: оно не превалирует. В осадках сочеталось криогенное, ветровое и флювиальное воздействие, фиксируя, что и в условиях МИС-2, как холодного и сухого криохрона, летом водотоки в регионе были свободны ото льда, питаются талыми снеговыми и дождевыми водами, а сверху мерзлой толщии был развит сезонно-талый слой. Однако в работе В.С. Зыкиной с соавторами (2017) акцент на развитии здесь во время МИС-2, в сартанском стадийном криохроне, холодной пустыни был усилен, и сделано это за счёт неправомерного, с позиций палеокриологического развития региона, наделения доминантными свойствами элементов криогенных геосистем подчинённого значения.

Рассмотрим отмеченные явления на репрезентативных примерах. Один из них – это разрезы аллювиальных отложений на левобережье р. Надым у впадения в нее р. Хейгияха, где расположен карьер (см. рис. 1, участок 1), вскрывающий широкий набор палеокриогенных, педогенных и посткриогенных образований (рис. 9). Река врезается здесь в прилегающую к Обской губе равнину и, при уровне воды на отметках около 10 м, образует 15–20-м террасы, относящиеся к категории второй надпойменной террасы. Карьер вскрыл песчаное тело одной из них, сформированное, как показало проведенное ^{14}C -датирование слагающих его осадков по остаткам захороненного в нем органического вещества (Sheinkman et al., 2022; Sedov et al., 2022), во второй половине каргинского, МИС-3, интерстадиального термохрона. Впоследствии эти осадки во время сартанского, МИС-2, стадиального криохрона были рассечены полигонально-жильными льдами, по которым, со временем, сформировались псевдоморфозы.



Рисунок 9. Расчистка стенки карьера на левом берегу р. Надым вблизи устья р. Хейгияха. Фото из архива В.С. Шейнкмана.

На террасу здесь налегает активная дюна (см. рис. 9), которая признана фактором динамичного перемещения материала в условиях холодной пустыни (Зыкина и др., 2017); хотя это, как показали исследования (Шейнкман, Мельников, 2019), молодая форма, возникшая на месте сгоревшего леса и налегающая на хорошо развитый, датированный как образованный в середине голоцена (Шейнкман и др., 2022), подзол – индикатор таёжных экосистем. Добавим, что полигонально-жильные структуры данного разреза В.С. Зыкиной с соавторами (2017) отнесены к первично песчаным жилам – индикатору крайне холодных и сухих условий, встречаемых только в Сухих Долинах Мак-Мёрдо в Антарктиде. Причем такое отнесение было сделано лишь на основе отдельных внешних черт полигонально-жильных структур: того, что они небольшой высоты, узкие, с песчаным, порой, полосчатым заполнением. Тогда как главным их признаком, говорящим о развитии в условиях низкотемпературной криолитозоны, но в обстановке с активной деятельностью талых вод, не уделялось внимание.

Прежде всего, к таким признакам относится формирование на основании бывшего сезонно-талого слоя на пространстве между полигонально-жильными структурами, криогидроморфных, с характерной каймой оглеения, палеопочв, сопряжённых с обрамлением крупных клиновидных образований, определенных (Sheinkman et al., 2022; Sedov et al., 2022) как псевдоморфозы по эпигенетическим полигонально-жильным льдам. Вместе с тем, аналогом модели развития региона предлагалась именно гипераридная и суперхолодная область Сухих Долин Мак-Мёрдо в Антарктиде (Зыкина и др., 2017).

Эта область – уникальное место: оно находится на юге антарктического материка и характеризуется весьма низкой температурой воздуха в течение всего года и многолетним отсутствием атмосферных осадков. В таких условиях оттаивание многолетнемерзлых пород не происходит, и их кровля совпадает с дневной поверхностью (Абрамов и др., 2011); но подобные обстановки в прошлом на севере Западной Сибири были нереальны – поясним это. Действительно, выявленные расчисткой карьера полигонально-жильные структуры (см. рис. 9) были порой узкими, но всегда кардинально отличными от первично песчаных жил; Трой Певе (Péwé, 1959) их впервые описал в Сухих Долинах Мак-Мёрдо в Антарктиде как песчаные жилы, вложенные в грубозернистые отложения.

Высота крупных полигонально-жильных структур в описанном карьере составляла 2–2,5 м, ширина по верху – до 1,5 м, а их контуры были сопряжены с основанием криогидроморфной палеопочвы, которое фиксировало былое положение сезонно-талого слоя. Реликты этой палеопочвы ясно отслеживались на глубине около 1 м от поверхности в виде сизого, мощностью в несколько сантиметров глеевого горизонта. Почвы такого типа отражают именно ход своего развития на матрице многолетнемерзлых пород, когда промерзавшие осадки, стабилизируясь, переходили из режима пойменного накопления в режим устойчивой террасы (Шейнкман и др., 2022; Sedov et al., 2022). Тогда как подчёркиваемые криогидроморфной почвой признаки ясно выраженного былого сезонно-талого слоя говорят о воздействии талых вод, способных пропитывать верхние слои аллювия и затекать в морозобойные трещины, подтверждая тем самым, что здесь формировались полигонально-жильные льды, и отмеченные крупные полигонально-жильные структуры – это псевдоморфозы по ним, которые, согласно (Романовский, 1977), в малольдистых отложениях сохраняют очертания былых ледяных тел, что наблюдается и в нашем случае. Формирование таких образований в условиях холодной пустыни нереально.

На рисунке 9 видно, что у отмеченных псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам просматривается ясно выраженная форма треугольника, они узкие в средней и нижней части, вверху расширяются; здесь вдоль контакта с вмещающей породой слои последней отжаты вверх и в стороны, а над головками жил фиксируются (уже несколько сглаженные) валики выжимания вмещавшей полигонально-жильные льды породы. Это типично при развитии полигонально-жильных льдов в условиях стабилизации поверхности, которую они пересекают (Попов и др., 1985), и говорит об их эпигенетическом характере, тогда как полосчатое строение псевдоморфоз объяснимо их специфическим развитием в малольдистых песках.

Криогидроморфные почвы, частично редуцированные под воздействием иллювиального горизонта, лежащего выше поверхностного подзола, изначально формировались во время потепления в терминальную фазу сартанского, МИС-2, криохрона, когда поступление гумуса в почву стало больше, чем в условиях собственно криохрона, но основание сезонно-талого слоя, которое в отмеченную фазу все еще было хорошо выражено на небольшой глубине от поверхности. Они в настоящее время лучше всего представлены (см. рис. 9) в заполнении псевдоморфоз по бывшим полигонально-жильным льдам в виде педоседиментов, оползавших, вместе с породами с междужильного пространства, по стенкам все еще достаточно охлажденных тающих полигонально-жильных льдов: педоседименты примерзали к этим стенкам и затем захоранивались. Этим объясняется субвертикальная полосчатость в строении псевдоморфоз, хорошей выраженности которой способствовало, на наш взгляд, развитие в данном регионе в прошлом не просто полигонально-жильных льдов, а подобных им структур, близких к песчано-ледяным жилам, распространенным сегодня на севере Якутии и описанным в работе (Деревягин и др., 2007). Псевдоморфозы по ним еще лучше сохраняют очертания своих предшественников и имеют более выраженное полосчатое строение.

Иными словами, заполнение педоседиментами криогидроморфных палеопочв псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам, а также породами с междужильного пространства, оползающими в освобождаемое этими льдами пространство, в плане общего формирования полигонально-жильных структур относительно полигонально-жильного льдообразования является процессом вторичным, но не посткриогенным. По сути, он является процессом синкриогенным, так как развивается в условиях существующей криолитозоны и сопровождается промерзанием горных пород, имеющих отрицательную температуру, хотя и выше значений, благоприятных для развития полигонально-жильных льдов.

По гумусовому веществу псевдоморфоз и содержащихся в их заполнении органических остатков выполнено ¹⁴C-датирование. Полученные таким образом результаты показали, что заполнение псевдоморфоз началось как раз в терминальную фазу сартанского, МИС-2, стадийного криохрона – 15–16 тыс. лет назад, при раннем проявлении в регионе потепления климата в конце криохрона МИС-2, но при сохранении мерзлоты (Sedov et al., 2022). Как уже отмечалось выше, для развития полигонально-жильных льдов в песках нужны температуры многолетнемерзлых пород –5 – –6°C (Романовский, 1977); при их повышении, но при сохранении у горных пород отрицательной температуры, ледовое вещество полигонально-жильных льдов и песчано-ледяных жил будет вытаивать, а фрагменты криогидроморфной почвы и породы с междужильного пространства оползать по стенкам жил и послойно примерзать к ним и друг к

другу. Так будет продолжаться до тех пор, пока породы не приобретут положительную температуру.

Ко времени начала образования позднесартанской криогидроморфной почвы, которая формировалась в течение всего стадияльного криохрона МИС-2, но проявление ее значительно усилилось в терминальную фазу криохрона, поверхность каргинской толщи стабилизировалась (иначе почва не образовалась бы). Будучи в МИС-2 освоена рассекающими ее эпигенетическими полигонально-жильными льдами, которые в конце МИС-2 стали вытаивать, замещаясь педоседиментами – дериватами криогидроморфной почвы, эта толща приобрела своеобразное строение, которое фиксирует рис. 9. Тем более, что к середине голоцена значительная часть данной толщи оттаяла, о чем говорит наличие ясно выраженных подзолов вверху разреза – это уже посткриогенное явление, поскольку его специфика (Таргульян, 1971) отражает развитие альфегумусовой миграции и связанной с ней элювиально-иллювиальной дифференциации профиля в среде развитой аэрации и свободного дренажа. В нашем случае сформированы подзолы, если и после неполного, то значительного оттаивания горных пород и исчезновения мерзлотного водоупора, положение которого фиксировалось ранее основанием криогидроморфных палеопочв.

Характерно, что на рисунке 9 на разной глубине просматриваются хорошо выраженные здесь и иные жильные структуры – меньшего размера, расположенные ближе друг к другу и имеющие высоту до 1 м. Слои вмещающей породы на контакте с ними в нижней их части загнуты вниз, но вверху становятся пологими и затем плавно смыкаются с лежащими выше горизонтально осадками. Это признаки изначально грунтовых жил, формируемых в деятельном слое (Романовский, 1977) в условиях, когда промерзание горных пород еще не достигало параметров, обеспечивающих развитие полигонально-жильных льдов. Их наличие, как отмечалось выше, свидетельствует о том, что вмещавшие жилы осадки, которые в сартанский, МИС-2, стадияльный криохрон рассекались полигонально-жильными льдами, ранее на протяжении каргинского, МИС-3, интерстадияльного термохрона были мёрзлыми, но с температурой выше значений, необходимых для развития полигонально-жильных льдов, и накапливались как синкриогенные образования в условиях нестабилизированной поверхности поймы, а не стабилизированной террасы.

Благодаря тому, что на дневной поверхности при формировании полигонально-жильных льдов формировались валики из отжимаемых льдом пород, по оси псевдоморфоз образовывались небольшие межваликовые понижения, создавая специфический микрорельеф. Такие понижения лучше осваиваются тальми водами, усиливая дренаж осадочных пород, представленных песчаной толщей, и увеличивая область их аэрации. Это способствует тому, что иллювиальный горизонт подзолов увеличивает в таких местах свою мощность, несколько вклиниваясь в тело псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам. Серией ^{14}C -датировок по гумусовому веществу подзолов и содержащихся в них остатков органики, начало их формирования как раз фиксируется (Sedov et al., 2022; Sheinkman et al., 2022) серединой голоцена. Некоторые из этих возрастных определений показаны на нижерасположенных рисунках.

Соотношение поверхностных подзолов, псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам и криогидроморфных палеопочв на основании бывшего сезонно-талого слоя в датированной каргинской толще лучше всего просматривалось в бассейне низовой р. Надым в 5 км к северу от пос. Пангоды (см. рис. 1, участок 4). Здесь в верховьях правого притока р. Надым – р. Правая Хетта в нее впадает р. Тьяха, прорезая равнину, сложенную песчаным аллювием, сформированным в каргинское МИС-3 время. В расчистке стенки одного из карьеров, заложенном на данном участке, были вскрыты образования, аналогичные тем, что показана на рис. 9, но более представительные.

Псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам, вскрытые в стенках этого карьера (рис. 10), были заполнены сползавшими при таянии льда в освобождаемое им пространство педоседиментами криогидроморфной почвы и минеральным субстратом с междужильного пространства, представленными довольно крупными формами. Они достигали 4 м в высоту и 3 м в ширину; для них был характерен сизый цвет заполнения с ржавыми фрагментами – результат процессов оглеения (см. рис. 10). Характерно, что и здесь псевдоморфозам было присуще бурое окаймление, сопряженное с лежащей вверху разреза криогидроморфной почвой – результат мобилизации железа в восстановительной среде в теле псевдоморфоз, его последующей миграции

и итогового осаждения гидроокислов железа на мерзлых стенках былых полигонально-жильных льдов.

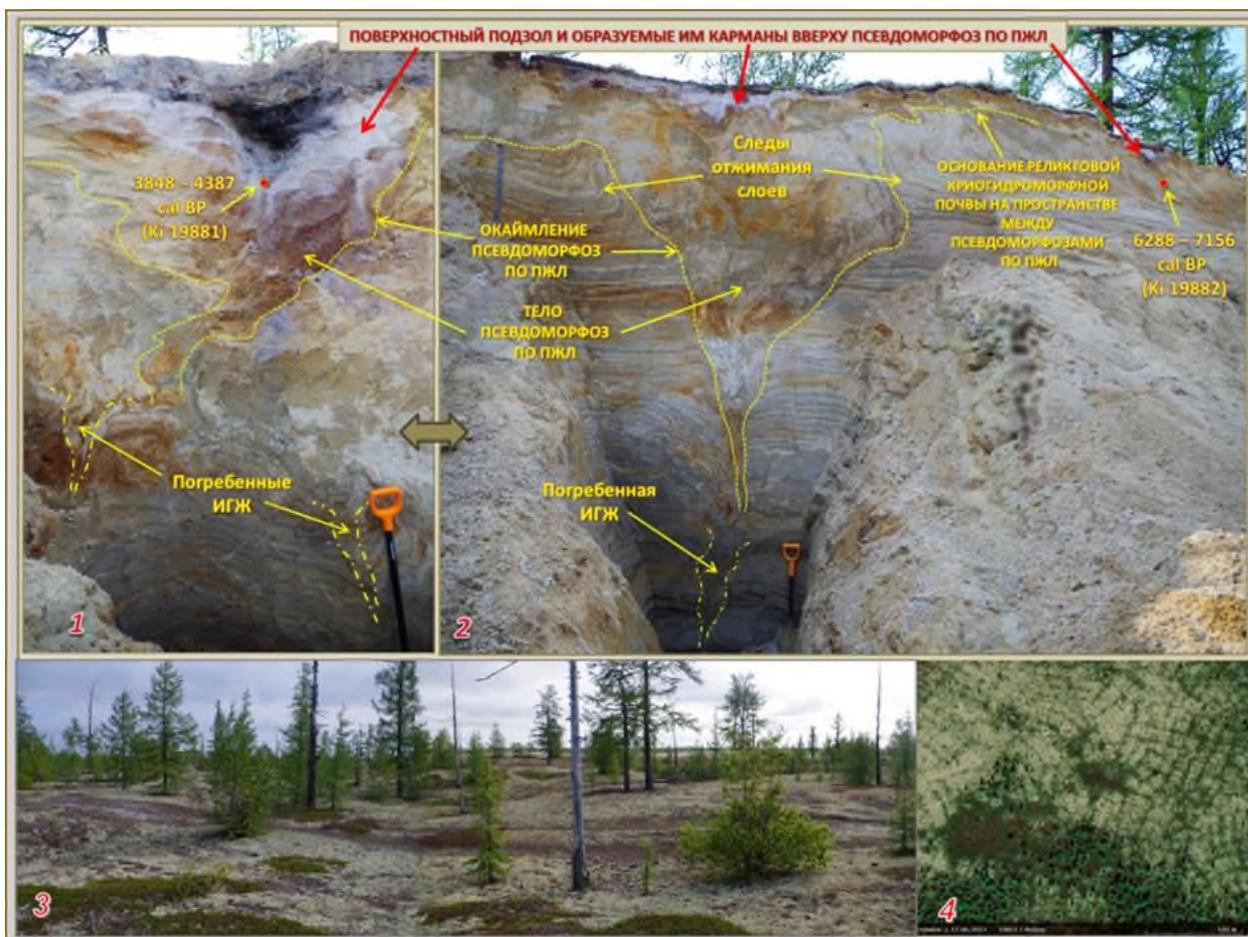


Рисунок 10. Расчистка стенки карьера на участке 4 (см. рис. 1). Фото В.С. Шейнкмана. Пояснения в тексте.

Кроме того, и в данном случае у отмеченных псевдоморфоз просматривается ясно выраженная форма треугольника: они узкие в своей нижней части, вверху расширяются, и здесь вдоль контакта с вмещающей породой слои последней отжаты вверх и в стороны (рис. 10-2). Как отмечалось выше, эти черты типичны при развитии полигонально-жильных льдов в условиях стабилизации поверхности, которую они пересекают (Попов и др., 1985), и свидетельствуют о первично эпигенетическом характере полигонально-жильных льдов. Сохранению этих черт, как было отмечено выше, способствует, согласно (Романовский, 1977), развитие псевдоморфоз в малольдистой песчаной среде. Над головками жил здесь также фиксируются уже несколько сглаженные валики выжимания породы, вмещавшей полигонально-жильные льды – они формируют на дневной поверхности, хорошо выраженный полигональный микрорельеф (рис. 10-3); его черты ясно просматриваются на космических снимках (рис. 10-4) и пока еще хорошо сохраняются как своеобразный элемент ландшафта. Как и в ситуации, отображенной на рис. 9, межваликовые понижения и в данном случае способствовали лучшему освоению их тальми водами, усиливая по оси псевдоморфоз дренаж пород и увеличивая область их аэрации, что благоприятствует тому, что как элювиальный, так и иллювиальный горизонт подзолов заметно увеличивают в таких местах свою мощность – на рис. 10-1 видно, насколько значительно он может вклиниваться в тело псевдоморфоз.

Серией ^{14}C -датировок по гумусовому веществу подзолов и содержащихся в них остатков органики, начало их формирования и в ситуации, отображенной на рис. 10, также определено как середина голоцена. Соответствующие возрастные ^{14}C -определения показаны на рис. 10-1 и 10-2.

Наряду с псевдоморфозами по полигонально-жильным льдам расчистка и данного разреза зафиксировала первично сингенетические, но затем погребенные изначально грунтовые жилы на

разных геоморфологических уровнях (см. рис. 10-1, 10-2). Тем самым присутствие таких образований подтверждало еще раз, что в течение каргинского, МИС-3, времени отложения, вмещающие изначально грунтовые жилы, промерзали, но в условиях криолитозоны с температурой, по крайней мере, выше значений, необходимых для начала формирования полигонально-жильных льдов, и, в целом, в синкриогенной среде.

Интересные явления в отношении палеопедогенеза и связанного с ним палеокриогенеза во время сартанского, МИС-2, криохрона были обнаружены и на восточном фланге Сибирских Увалов, но не на южном их склоне, а на северном – на участке 6 на рис.1, в бассейне верхнего течения р. Таз. Здесь отмеченные образования были вскрыты расчисткой в 10-м береговом обрыве р. Пюлькы (рис. 11) – одного из истоков р. Таз. Современная почва была представлена в данном случае не подзолом, а подбуром, также относящимся к типу альфегумусовых почв, тогда как палеопочва, сформированная в конце сартанского, МИС-2, времени, проявлялась в виде реликтов криогидроморфной почвы, лежащей на основании бывшего сезонно-талого слоя, на котором она формировалась как на мерзлом водоупоре. Криогидроморфная палеопочва ясно отслеживалась на глубине около 1 м от поверхности в виде сизого, мощностью в несколько сантиметров горизонта, обогащённого гумусом. Преобладание сизых тонов в окраске основного тела палеопочвы связано, как и в отмеченных выше случаях, с былым оглеением в условиях избыточного увлажнения на основании прежнего сезонно-талого слоя. Преобладание сизых тонов и в окраске основного тела псевдоморфоз аналогично связано с былым оглеением в условиях избыточного увлажнения, но не на основании сформировавшегося сезонно-талого слоя, а у обрамления полигонально-жильных льдов при их таянии, где на мёрзлом контакте осаждались дающие бурую пигментацию соединения гидроксидов железа, мобилизованного в восстановительной среде тела псевдоморфоз.

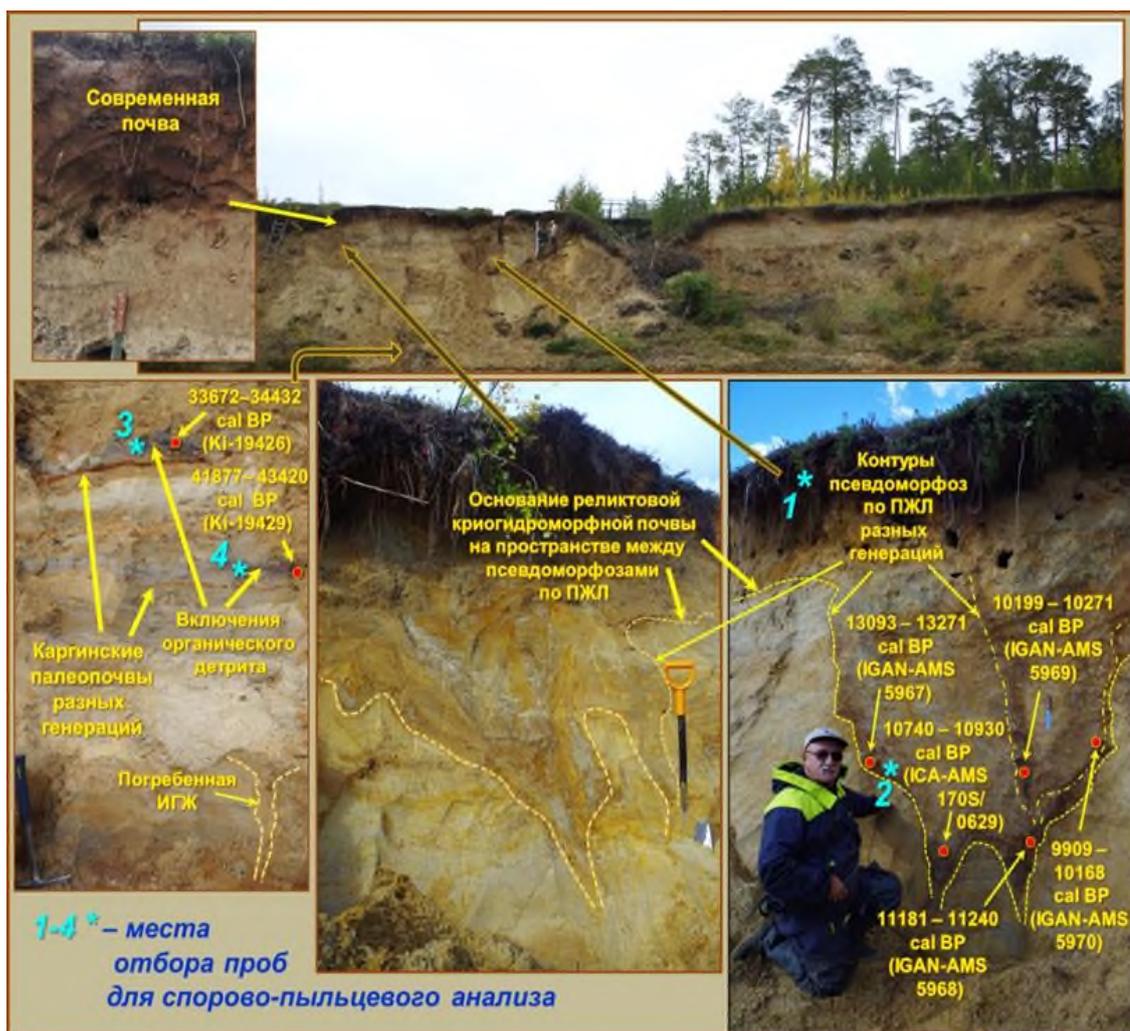


Рисунок 11. Объект Пюлькы. Фото из архива В.С. Шейнкмана. Пояснения в тексте.

В целом, обнаруженные на данном участке псевдоморфозы по сартанским, МИС-2, эпигенетическим полигонально-жильным льдам были сформированы в верхней части толщи аллювиальных осадков, по которым, подтверждая их каргинский, МИС-3, возраст, были получены ^{14}C -датировки в интервале 30–45 тыс. лет назад (см. рис. 11, врезка в левом нижнем углу). Эти датировки выполнены по материалу намывного детрита аллювиальных, очень слабо развитых синседиментационных палеопочв (см. рис. 11, врезка в левом нижнем углу), в то время как датировки, позволяющие судить о сартанском, МИС-2, возрасте полигонально-жильных льдов, рассекавших каргинскую, МИС-3, толщу аллювия, выполнены по органическому веществу из темных гумусированных морфонов, обнаруженных в глеевых педоседиментах в заполнении наследующих эти льды псевдоморфоз (см. рис. 11, врезка в правом нижнем углу).

Поскольку гумусированные морфоны относятся к органоминеральным горизонтам почв, существовавших рядом с полигонально-жильными льдами на момент их оттаивания, получаемые по ним ^{14}C -датировки, согласно О.А. Чичаговой (2005), могут считаться минимальными по величине, поскольку фактически дают возраст, близкий к началу формирования палеопочв, и, в то же время, максимальный возраст заполнения псевдоморфозы. По морфонам вложенного клина и по хвостовым частям главной жилы (см. рис. 11, врезка в правом нижнем углу) получены ^{14}C -AMS даты 10–11 тыс. л. н., и несколько больше 13 тыс. л. н. – по морфону в западине у самого края (слева) главной жилы. Они показывают приуроченность дат к границе плейстоцен–голоцен, хотя и фиксируют некоторые перерывы в накоплении промерзавших осадков. При этом характерно, что и криогидроморфные палеопочвы, и полигонально-жильные льды – это фактор преобразования вмещающей их, сформированной ранее аллювиальной толщи, которая накапливалась, судя по полученным ^{14}C -датировкам детрита (см. рис. 10, врезка в левом нижнем углу), в каргинское, МИС-3, интерстадиальное время.

Как и в предыдущих разрезах, по всей видимой толще аллювия в террасе р. Пюлькы на разных уровнях встречались синкриогенные изначально грунтовые жилы, сгруппированные в верхней и нижней части разреза. Отдельно отметим, что по разрезу Пюлькы удалось получить уникальные палеоботанические материалы. Хотя не все отобранные образцы содержали спорово-пыльцевые спектры в достаточном количестве, необходимые для представительной статистической обработки данные, тем не менее, были собраны и позволили провести их обоснованную интерпретацию. Согласно результатам, полученным в ходе проведенных Е.В. Безруковой исследований (Шейнкман и др., 2022; Sedov et al., 2022), картина представляется следующей.

Образец из поверхностных, недавно сформированных отложений позднего голоцена (№ 1, рис. 11) показал (Шейнкман и др., 2022) состав спорово-пыльцевого спектра, отражающий преобладание лесной растительности. Это елово-кедровые леса с преобладанием ели сибирской (*Picea obovata*), кедра сибирского (*Pinus sibirica*) и с участием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), берёзы пушистой (*Betula alba*), изредка пихты (*Abies sibirica*). Кустарниковые представляли ерники (*Betula nana*) и душекия (*Alnus alnobetula*); травяно-кустарничковые – лишь редкой пылью вересковых (*Ericaceae*), полыней (*Artemisia* spp.), а также маревых (*Chenopodiaceae*). Такой набор соответствует структуре растительности современных среднетаёжных ландшафтов региона.

Образец из заполнения наиболее крупной псевдоморфозы по полигонально-жильному льду (№ 2, рис. 11) характеризовал редколесный, вероятно, лесотундровый ландшафт с участками ели и березы, ольховника и ивы (Шейнкман и др., 2022). Доминировали в этом случае представители переувлажненных заболоченных ландшафтов – хвощево-сфагново-осоковые травяно-кустарниковые тундровые (*Alnus alnobetula*, *Salix* spp., *Poaceae*, *Cyperaceae*, *Polemonium* sp., *Polygonaceae* ind., *Polygonum bistorta*). Кроме того, фиксировалось обилие спор плауна арктического (*Huperzia arctica* (Tolm.) Sipl., *H. petrovii* Sipl.) и мхов рода *Meesia*, характеризующих развитие тундровой растительности и низинных осоковых болот.

Вероятно, могли входить в состав растительности травянистых тундр и остепненных участков также и злаковые (*Poaceae*). О значительном развитии степных ассоциаций свидетельствует разнообразие пыльцы трав, формирующих в настоящее время степную растительность (*Artemisia* spp., *Chenopodiaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Onagraceae*, *Fabaceae*, *Polygonum bistorta*). Таким образом, растительность во время формирования материала данного образца имела мозаичный облик, характеризующийся сочетанием лесотундрового, тундрового и степного типов растительности.

В нижней части разреза р. Пюлькы прослой, обогащенные органическим детритом, идентифицированные как слаборазвитые синседиментационные аллювиальные палеопочвы, по гумусовому веществу которых ^{14}C -датировки дали каргинский, МИС-3, возраст, фиксировали, на фоне синкриогенного накопления аллювия, задержки этого процесса со стабилизацией, на некоторое время, поверхности поймы и постепенного накопления аллювия от одного паводка-половодья к другому. Это обеспечило накопление в составе палеопочв спор и пыльцы, отражающих характер формирующихся в данной обстановке ландшафтов.

Снизу вверх по разрезу в этих аллювиальных намывных почвах, образовавшихся в каргинское, МИС-3, время, проанализированные Е.В. Безруковой в ходе проведенных исследований (Шейнкман и др., 2022) спорово-пыльцевые спектры демонстрировали усиление криогенных элементов ландшафтов. В образце № 4 (см. рис. 11) пыльца наземных трав немного преобладала над пыльцой древесных видов, состав которых подразумевает, что участки с локальной лесной растительностью в основном формировали ель и береза. Заметное содержание пыльцы *Pinus sylvestris* указывает на ее участие в региональной растительности на прогреваемых, относительно сухих участках, в травяном покрове которых существовали растения современных степей – *Artemisia* spp., *Poacea*, *Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, тогда как влажные сфагново-осоковые группировки имели очень ограниченное развитие.

В образце № 3 (см. рис. 10), выше по разрезу, преобладала пыльца наземных трав, менее значимо было участие пыльцы древесных растений. Как и в образце № 4, ниже по разрезу, состав пыльцы древесных показал, что участки локальной лесной растительности формировали ель (*Picea obovata*) и берёза (*Betula alba*). В два раза снизившееся в данном случае обилие пыльцы *Pinus sylvestris* указывало на сокращение ее участия в региональной растительности или отступление ее границы к югу, индицируя активизацию многолетней мерзлоты. Увеличение количества пыльцы кустарников современных тундр (*Betula nana*, *Alnus alnobetula*, *Salix* spp.) фиксировало расширение их ареала вблизи данного участка, возросла вокруг него роль представителей влажных, заболоченных сфагново-осоковых мест. Обилие пыльцы степных растений предполагало наличие прогреваемых летом, относительно сухих участков, в травяном покрове которых существовали растения современных степей – *Artemisia* spp., *Asteraceae*, *Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Onagraceae*.

В целом, информация по палеопочвам МИС-3 и конца МИС-2 по разрезу Пюлькы высветила ряд интересных явлений. Во-первых, очевидна определенная близость ландшафтов с наличием многолетнемерзлых пород, существовавших при температуре выше благоприятных для полигонально-жильного льдообразования значений. В одном случае это фиксировали синседиментационные аллювиальные палеопочвы, сформированные в относительно слабо промерзавших отложениях до наступления сартанского, МИС-2, стадийного криохрона, а в другом – криогидроморфные палеопочвы, образовавшиеся во время угасания этого криохрона, в его терминальную фазу. Во-вторых, фиксируемое полученными данными заметное охлаждение территории в первой половине МИС-3 и в конце ее свидетельствует, с одной стороны, о постепенном переходе к этому интерстадиальному термохрону от предшествующей холодной стадии криохрона МИС-4, тогда как в конце МИС-3 отслеживается переход к стадийному криохрону МИС-2.

Подчеркнем, что во всех случаях погребенные плейстоценовые палеопочвы контрастно отличались от современных поверхностных почв, которые представлены альфегумусовыми почвами – подзолами и подбурами, с яркими иллювиально-железистыми горизонтами и без признаков оглеения. Эти почвы начали формироваться, как показало их датирование, в середине голоцена в условиях свободного внутрипочвенного дренажа после оттаивания многолетней мерзлоты, причем они внедряются довольно глубокими клиньями в тело псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам по их оси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Находки позднеплейстоценовых палеопочв, обнаруженные в ходе проведенных исследований на севере Западной Сибири, свидетельствуют, что на данной территории педогенез в плейстоцене был закономерен и имел специфические особенности протекания. Он формировался, развиваясь в течение основных периодов потепления климата. При этом, помимо одного из главных термохронных плейстоцена – казанцевского, МИС-5, палеопочвы формировались и во время относительно прохладных интерстадиальных термохронных, подобных каргинскому, МИС-3,

времени, и в потепления, имевшие место в терминальные фазы криохронов, что лучше всего проявилось в терминальную фазу сартанского, МИС-2, стадийного криохрона.

Палеопочвы конца МИС-2, будучи расположены близко к поверхности, оказались интегрированы с современными альфегумусовыми почвами, что создаёт парадоксальные наборы диагностических горизонтов и признаков. Например, элювиально-иллювиальные профили подзолов могут быть непосредственно подстилаемы сильно оглеенным горизонтом былых криогидроморфных почв. Поэтому требуется отдельная диагностика современных и реликтовых признаков почв – чтобы избежать ошибок в их генетической интерпретации и, соответственно, в рекомендациях по использованию почв региона.

Важно отметить, что в плане исследований палеопедогенного характера всех изученных палеопочв выявлено преобладание в них признаков криогидроморфного педогенеза; только в казанцевской палеопочве диагностирована ранняя стадия иллювиования глины, протекавшего вне криолитозоны. Это говорит о том, что за исключением тех почв, что образовались в голоцене и в термохрон МИС-5е, остальные изученные почвы формировались на многолетнемерзлом основании и, будучи криогидроморфными, представляют собой хорошо выраженные индикаторы былой мерзлоты.

Характерно, что криогидроморфные палеопочвы, образовавшиеся в МИС-3 и в конце МИС-2, были сформированы в близких ландшафтных условиях. Первые – в обстановке до наступления сартанского, МИС-2, криохрона, а вторые – во время его угасания. Тем не менее, каргинский, МИС-3, интерстадийный термохрон был в климатическом отношении несколько более тёплый и более сухой. Как результат – некоторый дефицит влаги в интерстадийный термохрон МИС-3 – позволил формирование карбонатов в процессе почвообразования. Тогда как палеопочвы терминальной фазы сартанского, МИС-2, криохрона характеризовались развитием в достаточно влажных условиях тундрово-болотных ландшафтов, когда дополнительное заболачивание обуславливалось оттаиванием подземных льдов при существовании определенное время мерзлого основания сезонно-талого слоя. Поэтому возникновение карбонатов в таких почвах не фиксируется.

Прекратилось развитие криогидроморфных почв к середине голоцена. Это фиксирует появление в то время, подтверждённое серией ¹⁴C-датировок, альфегумусовых почв – подзолов и подбуров, формировавшихся на матрице горных пород, оттаявших уже на большую глубину – в среде активной аэрации и свободного дренажа.

Таким образом, можно констатировать, что плейстоценовые криогидроморфные палеопочвы формировались как синкриогенные образования, тесно связанные с протеканием в синкриогенном режиме развития псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам, и могут служить индикатором соответствующих условий. Тогда как альфегумусовые голоценовые почвы, требуя для своего развития среды со свободным дренажом и активной аэрацией вмещающих пород, образовывались как посткриогенные образования и также могут служить индикатором подобных условий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою искреннюю признательность профессору Е.В. Безруковой за консультации и помощь при организации и проведении аналитических исследований.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты № 121041600042-7 и № 121042000078-9).

ЛИТЕРАТУРА

Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А. Геокриологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 3. С. 3–19.

Архипов С.А., Волкова В.С. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири. Труды НИЦ ОИГТМ СО РАН. Вып. 823. Новосибирск: 1994, 105 с.

Галанин А.А. Позднечетвертичные песчаные покровы Центральной Якутии (Восточная Сибирь): строение, фациальный состав и палеоэкологическое значение // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 1. С. 3–34. DOI: 10.15372/KZ20210101.

Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. DOI: 10.1134/S0032180X19010040.

- Гросвальд М.Г. Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания // Материалы гляциологических исследований. 2009. № 106. 152 с.
- Деев М.Г. Морские льды. Москва: Издательство Московского ун-та, 2002. 133 с.
- Деревягин А.Ю., Куницкий В.В., Майер Х. Песчано-ледяные жилы на крайнем севере Якутии // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 1. С. 62–71.
- Додонов А.Е. Четвертичный период Средней Азии: Стратиграфия, корреляция, палеогеография // Труды Геологического института Российской академии наук. Вып. 546. Москва: ГЕОС, 2002. 250 с.
- Зубов Н.Н. Льды Арктики. Москва: Издательство Главсевморпути, 1945. 360 с.
- Зыкина В.С., Зыкин В.С. Лёссово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. Новосибирск: Гео, 2012. 477 с.
- Зыкина В.С., Зыкин В.С., Вольвах А.О., Овчинников И.Ю., Сизов О.С., Соромотин А.В. Строение, криогенные образования и условия формирования верхнечетвертичных отложений Надымского Приобья // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 14–25. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(14-25\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(14-25)).
- Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И., Вильямс Д.Ф., Гвоздков А.Н., Кербер Е.В. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с Западно-Сибирской стратиграфией // Геология и геофизика. 2001. № 1–2. С. 48–63.
- Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. Москва: МГУ, 1985. 240 с.
- Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Наука, 1977. 215 с.
- Седов С.Н., Сеницын А.А., Бессуднов А.А., Лев С.Ю., Бессуднов А.Н., Сычёва С.А., Романис Т.В., Шейнкман В.С., Коркка М.А. Отражение вековых и тысячелетних изменений природной среды в палеопочвах верхнепалеолитических стоянок Восточно-Европейской равнины в МИС 3 и МИС 2 // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 5. С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0435428122050157>.
- Слагода Е.А., Новосёлов А.А., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Бутаков В.И., Тихонравова Я.В., Зазовская Э.П. Следы криогенных процессов в позднеплейстоценовых отложениях Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири // Криосфера Земли. 2022. Т. XXVI. № 1. С. 21–35. DOI: [10.15372/KZ20220103](https://doi.org/10.15372/KZ20220103).
- Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. Москва: Наука, 1971. 270 с.
- Таргульян В.О., Бронникова М.А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. 2019. № 3. С. 259–275. DOI: [10.1134/S0032180X19030110](https://doi.org/10.1134/S0032180X19030110).
- Унифицированная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины. М-во природ. ресурсов РФ. Новосибирск: СНИИГиМС, ИГНиГ СО РАН, 2000. 9 л.
- Чичагова О.А. Развитие представлений И.П. Герасимова об абсолютном и относительном возрасте почв по данным радиоуглеродного датирования // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1436–1445.
- Шейнкман В.С., Мельников В.П., Седов С.Н., Парначев В.П. Новые свидетельства внеледникового развития севера Западно-Сибирской низменности // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 4. С. 480–484. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217340199>.
- Шейнкман В.С., Мельников В.П. Эволюция представлений о холоде и возможные пути их развития в науках о Земле // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 5. С. 3–16. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2019-5\(3-16\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-5(3-16)).
- Шейнкман В.С., Мельников В.П., Парначев В.П. Анализ криогенных и тектонических процессов на севере Западной Сибири в плейстоцене с позиций криогетеротопии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 1. С. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686739720090169>.
- Шейнкман В.С., Седов С.Н., Русаков А.В., Мельников В.П. Криотрасологическая индикация палеопочв // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 51–62. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(51-62\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(51-62)).
- Шейнкман В.С., Седов С.Н., Безрукова Е.В. Палеоэкология севера Западной Сибири в последнюю холодную эпоху плейстоцена: новые свидетельства и сценарии // Экосистемы: экология и динамика. 2022. Т. 6. № 4. С. 71–88. DOI: <https://doi.org/10.24412/2542-2006-2022-4-71-88>.
- Bronger A., Winter R., Sedov S.N. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia // Catena. 1998. Vol. 34. No. 1–2. P. 19–34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00079-4).
- Haesaerts P., Borziac I., Chekha V. P., Chirica V., Drozdov N. I., Koulakovska L., Orlova L. A., van der Plicht J., Damblon F. Charcoal and wood remains for radiocarbon dating Upper Pleistocene loess sequences in Eastern

- Europe and Central Siberia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. Vol. 291. No. 1–2. P. 106–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.034>.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Records // *Paleoceanography and Palaeoclimatology*. 2005. Vol. 20. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>.
- Möller P., Benediktsson Í.Ö., Anjara J., Ole Bennike O., Bernhardson M., Funder S., Håkansson L.M., Lemdahl G., Licciardi J. M., Murray A.S., Seidenkrantz M.S. Glacial history and paleoenvironmental change of southern Taimyr Peninsula, Arctic Russia, during the Middle and Late Pleistocene // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 196. P. 409–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.004>.
- Péwé T.L. Sand-wedge Polygons (Tessellations) in the McMurdo Sound Region, Antarctica – Progress Report // *American Journal of Science*. 1959. Vol. 257. No. 8. P. 545–552.
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek, W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M., A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 106. P. 14–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>.
- Sedov S., Rusakov A., Sheinkman V., Korkka M. MIS3 paleosols in the center-north of Eastern Europe and Western Siberia: Reductomorphic pedogenesis conditioned by permafrost? // *Catena*. 2016. Vol. 146. P. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.022>.
- Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A. Sartanian (MIS 2) ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation // *Quaternary International*. 2022. Vol. 632. P. 192–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002>.
- Sheinkman V. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – New evidence and interpretation // *Quaternary International*. 2016. Vol. 420. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.147>.
- Sheinkman, V., Sedov S., Shumilovskikh L., Korkina E., Korkin S., Zinovyev E., Golyeva A. First results from the Late Pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS3 // *Quaternary International*. 2016. Vol. 418. P. 132–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.095>.
- Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. Bezrukova E., Dobrynin D., Timireva S., Rusakov A., Maksimov F. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section // *Quaternary Research*. 2021. Vol. 99. P. 204–222. DOI: <https://doi.org/10.1017/qua.2020.74>.
- Sheinkman V., Sharapov D., Sedov S. Northwest Siberia as a MIS2 desert? Inferences from quartz morphoscopy and polygonal ice wedges // *Quaternary International*. 2022. Vol. 620. P. 46–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.06.007>.
- Svendsen J.I., Krüger L.C., Mangerud J., Astakhov V.I., Paus A., Nazarov D., Murray A. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age, Marine Isotope Stages 5–2 // *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 92. P. 409–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.10.008>.
- Velichko A.A. Loess-paleosol formation on the Russian Plain // *Quaternary International*. 1990. Vol. 7–8. P. 103–114. DOI: [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(90\)90044-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(90)90044-5).
- Velichko A.A., Timireva S.N., Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Smith L.C. West Siberian Plain as a late glacial desert // *Quaternary International*. 2011. Vol. 237. No. 1–2. P. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.013>.

Поступила в редакцию 29.11.2023

Принята 19.12.2023

Опубликована 25.12.2023

Сведения об авторах:

Шейнкман Владимир Семенович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН (г. Тюмень, Россия); vlad.sheinkman@mail.ru

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН (г. Тюмень,

Россия); ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (г. Мехико, Мексика); serg_sedov@yahoo.com

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, директор ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); androhanov@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/)

CRYOHYDROMORPHIC PALEOSOLS IN THE NORTH OF WEST SIBERIA AS INDICATORS OF THE WARM STAGES OF THE LATE PLEISTOCENE AND THEIR LINK TO THE CRYOGENESIS DEVELOPMENT

© 2023 V. S. Sheinkman ¹, S. N. Sedov ^{1,2}, V. A. Androkhonov ³

¹Earth Cryosphere Institute, Tyumen Science Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina 86, Tyumen, Russia. E-mail: vlad.sheinkman@mail.ru

²Institute of Geology, National Autonomous University of Mexico, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, CDMX, Mexico, Mexico. E-mail: serg_sedov@yahoo.com

³Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: androhanov@issa-siberia.ru

The aim of the study. The aim of the study was to find and justify specifics of the paleosol development in the north of West Siberia, revealing soils levels, associated with climate warming during sea isotope stages (SIS), namely MIS-5, MIS-3 and at the end of MIS-2.

Location and time of the study. The research was conducted during the last 10 years in the representative area between the Polar Circle and the sub-latitudinal sector of the Ob river all over the area. We carried out paleopedological and paleocryological investigations with fieldwork in the basin of the Vakh River (right tributary of Ob), the Taz and Nadym Rivers, where the soil pits were studied, and paleosols were discovered for the first time.

Methods. The methodology has been focused on detailed study of the paleosols discovered by the present authors based on the investigation in respect to the interaction of paleopedogenetic and cryogenetic processes. Also, the encountered paleosols have been, as well compared to the surface Holocene soils that comprises an important element of analysis of the paleopedological records. For age determination we applied radiocarbon dating of organic residues and humus, contained in the paleosols, as well as U/Th-dating in paleosols.

Results. Several paleosol levels were identified in the study area. The paleosol of the early substage of MIS-5 (MIS-5e) had signs of forest pedogenesis without permafrost, whereas the soils of late substages of MIS-5 and MIS3 showed evidence of gleying and cryogenesis; the paleosol corresponding to the end of MIS-2 was best represented by gleyic pedosediments in the ice-wedge pseudomorphs. The studied paleosols indicate the permafrost state of the soil-forming sediments in all phases of the Late Pleistocene with the exception of MIS-5e; the finding is important for the paleoenvironmental reconstruction. The article presents the data about wide distribution in the study region of the polygonal structures represented by the ice-wedge pseudomorphs formed in the coldest phases MIS-4 and MIS-2. The pseudomorphs were developed syn-cryogenically when permafrost still existed and were closely related to the formation of cryohydromorphic paleosols. Within the entire sequence of MIS-3 deposits initially ground wedges are common, also indicating syn-cryogenic development, however, under less strong freezing conditions than during MIS-2. Yet at the end of MIS-3 in the upper part of the sequence cryohydromorphic soils appeared again, as a sign of approaching to the MIS-2 cryochron. It was shown that the fills of the ice wedge pseudomorphs contain well preserved redeposited materials of the cryohydromorphic paleosols, including fragments of the humus horizons. It was suggested that the material from such redeposited pedosediments could be used for the radiocarbon dating and for sampling for the paleobotanical investigations.

Conclusions. The obtained results cast doubt on the hypothesis of domination of the cold deserts and ice sheets in the study region during the Pleistocene and hence the formation of only extremal soils. There is evidence indicating the existence of well-developed vegetation and soil cover during the cryochrons with sufficient and in some areas excessive soil moisture, due to shallow permafrost table. The interaction of the

paleopedogenetic and paleocryogenic processes resulted in rather informative relict objects, and their studies provide highly reliable results about the factors of past pedogenesis.

Key words: *paleosols; cryohydromorphic pedogenesis; North- Western Siberia; Pleistocene.*

How to cite: *Sheinkman V.S., Sedov S.N. Androkhonov V.A. Cryohydromorphic paleosols in the north of West Siberia as indicators of the warm stages of the Late Pleistocene and their link to the cryogenesis development // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(3). e236. DOI: [10.31251/pos.v6i3.236](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.236). (in Russian with English abstract).*

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Prof. E.V. Bezrukova for her consultations and help in respect to organization and carrying out analytical work.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects № 121041600042-7 и № 121042000078-9).

REFERENCES

- Abramov A.A., Sletten R.S., Rivkina E.M., Gilichinsky D.A. Geocryological conditions of Antarctica. *Earth's Cryosphere*. 2011. Vol. XV. No. 3. P. 3–19. (in Russian).
- Arkhipov S.A., Volkova V.S. Geological history, landscapes and climates of the Pleistocene of Western Siberia. Proceedings of the Scientific Research Center OIGGM SB RAS. Vol. 823. Novosibirsk: 1994, 105 p. (in Russian).
- Galanin A.A. Late Quaternary sand covers of Central Yakutia (Eastern Siberia): structure, facies composition and paleoenvironment significance. *Earth's Cryosphere*. 2021. Vol. XXV. No. 1. P. 3–33. DOI: [10.15372/KZ20210101](https://doi.org/10.15372/KZ20210101).
- Goryachkin S.V., Mergelov N.S., Targulyan V.O. Extreme Pedology: Elements of Theory and Methodological Approaches. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 1. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319010046>.
- Grosvald M.G. Glaciation of the Russian North and North-East during the era of the last great cooling. *Data of Glaciological Studies*. 2009. No. 106. 152 p. (in Russian).
- Deev M.G. Sea ice. Moscow: Moscow University Publishing House, 2002. 133 p. (in Russian).
- Derevyagin A.Yu., Kunitsky V.V., Mayer H. Composite wedges in the North of Yakutia // *Earth's Cryosphere*. 2007. Vol. XI. No. 1. P. 62–71. (in Russian).
- Dodonov A.E. The Quaternary period of Central Asia: Stratigraphy, correlation, paleogeography. Proceedings of the GIN RAS. Issue 546. Moscow: GEOS Publ., 2002. 250 p. (in Russian).
- Zubov N.N. Arctic ice. Moscow: Glavsevmorput Publishing House, 1945. 360 p. (in Russian).
- Zykina V.S., Zykin V.S. Loess-soil sequence and evolution of the natural environment and climate of Western Siberia in the Pleistocene. Novosibirsk: Geo, 2012. 477 p. (in Russian).
- Zykina V.S., Zykin V.S., Volvakh A.O., Ovchinnikov I.Yu., Sizov O.S., Soromotin A.V. Upper Quaternary deposits of the Nadym Ob area: stratigraphy, cryogenic forms, and deposition environments. *Earth's Cryosphere*. 2017. Vol. XXI. No. 6. P. 12–20. DOI: [10.21782/EC1560-7496-2017-6\(12-20\)](https://doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6(12-20)).
- Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Williams D.F., Gvozdkov A.N., Kerber E.V. Glaciations and interglacial periods of Siberia - paleoclimatic record from Lake Baikal and its correlation with West Siberian stratigraphy. *Geologiya i geofizika*. 2001. No. 1–2. P. 48–63. (in Russian).
- Popov A.I., Rosenbaum G.E., Tumel N.V. Cryolithology. Moscow: MSU, 1985. 240 p. (in Russian).
- Romanovsky N.N. Formation of polygonal vein structures. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977. 215 p. (in Russian).
- Sedov S.N., Sinitsyn A.A., Bessudnov A.A., Lev S.Yu., Bessudnov A.N., Sycheva S.A., Romanis T.V., Sheinkman V.S., Korkka M.A. Paleosols of the upper palaeolithic sites in the East European plain reflect the environmental fluctuations of centennial to millennial scale during MIS 3 and MIS 2. *Geomorfologiya*. 2022. Vol. 53. No. 5. P. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0435428122050157>. (in Russian).
- Slagoda E.A., Novoselov A.A., Koroleva E.S., Kuznetsova A.O., Butakov V.I., Tikhonravova Ya.V., E.P. Zazovskaya E.P. Traces of cryogenic processes in the late pleistocene sediments of the Pur-Taz interfluvium (West Siberia). *Earth's Cryosphere*. 2017. Vol. XXVI. No. 1. P. 21–35. DOI: [10.15372/KZ20220103](https://doi.org/10.15372/KZ20220103).

- Targulian V.O. Soil formation and weathering in cold humid regions. Moscow: Nauka Publ., 1971. 270 p. (in Russian).
- Targulian V.O., Bronnikova M.A. Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 229–243. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319030116>.
- Unified stratigraphic scheme of Quaternary sediments of the West Siberian Plain. *Mr. Nature. resources of the Russian Federation*. Novosibirsk: SNIGGIMS, IG NiG SB RAS, 2000. (in Russian).
- Chichagova O.A. Absolute and relative ages of soils from radiocarbon dating: development of I.P. Gerasimov's ideas. *Eurasian Soil Science*. 2005. Vol. 38. No. 12. P. 1277–1285.
- Sheinkman V.S., Melnikov V.P., Sedov S.N., Parnachev V.P. New evidence of the nonglaciaded development of the northern part of the Western Siberian lowland in the quaternary period. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 2. P. 1430–1433. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X17120078>.
- Sheinkman V.S., Melnikov V.P. Evolution of the understanding of cold and possible paths of its development in Earth sciences. *Earth's Cryosphere*. 2019. Vol. XXIII. No. 5. P. 3–14. DOI: [10.21782/EC2541-9994-2019-5\(3-14\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-5(3-14)).
- Sheinkman V.S., Melnikov V.P., Parnachev V.P. Analysis of pleistocene cryogenic and tectonic processes in Northwestern Siberia: a cryoheterotopic approach. *Doklady Earth Sciences*. 2020. Vol. 494. No. 1. P. 741–744. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X20090160>.
- Sheinkman V.S., Sedov S.N., Rusakov A.V., Melnikov V.P. Evidence of permafrost in paleosols: cryotraceological approach. *Earth's Cryosphere*. 2019. Vol. XXIII. No. 1. P. 45–53. DOI: [10.21782/EC2541-9994-2019-1\(45-53\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-1(45-53)).
- Sheinkman V.S., Sedov S.N., Bezrukova E.V. Paleoeology of the north of Western Siberia in the last cold epoch of the Pleistocene: new evidence and scenarios. *Ecosystems: ecology and dynamics*. 2022. Vol. 6. No. 4. P. 71–88. DOI: <https://doi.org/10.24412/2542-2006-2022-4-71-88>. (in Russian).
- Bronger A., Winter R., Sedov S.N. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia. *Catena*. 1998. Vol. 34. No. 1–2. P. 19–34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00079-4).
- Haesaerts P., Borziac I., Chekha V. P., Chirica V., Drozdov N. I., Koulakovska L., Orlova L. A., van der Plicht J., Damblon F. Charcoal and wood remains for radiocarbon dating Upper Pleistocene loess sequences in Eastern Europe and Central Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. Vol. 291. No. 1–2. P. 106–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.034>.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Records. *Paleoceanography and Palaeoclimatology*. 2005. Vol. 20. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>.
- Möller P., Benediktsson Í.Ö., Anjara J., Ole Bennike O., Bernhardson M., Funder S., Håkansson L.M., Lemdahl G., Licciardi J. M., Murray A.S., Seidenkrantz M.S. Glacial history and paleoenvironmental change of southern Taimyr Peninsula, Arctic Russia, during the Middle and Late Pleistocene. *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 196. P. 409–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.004>.
- Péwé T.L. Sand-wedge Polygons (Tesselations) in the McMurdo Sound Region, Antarctica – Progress Report. *American Journal of Science*. 1959. Vol. 257. No. 8. P. 545–552.
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallenga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M., A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 106. P. 14–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>.
- Sedov S., Rusakov A., Sheinkman V., Korkka M. MIS3 paleosols in the center-north of Eastern Europe and Western Siberia: Reductomorphic pedogenesis conditioned by permafrost? *Catena*. 2016. Vol. 146. P. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.022>.
- Sedov S., Sheinkman V., Bezrukova E., Zazovskaya E., Yurtaev A. Sartanian (MIS 2) ice wedge pseudomorphs with hydromorphic pedosediments in the north of West Siberia as an indicator for paleoenvironmental reconstruction and stratigraphic correlation. *Quaternary International*. 2022. Vol. 632. P. 192–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.002>.
- Sheinkman V. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – New evidence and interpretation. *Quaternary International*. 2016. Vol. 420. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.147>.

Sheinkman, V., Sedov S., Shumilovskikh L., Korkina E., Korkin S., Zinovyev E., Golyeva A. First results from the Late Pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS3. *Quaternary International*. 2016. Vol. 418. P. 132–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.095>.

Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. Bezrukova E., Dobrynin D., Timireva S., Rusakov A., Maksimov F. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section. *Quaternary Research*. 2021. Vol. 99. P. 204–222. DOI: <https://doi.org/10.1017/qua.2020.74>.

Sheinkman V., Sharapov D., Sedov S. Northwest Siberia as a MIS2 desert? Inferences from quartz morphoscopy and polygonal ice wedges. *Quaternary International*. 2022. Vol. 620. P. 46–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.06.007>.

Svendsen J.I., Krüger L.C., Mangerud J., Astakhov V.I., Paus A., Nazarov D., Murray A. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age, Marine Isotope Stages 5–2. *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 92. P. 409–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.10.008>.

Velichko A.A. Loess-paleosol formation on the Russian Plain. *Quaternary International*. 1990. Vol. 7–8. P. 103–114. DOI: [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(90\)90044-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(90)90044-5).

Velichko A.A., Timireva S.N., Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Smith L.C. West Siberian Plain as a late glacial desert. *Quaternary International*. 2011. Vol. 237. No. 1–2. P. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.013>.

Received 29 November 2023

Accepted 19 December 2023

Published 25 December 2023

About the authors:

Sheinkman Vladimir Semyonovich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher in the Earth Cryosphere Institute, Tyumen Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russia); vlad.sheinkman@mail.ru

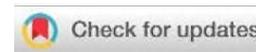
Sedov Sergey Nikolaevich – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Earth Cryosphere Institute, Tyumen Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russia); Leading Researcher in the Institute of Geology, National Autonomous University of Mexico, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, CDMX (Mexico, Mexico); serg_sedov@yahoo.com

Androkhonov Vladimir Alekseevich – Doctor of Biological Sciences, Director of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); androhanov@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/)



СУКЦЕССИЯ БИОЭКОСИСТЕМ КАК ХРОНО-ХОРОЛОГИЧЕСКИЙ ФЕНОМЕН

© 2023 В. Г. Мордкович 

ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН,
ул. Фрунзе, 11, г. Новосибирск, 630091, Россия. E-mail: mordkovichvg@rambler.ru

Статья посвящена аспектам сукцессионной теории, незаслуженно остающихся в тени «монументальных устоев» классиков фитоценологии. В последнее время к сукцессиям проявляют повышенный интерес микробиологи, зоологи, почвоведы, что обуславливает изменение и дополнение некоторых исходных понятий. На примере почвенных беспозвоночных животных показано, что сукцессии – это не произвольная смена биоты во времени, а регламентированный механизм регенерации и упорядочения нарушенных биоэкосистем в соответствии со стандартами соответствующего геобиома.

Сукцессия не сугубо хронологический, а хроно-хорологический механизм самоорганизации биоэкосистем, управляемый не только биологическими, но и абиотическими факторами. Среди вторых принципиальное значение имеют топо-катены местообитаний, расположенные цепочкой вдоль профиля мезорельефа. Они играют ключевую роль в контенте и идентификации ценологических стратегий и адаптивных тактик биоты, а также консолидируют гетерохронные сообщества разных геоморфологических позиций катены в интеркалярную метасукцессию. Сукцессия и эволюция, вопреки назойливым попыткам аналогизировать эти процессы, семантически несовместимы. Цель эволюции – пополнить биоразнообразие элементами новизны с непредсказуемыми последствиями. Сукцессии направлены на консервацию накопленного позитивного экологического опыта, противостоящего эволюционным новациям.

Ключевые слова: сукцессия; зооэдафон; катена; хроно-хорология.

Цитирование: Мордкович В.Г. Сукцессии биоэкосистем как хроно-хорологический феномен // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e216. DOI: [10.31251/pos.v6i3.216](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.216).

Одним из узловых аспектов науки экологии служит учение о сукцессиях, то есть процессах самовосстановления природы после разрушительных катаклизмов. Этот процесс происходит не произвольно, а по изначально заложенному в природе сценарию, поэтапно стереотипно воспроизводя биоэкосистему из хаоса в исходное состояние, исторически предназначенное определённому месту земной поверхности. Фундаментальная значимость экологических сукцессий в судьбе биосферы дала право классику экологии Р. Маргалефу (1992) заявить, что представление о сукцессиях достойно занять в экологии такое же центральное место, как учение об эволюции в биологии. Сукцессии привлекают людей не только пригодностью в антропогенном хозяйстве, но также тайной воссоздания биоэкосистем после гибели или крупного нарушения в прежнем облике, напоподобие легендарной птицы Феникс (Clements, 1916).

Движущей силой сукцессии служит феномен самоорганизации материи. Под этим термином в философии, гносеологии, математическом моделировании, экологии подразумевается процесс упорядочения физико-химических и биологических явлений в природных системах по естественной или искусственной программе, изначально заложенной в свойствах косной и живой материи, гарантируя её вечность наперекор постоянным трендам времени и пространства (Философский энциклопедический словарь, 1983).

Самоорганизация проявляется на всех последовательных уровнях совершенствования жизни, отличаясь спецификой элементарных объектов, механизмом трансформации биоты и конечным результатом преобразований (Михайловский, 1984; Бурковский, 2006). На клеточно-молекулярном уровне движущим механизмом самоорганизации служит репликация макромолекул нуклеиновых кислот; на организменном – онтогенез; на популяционно-видовом уровне – комбинирование составом и структурой видов биоты; на экосистемном уровне – сукцессия.

Поскольку в разных компонентах биоэкосистемы самоорганизация проявляется своеобразно, в экологии возникло несколько теоретических концепций, объясняющих механизм сукцессии (Миркин, Наумова, 2012; Разумовский, 1981). Наиболее популярны три. Согласно первой, сукцессия биоэкосистемы осуществляется исключительно живыми организмами без учёта внешней среды. Ей отводится всего лишь «роль сценической декорации к спектаклю». Движущей силой сукцессии считаются противоречия, то и дело возникающие в сообществе биоты, но затухающие на

конечном этапе сукцессии (климаксе). Вторая концепция трактует сукцессию как непрерывную смену биологических видов, независимо друг от друга, но адаптированно по отношению к градиентам экологических условий внешней среды. Согласно третьей концепции (Титлянова, Самбуу, 2016), движущей и направляющей сукцессию в нужное русло силой служит биотический круговорот химических соединений и их соединений с совместным участием биоты и среды, взаимодополняющих друг друга. В этом случае цель сукцессии — максимально возможное замыкание круговорота, придавая ограниченному количеству вещества свойства бесконечности и необратимости в конце цикла превращений.

Все три концепции, несмотря на острые дискуссии, рассматривая разные аспекты общего комплексного явления, благополучно сосуществуют в информационном поле экологии, подтверждая, что смена представлений — это не война на взаимоничтожение, а поиск компромиссов (McIntosh, 1985). Таким компромиссом может служить предлагаемая автором хронохорологическая концепция сукцессии. Она совмещает в себе лучшее предыдущих и оригинальные аспекты на базе катенного подхода к явлению самоорганизации природных биоэкосистем.

Сегодня большинством экологов принято, что непосредственным двигателем сукцессии служит не формальная смена биологических видов в сообществе, а замещение типов ценотической стратегий, свойственных определённым представителям биоты на определённом этапе самоорганизации биоэкосистем, где они доминируют в спектре биоразнообразия. Количество **типов ценотических стратегий** (далее – **ТЦС**), то есть способов выживания в часто и быстро меняющейся среде обитания, ограничено. Традиционно выделяют три (Раменский, 1935; Grime, 1979; Миркин, Наумова, 2012). Рудералы отличаются мощной энергией размножения, высокой плотностью популяций, низким уровнем видового разнообразия, способностью усваивать из внешней среды только легко доступные минеральные ресурсы. Такие виды доминируют в сообществах ранних этапов сукцессии. Стресс-толеранты получают преимущества на медиальном этапе сукцессии, благодаря терпимости к широкой амплитуде лимитирующих факторов. Виды-конкуренты доминируют на заключительном этапе сукцессии в условиях её стагнации. Все три типа ценотической стратегии представлены на всех этапах сукцессии, но в разном процентном соотношении. По ходу сукцессии преимущество в сообществе переходит от рудералов к стресс-толерантам и далее к конкурентам. Отмеченные ТЦС характерны для растений. Участие беспозвоночных животных существенно дополняет контент сукцессий (Auclerc et al., 2019; De Deyn et al., 2003; Seer et al., 2021).

Беспозвоночным животным, кроме трех указанных ранее ТЦС свойственны также: клинёры, интервенты, обскуранты, ассенизаторы, отшельники. Надёжность проявления каждого ТЦС обеспечивает обширный набор специфических адаптивных тактик. Среди них различают: топические – по предпочтению одних местообитаний другим; трофические – по способу питания и усвоения ресурсов жизнеобеспечения; фабрические – по способности трансформировать среду обитания на пользу или во вред себе; форические – по склонности биологических видов к форезии, т.е. перемещению с помощью биотических и абиотических агентов; демографические – по репродукционному потенциалу и отношению числа видов и численности особей (Беклемишев, 1970).

Клинёры обитают на стыке гидро-, атмо- и литосфер в супралиторали морей и озёр. Условия жизни там характеризуются сочетанием свойств жидкой, газообразной и твёрдой физических сред, анаэробного и аэробного режимов. Экзотикой является отсутствие автотрофов. Ценотическая стратегия клинёров нацелена на устранение дискомфорта, возникшего после скоростной гибели водной биоэкосистемы. Их задача – зачистка местообитания от гниющих отходов водного ценоза и перевод его в аэробный режим. Эффективной топической тактикой клинёров служит тесная привязанность к узкой полосе контакта водоёмов и суши. Из трофических тактик клинёры предпочитают неизбирательную сапрофагию: питание илом, детритом, некро-, копро- и зоосапрофагию. Необходимой фабрической тактикой служит рыхление минерального грунта, бурение в нём горизонтальных и вертикальных тоннелей. Перфорируя грунт, вороша и съедая массу органических выбросов, клинёры обеспечивают аэрацию и разложение органического субстрата до минеральных продуктов. Безошибочному выбору подходящего местообитания способствуют такие форические тактики, как спринтерские миграции и сенсорные адаптации, ориентированные на запах сероводорода. Большинство клинёров (ракообразные, хелицеровые, насекомые) пользуются широчайшим набором средств передвижения в поливалентной зыбкой среде: плавают, бегают, прыгают, летают, перекатываются, ползают, протискиваются в твёрдом грунте, шмыгают в ворохе

водорослей, легко переходя от одного способа движения к другому. Важнейшими демографическими тактиками являются укороченный онтогенез и высочайший репродуктивный потенциал.

Своеобразна ценогическая стратегия беспозвоночных животных, склонных к вспышкам массового размножения и внезапной интервенции в подходящие местообитания. У интервентов хорошо развиты кинетические способности к дальним перелётам. Из трофических тактик они предпочитают миксофагию. Внезапное вторжение интервентов наиболее характерно для EЛ-позиций катен. Особый тип ТЦС – обскуранты, характерен для климаксовых сообществ. Эти виды – противники всего прогрессивного, ради сохранения традиционных устоев существования. В топическом плане они домоседы, предпочитающие ограниченный выбор местообитаний и экологических ниш. Их фабрические адаптации направлены на стабилизацию среды обитания путём накопления гумуса в консервативных формах. Своеобразен ТЦС животных-ассенизаторов. Они призваны оперативно утилизировать мортмассу фекалий, трупов животных, локально вкраплённых медальонами в основной фон местообитания.

Долгое время тон в сукцессионных исследованиях задавали учёные, которые признают сукцессией только многолетний тренд изменения биоэкосистем в рамках конкретного, якобы автономного местообитания (Jonson, Miyanishi, 2008). Между тем, любая биоэкосистема – вовсе не крепость, окружённая непреодолимыми преградами от других биоэкосистем. Исходя из этого, со времён основоположников сукцессионного учения до наших дней, востребован метод хроно-хорологических аналогов. Его суть заключается в изучении не одной, субъективно избранной биоэкосистемы, а их спектра — по степени приближения к климаксу (Мордкович, 2017). Непременным условием является их аналогичная палеоэкологическая история.

С первого взгляда метод замены времени пространством может производить впечатление излишне экстравагантного. Однако он имеет фундаментальные гносеологические корни в философии, теории относительности, биосферологии, математическом моделировании. Там давно признано аксиомой, что время и пространство представляют собой не самостоятельные категории, а переходят одно в другое, составляя неразделимую целостность. Время течёт безостановочно, без ощутимых градаций, интервалов, границ и вектора. Оно – неуловимо, невыразимо и воспринимается живыми существами, как объективная реальность только через формы и процессы, зафиксированные в пространстве (Пригожин, 1985; Пригожин, Стенгерс, 2000). Непременным условием применения метода хроно-хорологических аналогов служит необходимость рассматривать сукцессии биоэкосистем относительно упорядоченной матрицы местообитаний (Маргалев, 1992). Пренебрежение этим фактором – крупнейший недостаток экологии прошлого века (Хански, 2010). В организации пространства и запечатлённого в нём времени ключевое значение имеют географические и топографические параметры земной поверхности (Van der Putten et al., 2010; Hotchkiss et al., 2000). Наиболее значимы цепочки сопряжённых местообитаний вдоль профиля мезорельефа (катены). На суше более 90% площади равнин занимают склоны с уклоном поверхности около 10° и превышением высот – десятки, сотни метров. По склонам активно перемещаются с боковым стоком приземный воздух и тепло, поверхностные, внутрпочвенные, грунтовые воды, растворенные или взвешенные в них твёрдые вещества. В результате, любая катена Земного шара представляет собой априори самоорганизованную матрицу со стандартным набором и взаиморасположением разновозрастных местообитаний: **плакорного (PL)** на плоском или слабовогнутом водоразделе, **элювиального (EL)** в верхней самой крутой части склона, **транзитного (TR)** в середине склона, **аккумулятивного (AK)** у его подножия и **супераквального (SA)** в пограничье суши и водоёма (Глазовская, 1964) (рис. 1). Местообитания всех позиций катены получают одинаковую норму атмосферных осадков, типичную для соответствующего региона. На плоской позиции плакора приток воды этим и ограничивается. Зато она не стекает по склону. EЛ-позиция катены теряет большую часть поступающих атмосферных осадков с боковым стоком из-за крутого уклона. TR-позиция, кроме атмосферных осадков, получает дополнительное увлажнение с EЛ-позиции, а также с грунтовыми водами, которые здесь дотягиваются до нижней части почвенного профиля. АК-позиция получает в дополнение к атмосферным осадкам большие дозы воды со стоком из позиций, занимающих более высокое положение на геоморфологическом профиле катены, а также с грунтовыми водами, достигающими здесь поверхности почв. SA-позиция катены постоянно переувлажнена и периодически затапливается паводковыми водами.

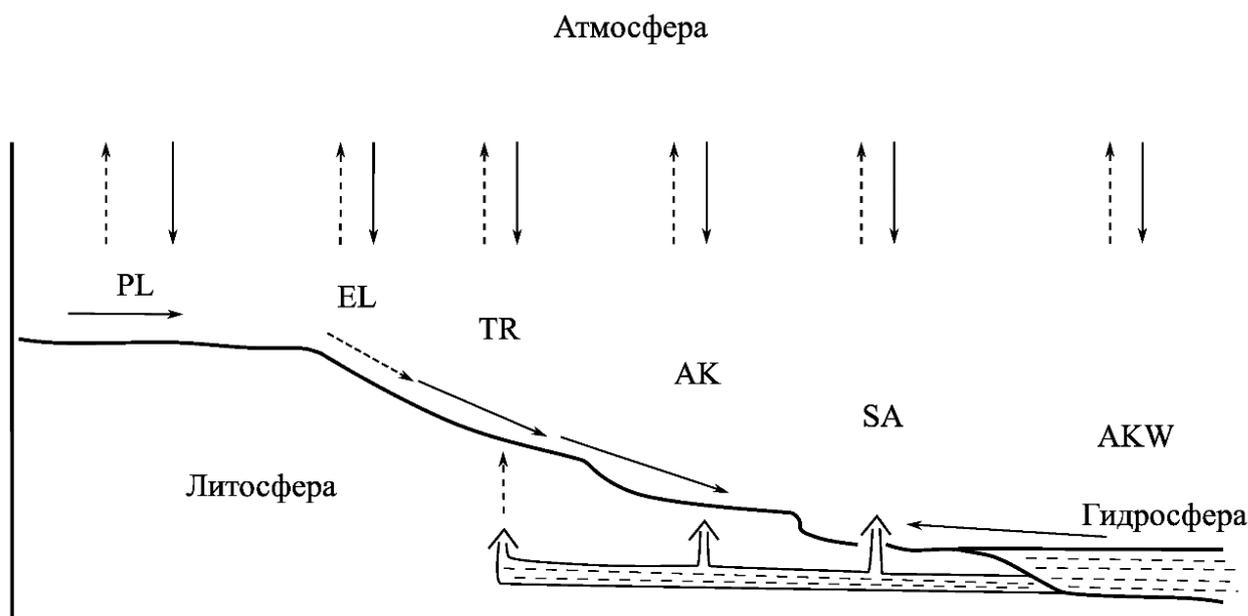


Рисунок 1. Схема стандартной катены – цепочки местообитаний, взаимобразно дополняющих друг друга в пространстве по профилю мезорельефа в реальном и историческом времени. Условные обозначения. Позиции топокатены: АКВ – аквальная, SA – супераквальная, АК – аккумулятивная, TR – транзитная, EL – элювиальная, PL – плакорная. Стрелки: —> – поступление влаги, — —> – испарение влаги, ==> – поступление влаги с грунтовыми водами.

Сверху вниз по катене градиентно растёт влажность почвы и приземного слоя воздуха, уменьшается количество тепла, увеличивается засоление почв и нестабильность экологических условий. Градиентный характер изменения внешней среды не препятствует прямым и обратным связям между сообществами биоты в рамках катены. Распределение биологических видов и их сообществ вдоль катены предопределено устройством матрицы местообитаний. Однако сообщества биоты разных частей катены, несмотря на своеобразие, сохраняют возможность обмениваться составом биоты, благодаря миграциям видов вдоль градиентного профиля. В целом, на каждой позиции катены сукцессия отличается вектором, ритмом, скоростью и исполнителями. Сукцессия на SA-позиции завораживает стремительными регулярными замещениями водной экосистемы амфибиотической. В местообитании АК-позиции продолжительность сукцессии увеличивается, а маятниковый характер изменения сообществ сменяется векторным. На TR-позиции сукцессия затягивается на десятки и сотни лет, отличаясь каскадным характером превращений. Сукцессия на EL-позиции происходит под прессом крупных потерь воды со стоком, умеренных в гумидных и экстраординарных в аридных регионах. Поэтому местообитания EL-позиции служат «порталом» для внедрения в сообщество видов биоты с аридными экологическими стандартами из более южных широт. На PL-позиции, со стабильными экологическими условиями, по сравнению с остальными участками катены, сукцессия стагнирует, ограничиваясь сезонными флуктуациями отдельных компонентов биоэкосистемы. Возобновление сукцессии возможно при антропогенных нарушениях.

Снизу вверх по катене каждая последующая биоэкосистема – старше по возрасту и более продвинута к климаксу, чем предшествующие ей на геоморфологическом профиле.

В совокупности сукцессии всех местообитаний катены образуют композицию, устроенную по принципу многоступенчатой космической ракеты.

Среди факторов отбора в биоэкосистему видов с ТЦС, адекватными конкретному этапу сукцессии, важнейшую роль играет катенная матрица местообитаний. Клинеёры предпочитают супераквальную позицию катены, рудералы – аккумулятивную, стресс-толеранты – транзитную, интервенты – элювиальную, обскуранты – плакорную, ассенизаторы – любую.

В качестве примера сукцессионной последовательности биоэкосистем выделяются особым колоритом и древней историей биоэкологические сукцессии в морской супралиторали. Пределы других геобиомов ограничены определёнными географическими широтами. Супралитораль имеет азональное расположение и существует в биосфере со времён разделения земной поверхности на сушу и океан (Пономаренко, 2013).

Местообитание SA-позиции с амбивалентными земно-водными экологическими условиями кочует по пляжу с приливами-отливами. После спада воды на пляже остаются валы мортмассы водорослей и других организмов. Температура песка под толщей выбросов даже в жаркую июльскую погоду не превышает 10–12 °С. Влажность приземного слоя воздуха, выбросов и песка – 100%, благодаря постоянным заплескам волн. Местообитание АК-позиции катены, между верхней каймой сизигийного и нижней перигейного приливов представляет собой мозаику чередующихся пятен гниющих выбросов и голого песка, нагретого до 42–52 °С. Под выбросами температура снижается до 25–28 °С. Влажность почвы – 50–60%. Местообитание TR-позиции катены, выше пляжа, представляет собой мезофитный луг из разнотравья и кустарников. Температура почвы снижается до 17–18 °С, влажность – до 30–40%. EL-позиция катены на древней морской террасе, намытая абразивным материалом тысячи лет назад, когда уровень океана был выше, чем теперь. Сегодня на этом месте сложился фитоценоз из низкорослого курильского бамбука. Пологая подгорная равнина, поросшая парковым лесом, сочетающим в себе бореальные, неморальные и субтропические элементы биоты, завершает приморскую катену. Возраст их местообитаний – сотни тысяч лет, о чём свидетельствуют хорошо развитые бурые лесные почвы.

Самоорганизация сообществ биоты в отмеченной цепочке разновозрастных местообитаний совершается под контролем фундаментальных принципов биодинамики: изменчивости, наследования и естественного отбора оптимальных элементов организации. Эта знаменитая триада факторов впервые была обозначена Ч. Дарвином применительно к видообразованию. Однако эти принципы имеют более высокий гнесеологический ранг и могут быть использованы также и на экосистемном уровне организации жизни, но, разумеется, с другим смысловым содержанием. Под изменчивостью подразумевается поиск оптимального баланса между разнообразием видов и числом их особей. На SA-позиции катены доминантную роль в составе зооэдафона играют водные ракообразные и сухопутные аэробные организмы, с адаптациями к жизни в чрезвычайно переменной среде. Динамическая плотность населения беспозвоночных животных достигает на начальном этапе сукцессии значений до 1787 экз/м²/сутки. Лидерами сообщества оказываются рачки и мокрицы. На АК-позиции приморской катены суммарная динамическая плотность зооэдафона сохраняется на очень высоком уровне (1166 экз.), но обеспечивают её уже не 9, а 28 видов зооэдафона. Доминантная роль в сообществе переходит от ракообразных к насекомым (88% населения). Появляются в небольшом количестве пауки (*Aranea*) (17% населения). Лидерство в сообществе захватывают жуки-чернотелки (*Coleoptera*, *Tenebrionidae*). На TR-позиции плотность населения снижается на порядок величин. Видовое разнообразие сохраняется на прежнем уровне. Резко сокращаются в числе ракообразные (до 8%), но возрастает до 21% доля пауков. Лидерами становятся крупные пауки-волки *pp. Pardosa* и *Trachosa (Lycosidae)*. Из насекомых наиболее заметны жуки-жужелицы (*Carabidae*). На EL-позиции катены доминантами становятся насекомые (79% численности и 56% видов). На PL-позиции доминантные роли удерживают насекомые (74% численности, 28 видов), прежде всего жуки-жужелицы (*Carabidae*). Доля пауков (*Aranea*) увеличивается до 28%. При этом, даже в условиях климакса, в сообществе присутствуют ракообразные. Отношение числа видов зооэдафона к числу особей на SA-позиции приморской катены невелико, что свидетельствует о неупорядоченности сообщества, а на АК-позиции возрастает вдвое. На TR-позиции отношение увеличивается до 1,5–1,7, подтверждая возросший уровень самоорганизации сообщества. Наследование состава населения в характеризуемом сукцессионном ряду иллюстрирует коэффициент общности состава биоты. Доля видов, сохранившихся от предшествующего состава в последующем, в начале сукцессии составляет 47%, но по ходу самоорганизации сообщества снижается вдвое везде, кроме EL-позиции, где возрастает до 55%. Выбор ТЦС, оптимальной для данного этапа сукцессии, подтверждается степенью доминирования соответствующих видов биоты. В сообществе SA-позиции безраздельно господствуют клинёры. На АК-позиции их доля снижается до 57%, освобождая место в сообществе рудералам. На TR-позиции доминирование переходит к стресс-толерантам (43%) и интервентам (31%). В климаксовом сообществе плакора в структуре населения педобионтов доминируют обскуранты (86%). Сравнение спектров ценотической стратегий зооэдафона показало, что различия сообществ SA и АК-позиций катены невелики, АК и TR, а также EL и PL-позиций – вдвое больше. Зато различие спектров их ценотических стратегий невелико на TR и EL-позициях геоморфологического профиля приморской катены.

На приморской катене отчётливо проявляются признаки, отсутствующие или завуалированные в других сукцессиях: древность происхождения, сохранность в составе биоты на

всех этапах саморазвития вплоть до климакса полуводных ракообразных (*Amphypoda*), даже на E1 и P1-позициях катены, обратимость состояния сообществ в случае перемены экологических условий, яркие следы бывшего подтопления почвенного профиля грунтовыми водами на всём протяжении катены.

Параметры сукцессий на приморских и приозёрных катенах похожи на 70–80%. С учётом этого обстоятельства можно с уверенностью отметить, что приморские сукцессии представляют собой прообраз внутриконтинентальных на берегах 117 млн озёр мира с общей линией уреза воды, превышающей морскую в 14 раз.

Одним из негативных последствий глобальных или региональных трендов потепления является аридизация и высыхание до дна мелководных озёр. В результате возникают местообитания (перевеваемые пески, солончаковые пустоши, глинистые пустыни), предельно лимитированные по всем ресурсам жизнеобеспечения, а то и токсичные для биоты. Количество и площадь таких ландшафтов растут на всех материках и широтах в связи с глобальным потеплением. На юге Западно-Сибирской равнины площадь мелководных озёр, обреченных на высыхание, превышает сегодня 3,5 тысячи км². Периодически высыхает крупнейшее озеро Чаны и его многочисленные анклавы, переходя из пульсирующего водного режима в стационарно-сухопутный (Васильев и др., 2005). Возникшие заново местообитания представляют собой солончаки, покрытые пухлым слоем выпотевших солей, растрескавшиеся на правильные многогранники, лишённые высшей растительности. Такие местообитания в Азии называют такырами. Они занимают в рельефе местности самое низкое положение, пристыковываясь к давно существующей катене, удлиняя её дополнительной **зеро-позицией**. Сюда не дотекают воды поверхностного и внутрипочвенного стока из верхних частей катены. Грунтовые воды не дотягиваются до почвенных горизонтов. Единственным источником влаги остаются атмосферные осадки. Однако они быстро испаряются с обнаженной поверхности. Возникает острейший дефицит влаги. Зеро-позиция перенасыщена солями: нитратами, сульфатами, хлоридами, сульфидами. Отмеченные факторы создают дискомфортные условия жизни для организмов, не обладающих адаптациями для регуляции осмотического давления. Автотрофы представлены в зеро-позиции катены только сине-зелёными водорослями. В смеси с солями, илом, минеральными продуктами они образуют плотную корочку, толщиной 1–5 см. Подсыхая, она отслаивается от остального грунта, оставляя под собой тесную полость, служащую убежищем для членистоногих, рискнувших здесь поселиться. Корочка и многочисленные трещины грунта стимулируют превращение анаэробной среды в аэробную. Бывшее дно имеет летом температуру 5-сантиметрового слоя почвы 20–23 °С. В жаркие дни температура поднимается до 42–44 °С. Концентрация солей в грунте бывшего дна превышает 7–8%. Минерализация грунтовых вод достигает 20 г/л, рН донного субстрата – 9.

Зооэдафон зеро-позиции, несмотря на жёсткие экологические лимиты, представлен на такыре двухнедельного возраста 16 видами членистоногих. Через месяц видовое разнообразие сообщества сокращается до 6, а на 50-летнем такыре Юдинского плёса озера Чаны – до 4 видов. Динамическая плотность населения педобионтов убывает с 408 до 16 экземпляров/м²/сутки. Сразу после исчезновения водного зеркала в составе зооэдафона доминируют жуки *C. chloroticus*. Их обилие достигает трехзначной цифры. Субдоминантами являются ещё 2 вида семейства *Carabidae* (*C. rufaeneus*, *C. elegans*). На двухнедельном такыре к указанным видам присоединяются жуки *Heterocerus*, *Dyschirius*, а также медведки (*Grylotalpa*), уховёртки (*Labidura*). На 50-летнем такыре встречаются лишь 4 вида членистоногих.

Наследуемость видового состава зооэдафона достигает 50–67%. Неповторимой особенностью биодинамики сообществ зооэдафона такыров в лесостепи является абсолютное господство видов с ценотической стратегией отшельников. Их трофическая тактика базируется на сапрофагии или зоосапрофагии (жуки-пилоусы *Heterocerus*, бегунчики *Cardioderus*, уховёртки, медведки). Фабрические тактики основаны на ярко выраженной роющей деятельности и использовании скважности почвы. Имаго *Heterocerus* совокупно за лето выбрасывают из вертикальных норок 2730 м³ грунта, то есть 150–160 кг в воздушно-сухом весе на гектар. Благодаря роющей деятельности членистоногих, меняются физическое состояние среды и её химический состав. Порозность почвы увеличивается на 30–40%. В крупчатом субстрате выбросов из норок сумма легкорастворимых солей Na и K по данным водной вытяжки достигает 8,3% по сравнению с 3,1 в нетронутой роющей деятельностью почве. Особенно впечатляет роющая деятельность медведок. Одна их особь за сутки рыхлит верхний 5-сантиметровый слой грунта, оставляя за собой вспаханный шлейф почвы шириной 3 см, глубиной 5–7 см, площадью около 3 м². С учетом динамической плотности популяции

медведок (до 12 экз./м²/сутки), эти членистоногие являются ведущим фактором перевода почв из непромывного режима в промывной. Почва, взрыхленная членистоногими, удобренная их фекалиями, стимулирует микробную активность аэральной микрофлоры. В итоге содержание гуминовых кислот во взрыхленной почве растет до 29%, по сравнению с исходным субстратом. Доля фульвокислот снижается с 38 до 21%. Далее, упрощённое до предела сообщество биоты стагнирует на долгие годы в состоянии экологического тупика.

Ярким примером бесцеремонного вмешательства Человека в процесс самоорганизации биоты служит превращение естественных биоэкосистем в агроценозы. Увеличение пахотных площадей обычно происходит соразмерно росту численности Человечества. Однако на этом прагматичном фоне то и дело случаются коллизии, например, неоправданная и неумеренная распашка целинных земель. Так, в Казахстане, в угоду идеологическим соображениям был распашан чудом уцелевший участок целинной сухой степи, мозоливший глаза излишне ретивым хозяйственникам. Однако худа без добра не бывает — появилась возможность наблюдать сукцессию с нуля и сравнить её с долговременной эксплуатацией агроценозов.

В середине лета целинный таксоценоз мезоартропод каштановой почвы включал 17 видов членистоногих (насекомых, пауков, ос-немок (*Mutillidae*) и др.). Суммарная динамическая плотность населения достигала 201 экземпляра на 50 ловушко-суток учёта, указывая на сбалансированность демографии сообщества. Внезапная распашка привела к сокращению видового разнообразия сообщества до 3 видов, а динамическая плотность населения — до десятка особей. Однако уже на следующий год, после перезимовки, население мезоартропод первичного пара восстановилось до кондиций, близких к целинным. При этом, к доминантам целинной сухой степи — жукам-ксерофилам семейства *Tenebrionidae* (*T. nomas*, *Pl. hypolithos*, *Bl. halophila*) и хищным *Carabidae* (*C. cribellatus*, *T. gigas*), благодаря интенсивному разложению корней степных растений, погибший после распашки прибавились мезофилы-сапрофаги *Gon. rugmaeum*.

Наследование состава сообществ зооэдафона целины сообществом первичного пара составило 37%, а сообществ первичного и многолетнего севооборотного паров — только 23%.

В сообществе мезоартропод первичного пара, по сравнению с целиной, где доминировали виды с ценотической стратегией обскурантов (94%), добавились рудералы (35%). Различия спектра ценотических стратегий мезоартропод первичного и многолетнего паров достигли верхнего предела. Сукцессионного потенциала сухостепного климаксового сообщества зооэдафона хватило, чтобы быстро и успешно преодолеть внезапную экологическую катастрофу.

В стандартной агросукцессии (севооборотный многолетний пар — посев зерновых — многолетняя залежь — целина) на этапе многолетнего пара контингент видов зооэдафона остаётся достаточно высоким (22 вида), но вдвое уступает целинному сообществу по числу видов зооэдафона, превышая динамическую плотность населения в 6 раз. В почве посева зерновых видовое разнообразие мезоартропод, по сравнению с многолетним паром, остаётся на прежнем уровне. Зато динамическая плотность населения снижается в 2,5 раза, свидетельствуя об упорядоченности демографической структуры сообщества. На залежном этапе агросукцессии отношение числа видов и особей возрастает до 2,6.

Наследование видового состава зооэдафона от целины к многолетнему пару составляет 27%, а далее по ходу агросукцессии последовательно растёт до 37, затем 59–66%.

Спектр ценотических стратегий сообщества целины отличается подавляющим превосходством обскурантов (81%). В сообществе многолетнего пара их полностью замещают (94%) рудералы. На посеве доля рудералов в сообществе снижается до 79%, на залежи — до 54%, позволяя закрепиться на этом этапе агросукцессии видам стресс-толерантам.

Все сообщества зооэдафона севооборотной серии агроценозов похожи между собой по составу видов и спектрам их ценотической стратегий, но кардинально отличаются от сообществ целины. Возврат сообществ к эталонному состоянию степи происходит через 25–30 лет с частыми рецидивами.

На фоне повальной и глобальной деградации биоразнообразия, наблюдаемой в последние десятилетия, ещё опасней — безвозвратное исчезновение с лица Земли привычных местообитаний, они служат не просто камерой хранения биоразнообразия, а фундаментальным условием его существования.

Ярким примером превращения упорядоченной матрицы местообитания в унылое однообразие служат техногенные ландшафты. Их площадь сегодня превышает 10% земной суши и растёт в геометрической прогрессии (Wanner, Dunger, 2002). Солидный вклад в «ассортимент»

техногенных сред вносит угледобыча, в том числе открытым способом. Отвалы вскрышных пород в окрестностях углеразреза укрывают толстым плащом натуральные ландшафты.

Биота населяет свежееотсыпанные отвалы с первых минут их существования. Первопоселенцами становятся протисты, содержащиеся изначально в материнских породах в инцистированном состоянии, подстилающих современные биоэкосистемы. Споры и семена высших растений, рано попадая в отвал с помощью пассивного переноса, прорастают лишь на следующий год. Беспозвоночные животные проявляют функциональную активность в первые же часы существования отвала. Наиболее успешно колонизирует техногенные субстраты мезофауна.

Характерным примером техногенного ландшафта и происходящих в нем сукцессий может служить углеразрез на юге Красноярского края в Сибири. Принудительная нивелировка бульдозерами первичного холмисто-грядового рельефа отвала превратила его в искусственный плакор. Планировка проведена стандартными участками, поэтапно, год за годом. В результате возникла серия разновозрастных местообитаний и рекультивированных биоэкосистем. Все они занимают одинаковое плакорное положение в мезорельефе, представляют собой нетоксичные четвертичные суглинки с примесью щебня алевролитов; имеют одинаковые гидротермические условия и химические свойства. Зато возраст этих новообразованных биоэкосистем с момента технической планировки до начала исследований растёт градиентно: 3 дня, 2 недели, 1 месяц, 1 год, 2 года, 3 года, 6 лет, 27 лет. В характеризуемом хроно-хорологическом ряду отмечен перманентный рост биоразнообразия растений с 0 до 60 видов, проективного покрытия растительного покрова – с 0 до 90%, а запасов живой фитомассы с 207 до 2604 г/м² (Мордкович, Любечанский, 2019).

Зооэдафон представлен разнообразно: пауки, сенокосцы (*Opiliones*), многоножки (*Chilopoda*), осы-немки (*Mutillidae*), уховёртки, клопы, жуки (*Dytiscidae*, *Hydrophilidae*, *Chrysomelidae*, *Curculionidae*, *Staphylinidae*, *Carabidae*). Наиболее репрезентативно представлены жуки-жужелицы (*Carabidae*). Число их видов (60) на 1–2 порядка величин превышает разнообразие других таксонов беспозвоночных. Плотность населения достигает трёхзначных цифр, благодаря чему они наиболее потентны в качестве инструмента анализа сукцессий зооэдафона.

При произвольной рекультивации, от инициального этапа сукцессии к терминальному, видовое разнообразие таксоцена *Carabidae* растёт от 3 видов до 41. Динамическая плотность населения на инициальном этапе сукцессии достигает 723 экземпляров/50 ловушко-суток учёта. По ходу самоорганизации динамическая плотность зооэдафона меняется волнообразно в пределах 192–404 экз./50 ловушко-суток (рис. 2).

Отношение числа видов и особей по ходу сукцессии растёт, однако значений, характерных для климаксовых, ненарушенных луговых степей Сибири, не достигает даже в 40–50 лет.

Наследуемость видового состава предшествующего сообщества последующим, на отвале, как и в агросукцессии, составляет 30–60%. Отличительная особенность сукцессии на отвалах – ограниченный выбор ценологических стратегий зооэдафона (рудералы, стресс-толеранты, обскуранты) и незначительные отличия их спектров на всех этапах сукцессии. По ходу сукцессии последовательно растёт доля стресс-толерантов, по сравнению с рудералами. На терминальном этапе к стресс-толерантам и рудералам присоединяются обскуранты (30%).

Существенным отличием суррогатных сукцессий на техногенных отвалах в Сибири, с её резко-континентальным климатом, служит торможение регенерации биоэкосистем на терминальном этапе самоорганизации, без надежды достигнуть климаксового состояния в обозримом будущем.

Суммируя позитивные достижения учения о сукцессиях биоэкосистем, можно свести их сущность в 10 постулатов.

1. Сукцессия – это не произвольная формальная смена в местообитании организмов и их совокупностей, а механизм упорядоченной и регламентированной самоорганизации нарушенных биоэкосистем.

2. Сукцессия – явление не только во времени, но и обязательно в пространстве. Время – категория мимолётная, неощутимая органами чувств, воспринимается биотой опосредовано, через цепочки местообитаний (топо-катены), сопряжённые друг с другом в систему прямых и обратных экологических связей вдоль профиля мезорельефа территории. Местообитания катен образуют матрицу абиотических условий, которая служит основой возникновения, дифференциации и специализации сообществ биоты и триггером программы их замещения.

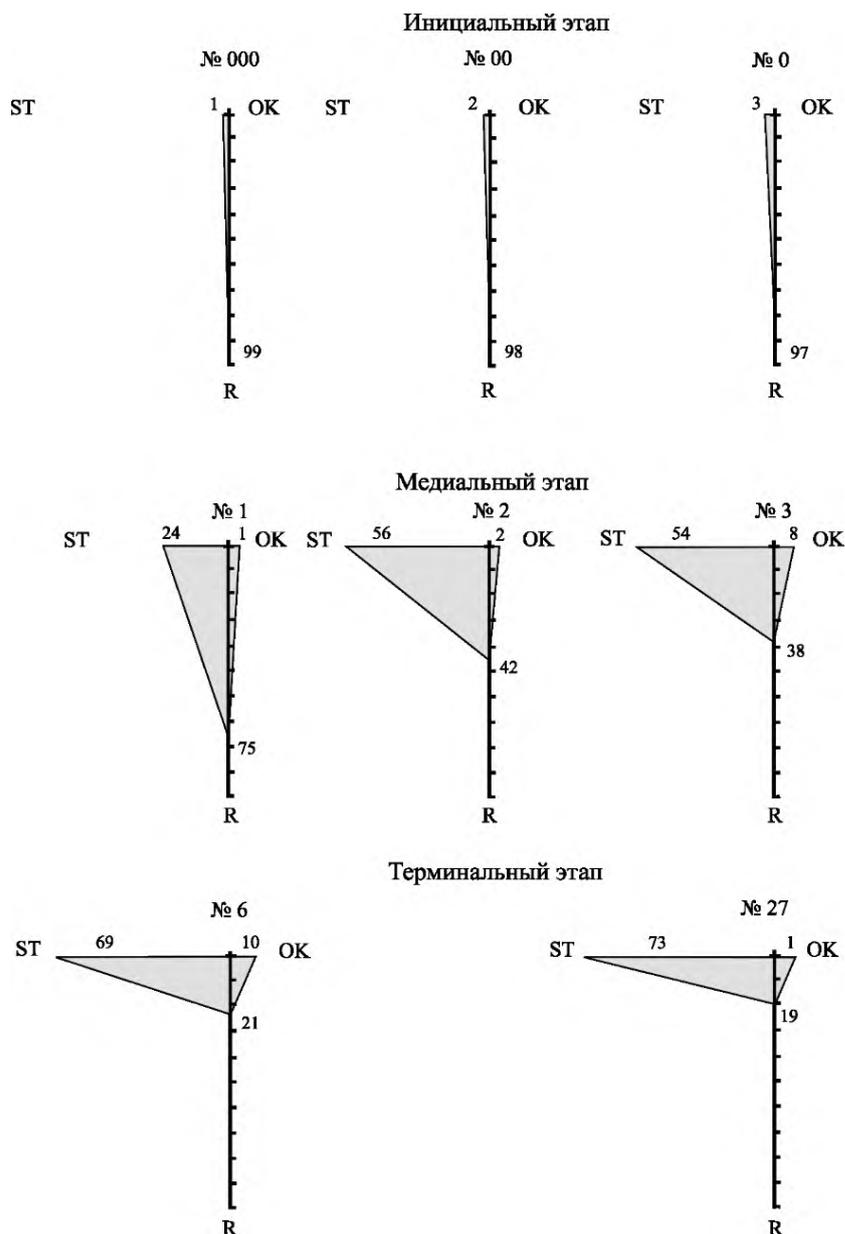


Рисунок 2. Изменение спектра ценотических стратегий в сообществах жуков-жужелиц на разновозрастных этапах сукцессии на внешнем отвале Назаровского углеразреза (Красноярский край, РФ) при самопроизвольной рекультивации. Условные обозначения: Возраст местообитаний: № 000 – 2 дня, № 00 – 0,5 месяца, № 0 – 1 месяц, № 1 – 1 год, № 2 – 2 года, № 3 – 3 года, № 6 – 6 лет, № 27 – 27 лет. Типы ценотической стратегии видов жуков: R – рудералы, ST – стресс-толеранты, ОК – обскуранты-компетиторы (пояснения в тексте). На шкалах указан % доли видов с разной ценотической стратегией.

3. Изменчивость биоэкосистем проявляется, в первую очередь, волнообразными колебаниями демографической структуры сообществ биоты, отношением таксономического разнообразия биоты к обилию особей в местообитании. На инициальном этапе сукцессий отношение этих категорий, как правило, в пользу обилия. На следующем этапе самоорганизации видовое разнообразие растёт в разы, увеличивая устойчивость биоэкосистем.

4. Наследование на экосистемном уровне сводится к переходу значительного контингента видов биоты из биоэкосистемы, предыдущей в сукцессионном ряду, в последующую, обеспечивая преемственность самоорганизации сообщества. Активация сукцессии в конкретном местообитании происходит с использованием ресурсов не только конкретной биоэкосистемы, но и всей катены, благодаря водному стоку, перемещению твёрдых веществ с эрозией и свободным миграциям биоты по катене.

5. Естественный отбор на экосистемном уровне направлен к сохранению или вовлечению в состав сообщества биологических видов с ценотической стратегией, наиболее эффективной на соответствующем этапе регенерации сообщества. Ценотическая стратегия выбирается сообществом из ограниченного стандартного набора переменных и навсегда закреплена за определёнными видами биоты. С привлечением зоокомпонента, к рудералам, стресс-толерантам и конкурентам добавляются: клинёры, интервенты, обскуранты, отшельники и ассенизаторы. Каждая ценотическая стратегия поддерживается комбинацией адаптивных тактик организмов: демографических, топических, трофических, фабрических, форических, этологических. Наиболее надёжны для констатации типа ценотической стратегии видов биоты топические связи. Адресным местообитанием клинёров служат супераквальные местообитания катен, рудералов – аккумулятивные, стресс-толерантов – транзитные, интервентов – элювиальные, обскурантов – плакорные, отшельников – зеро-позиции, ассенизаторов – медальонные включения навоза в любом местообитании. Виды биоты с наиболее подходящей ценотической стратегией доминируют в спектре населения, формируя неповторимый состав, структуру и габитус сообщества.

6. Благодаря гетерохронности местообитаний современной катены, происходит интеграция сукцессий разных эпох и возраста в многоступенчатую конструкцию, представляющую собой синтезграф пространства и времени.

7. На каждом этапе любой сукцессии проявляется не только зависимость биологических видов от среды, но также степень и характер трансформации ими субстрата обитания, а именно: насыщение среды биомассой, перфорацию, перемешивание, структурирование исходного субстрата, вплоть до образования биокосного композитного продукта – детрита, ила, гумуса.

8. По ходу сукцессии открытый биотический круговорот стремится, по мере возможности, к замыканию. Экосистемы инициальных этапов сукцессии отмечены большим количеством продукции, а на терминальном этапе – её высоким качеством и регуляцией по типу обратной связи.

9. В литературе нередко встречаются попытки идентифицировать процессы сукцессии и эволюции, которые альтернативны по смыслу, генезису и предназначению. Эволюция – это процесс, направленный на появление и закрепление в биосфере форм и функций, прежде неизвестных. Сукцессия регенерирует нарушенную биоэкосистему в регламентированном порядке замещения структурных блоков. Эволюция – процесс беспредельной изменчивости биоты. Сукцессия оперирует тщательно отобранным контингентом коадаптивных композиций биоты с заранее известными функциональными ролями и программой замещения. Эволюция – процесс неповторимый дважды; сукцессия воспроизводится неоднократно и стереотипно. Эволюция ведёт к прогрессу биоразнообразия, с непредсказуемыми последствиями для биосферы. Сукцессия предназначена для сохранения накопленного позитивного экологического опыта и восстановления нарушенных биоэкосистем, соответственно стандартам соответствующего геобиома.

10. Сукцессии биоэкосистем – один из немногих эффективных механизмов, способных уберечь биосферу от весьма вероятного превращения в развалины.

ЛИТЕРАТУРА

Беклемишев В.Н. О классификации биоценологических (симфизиологических) связей // Биоценологические основы сравнительной паразитологии. Москва: Наука, 1970. С. 90–138.

Бурковский И.В. Морская биогеоценология. Организация сообществ и экосистем. Москва: Т-во науч. изд. КМК, 2006. 285 с.

Васильев О.Ф., Казанцев В.А., Попов П.А., Кириллов В.В. Общая природная характеристика и экологические проблемы Чановской и Кулундинской озерных систем и их бассейнов // *Сибирский экологический журнал*. 2005. № 2. С. 167–173.

Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методы исследования природных ландшафтов. Москва: Изд-во МГУ, 1964. 229 с.

Маргалев Р. Облик биосферы. Москва: Наука, 1992. 212 с.

Миркин Б.Н., Наумова Л.Г. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: Изд. Гилем, 2012. 488 с.

Михайловский Г.Е. Специфика экологических систем и проблемы их изучения // *Журнал общей биологии*. 1984. Т. 45. №. 1. С. 66–78.

Мордкович В.Г. Сопряженность экологических сукцессий с катенной организацией пространства // *Журнал общей биологии*. 2017. Т. 78. № 2. С. 32–46.

- Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Зоологические аспекты экологической сукцессии на спланированном отвале Назаровского углераза КАТЭКа в Красноярском крае // *Сибирский экологический журнал*. 2019. Т. 26. № 4. С. 428–444.
- Пономаренко А.Г. Ранние этапы эволюции почвенных экосистем // *Журнал общей биологии*. 2013. Т. 74. № 6. С. 420–433.
- Пригожин И.Б. От существующего к возникающему. Москва: Наука, 1985. 327 с.
- Пригожин И.Б., Стенгерс И. Порядок из хаоса // *Новый диалог человека с природой*. Москва: Эдиториал УРСС, 2000. 310 с.
- Разумовский С.М. Закономерности динамики фитоценозов. Москва: Наука, 1981. 479 с.
- Раменский Л.Г. О принципиальных установках, основных понятиях и терминах производственной типологии земель, геоботаники и экологии // *Советская ботаника*. 1935. № 4. С. 25–42.
- Титлянова А.А., Самбуу А.Д. Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 308 с.
- Философский энциклопедический словарь. Москва: Изд-во «Советская энциклопедия», 1983. 840 с.
- Хански И. Ускользящий мир. Экологические последствия утраты местообитаний. Москва: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. 344 с.
- Auclerc A., Le Moine J.M., Hatton P.J., Bird J.A., Nadelhoffer K.J. Decadal post-fire succession of soil invertebrate communities is dependent on the soil surface properties in a northern temperate forest // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 657. P. 1058-1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.041>.
- Clements F.E. Plant Succession: Analysis of the Development of Vegetation. Washington: Carnegie Institution of Washington Publication Sciences, 1916. 512 p. DOI: 10.5962/bhl.title.56234.
- De Deyn G.B., Raaijmakers C.E., Zoomer H.R., Berg M.P., de Ruyter P.C., Verhoef H.A., Bezemer T.M., van der Putten W.H. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity // *Nature*. 2003. Vol. 422. No. 6933. P. 711-713. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01548>.
- Grime J.P. Plant Strategies and Vegetation Process. Chichester. N.Y. Brisbane. Toronto: John Wiley and Sons, 1979. 222 p.
- Hotchkiss S., Vitousek P.M., Chadwick O.A., Price J. Climate cycles, geomorphological change and the interpretation of soil ecosystem development // *Ecosystems*. 2000. Vol. 3. P. 522–533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100210000046>.
- Johnson E.A., Miyaniishi K. Testing the assumptions of chronosequences in succession // *Ecology Letters*. 2008. Vol. 11. No. 5. P. 419–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01173.x>.
- McIntosh R.P. The Background of Ecology. Concept and Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 383 p.
- Seer F.K., Putze G., Pennings S.C., Zimmer M. Drivers of litter mass loss and faunal composition of detritus patches change over time // *Ecology and Evolution*. 2021. Vol. 11. No. 14. P. 9642–9651. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.7787>.
- Van der Putten W.H., Macel M., Visser M.E. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2010. Vol. 365. No. 1549. P. 2025–2034. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0037>.
- Wanner M., Dunger W. Primary immigration and succession of soil organisms on reclaimed opencast coal mining areas in eastern Germany // *European Journal of Soil Biology*. 2002. Vol. 38. No. 2. P. 137–143. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(02\)01135-4](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01135-4).

Поступила в редакцию 29.09.2023

Принята 13.10.2023

Опубликована 29.10.2023

Сведения об авторе:

Мордкович Вячеслав Генрихович – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН (г. Новосибирск, Россия); mordkovichvg@rambler.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

**BIOECOSYSTEM SUCCESSION AS A CHRONO-CHOROLOGICAL PHENOMENON**

© 2023 V. G. Mordkovich

Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Frunze st., 11, Novosibirsk, Russia. E-mail: mordkovichvg@rambler.ru

The article discusses some aspects of succession theory that have been unfairly left in the shadow of the “monumental foundations” laid by the classics of phytocoenology. Recently microbiologists, zoologists and soil scientists display increased interest in successions, resulting in changes and amendments of some original concepts. Taking soil invertebrates as an example, the author shows that, rather than being spontaneous changes of biota in time, successions are regulated mechanisms of regeneration and ordering of disturbed bioecosystems in accordance with the standards of respective geobiomes.

Successions are not solely chronological, but chrono-chorological mechanisms of bioecosystems’ self-organization, governed by both biotic and abiotic factors. Among the latter topo-catenas of habitats, located as a chain along the mesorelief profile, are of crucial importance. Such catenas play the key role in the content and identification of cenotic strategies and adaptive tactics of biota, as well as in consolidating heterochronic communities of different catenary positions into intercalary meta-successions. Succession and evolution, despite repeated attempts to analogize these processes, are semantically incompatible. The aim of the evolution is to increase biodiversity by adding novel elements, which leads to unpredictable results. Successions aim at preserving the accumulated positive ecological experience, resisting the evolutionary novelties.

Key words: *succession; zoedaphone; catena; chrono-chorology.*

How to cite: *Mordkovich V.G. Bioecosystem succession as a chrono-chorological phenomenon // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(3). e216. DOI: [10.31251/pos.v6i3.216](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.216) (in Russian with an English abstract).*

REFERENCES

- Beklemishev V.N. On the classification of biocenological (symphysiological) relationships. Biocenological bases of comparative parasitology. Moscow: Nauka Publ., 1970. P. 90–138. (in Russian).
- Burkovsky I.V. Marine biogeocenology. Organization of communities and ecosystems. Moscow: KMK Scientific Publishing House, 2006. 285 p. (in Russian).
- Vasilyev O.F., Kazantsev V.A., Popov P.A., Kirillov V.V. General Natural Characteristics and Ecological Problems of the Chany–Kulunda Lacustrine System and Basin of These Lakes. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2005. No. 2. P. 167–173. (in Russian).
- Glazovskaya M.A. Geochemical bases of typology and methods of research of natural landscapes. Moscow: Publ of MSU, 1964. 229 p. (in Russian).
- Margalef R. Oblik Biosphere. Moscow: Nauka Publ., 1992. 212 p. (in Russian).
- Mirkin B.N., Naumova L.G. Modern state of the main concepts of vegetation science. Ufa: Gilem Publ. House, 2012. 488 p. (in Russian).
- Mikhailovsky G.E. Specificity of ecological systems and problem of their studying. *Journal of General Biology*. 1984. Vol. 45. No. 1. P. 66–78. (in Russian).
- Mordkovich V.G. Interconnectedness between ecological successions and catenary arrangement of space. *Journal of General Biology*. 2017. Vol. 78. No. 2. P. 32–46. (in Russian).
- Mordkovich V.G., Lyubechanskii I.I. Zoological aspects of the ecological succession on the plain dump of the Nazarovo lignite open-cast mine in Krasnoyarsk Krai. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2019. Vol. 26. No. 4. P. 428–444. (in Russian).
- Ponomarenko A.G. Earlier steps of the soil ecosystems evolution. *Journal of General Biology*. 2013. Vol. 74. No. 6. P. 420–433. (in Russian).
- Prigozhin I.B. From existing to emerging. Moscow: Nauka Publ., 1985. 327 p. (in Russian).
- Prigozhin I.B., Stengers I. Order out of Chaos. In book: *New Dialogue of Man with Nature*. Moscow: Editorial URSS, 2000. 310 p. (in Russian).

- Razumovsky S.M. Laws of phytocenoses dynamics. Moscow: Nauka Publ., 1981. 479 p. (in Russian).
- Ramenskiy L.G. On the fundamental attitudes, basic concepts and terms of production typology of land, geobotany and ecology. Soviet Botany. 1935. No. 4. P. 25–42. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Sambuu A.D. Succession in grasslands. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2016. 308 p. (in Russian).
- Philosophical Encyclopedic Dictionary. Moscow: Publ. House "Soviet Encyclopedia", 1983. 840 p. (in Russian).
- Hanski I. The Slipping World. Ecological consequences of habitat loss. Moscow: KMK Scientific Publishing House, 2010. 344 p. (in Russian).
- Auclerc A., Le Moine J.M., Hatton P.J., Bird J.A., Nadelhoffer K.J. Decadal post-fire succession of soil invertebrate communities is dependent on the soil surface properties in a northern temperate forest. Science of The Total Environment. 2019. Vol. 657. P. 1058-1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.041>.
- Clements F.E. Plant Succession: Analysis of the Development of Vegetation. Washington: Carnegie Institution of Washington Publication Sciences, 1916. 512 p. DOI: 10.5962/bhl.title.56234.
- De Deyn G.B., Raaijmakers C.E., Zoomer H.R., Berg M.P., de Ruiter P.C., Verhoef H.A., Bezemer T.M., van der Putten W.H. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity. Nature. 2003. Vol. 422. No. 6933. P. 711-713. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01548>.
- Grime J.P. Plant Strategies and Vegetation Process. Chichester. N.Y. Brisbane. Toronto: John Wiley and Sons, 1979. 222 p.
- Hotchkiss S., Vitousek P.M., Chadwick O.A., Price J. Climate cycles, geomorphological change and the interpretation of soil ecosystem development. Ecosystems. 2000. Vol. 3. P. 522–533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100210000046>.
- Johnson E.A., Miyanishi K. Testing the assumptions of chronosequences in succession. Ecology Letters. 2008. Vol. 11. No. 5. P. 419–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01173.x>.
- McIntosh R.P. The Background of Ecology. Concept and Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 383 p.
- Seer F.K., Putze G., Pennings S.C., Zimmer M. Drivers of litter mass loss and faunal composition of detritus patches change over time. Ecology and Evolution. 2021. Vol. 11. No. 14. P. 9642–9651. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.7787>.
- Van der Putten W.H., Macel M., Visser M.E. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. Philosophical Transactions of the Royal Society B. 2010. Vol. 365. No. 1549. P. 2025–2034. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0037>.
- Wanner M., Dunger W. Primary immigration and succession of soil organisms on reclaimed opencast coal mining areas in eastern Germany. European Journal of Soil Biology. 2002. Vol. 38. No. 2. P. 137–143. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(02\)01135-4](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01135-4).

Received 29 September 2023

Accepted 13 October 2023

Published 29 October 2023

About the author:

Mordkovich Vyacheslav Genrikhovich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Invertebrate Ecology, Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mordkovichvg@rambler.ru

The author 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 СВЕТЛАНЫ ВАСИЛЬЕВНЫ ШИБАРЕВОЙ (21.05.1953 – 25.05.2023)© 2023 А. А. Титлянова , З. В. Варакина *ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: argenta@issa-siberia.ru*

В статье приведены сведения о научно-исследовательской деятельности кандидата биологических наук, научного сотрудника лаборатории биогеоценологии Института почвоведения и агрохимии СО РАН Светланы Васильевны Шибаревой. Освещены направления исследований круговорота углерода, азота и других элементов в агроценозах и на отвалах угольной промышленности; процессов разложения торфа в болотах Западной Сибири и Польши, а также запасов, фракционного и химического состава подстилок в лесных и травяных экосистемах Сибири.

Ключевые слова: С.В. Шибарева; подстилки; состав; круговорот элементов; лесные и травяные экосистемы; торф; болота.

Цитирование: Титлянова А.А., Варакина З.В. Памяти Светланы Васильевны Шибаревой (21.05.1953 – 25.05.2023) // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e222. DOI: [10.31251/pos.v6i3.222](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.222).



25 мая 2023 г. после тяжёлой болезни ушла из жизни Светлана Васильевна Шибарева, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биогеоценологии Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН.

Светлана Васильевна родилась 21 мая 1953 г. в г. Новосибирск. Окончив 9 классов школы, в 1968 г. она поступила в Новосибирский химико-технологический техникум им. Д.И. Менделеева, полный курс которого по специальности «Аналитическая химия» окончила в 1972 году с присвоением квалификации техника-химика. Ещё учась в техникуме Светлана Васильевна была принята на временную работу лаборантом в лабораторию биогеоценологии ИПА СО АН СССР; после окончания техникума была зачислена на должность старшего лаборанта в постоянный штат этой лаборатории.

Летом 1972 г. Светлана Васильевна выезжает в экспедицию и работает на стационаре «Карачи» (Титлянова, Шибарева, 2018). Там она знакомится с полевой работой: отбором и разбором проб, их отмывкой в холодной воде на реке. Было ветрено и холодно, пасмурно и дождливо, но Светлана ни разу не пожаловалась на сложности, и очень быстро вошла в коллектив стационара.

Со стационара было привезено много проб, которые необходимо было разбирать, взвешивать и озолить – этим и стала заниматься Светлана Васильевна, возвратившись из экспедиции. Одновременно она приняла на себя обязанность материально ответственного лица, что занимало много времени в связи с приобретением экспедиционного и др. оборудования.

В середине 70-х гг. XX столетия руководство ИПА СО АН СССР наметило для лаборатории биогеоценологии (БГЦ) новое направление: изучение круговорота углерода, азота и других

элементов питания в агроценозах. Местом работы был выбран Северный Казахстан, исследования проводились на опытном стационаре Всесоюзного научно-исследовательского института зернового хозяйства в посёлке Шортанды. Для разработки методов оценки круговорота углерода, азота и других элементов питания в агроценозе небольшая группа сотрудников БГЦ, в которую входила и С.В. Шибарева, в 1976 г. на полях института провела полный полевой сезон (от посева пшеницы первого года после пара до поздней осени). Светлана Васильевна принимала в этой работе самое деятельное участие: она отмечала число побегов пшеницы, высоту растений, ярусность, начало различных фаз развития, давала оценку состоянию побегов, засоренности поля пшеницы сорняками и т. п.

Поскольку в 1974 г. Светлана Васильевна поступила в Новосибирский сельскохозяйственный институт, то наблюдения и измерения на полях Института зернового хозяйства легли в основу её курсовой работы. В 1977–80 гг. лаборатория БГЦ проводила исследования на полях севооборота пшеницы: пар, три года пшеницы, часть из которых составила основу её дипломной работы «Плодородие почвы и урожайность яровой пшеницы в связи с применением почвозащитной технологии на примере ОПХ «ВНИИЗХ». В 1981 г. С.В. Шибарева закончила сельскохозяйственный институт по специальности «Агрономия», с присвоением квалификации «Учёный агроном». На основании работ, проведённых на полях ВНИИЗХа, она в соавторстве с А.А. Титляновой и Р.А. Фроловой публикует свою первую статью «Запасы растительного вещества» (Титлянова и др., 1984).

В 1984 г. лаборатория БГЦ начала новый цикл работ на отвалах угольной промышленности в Красноярском крае (г. Назарово). Отряд с удобством разместился в деревне Владимировка, где участникам экспедиции дали два дома. Светлана Васильевна принимала активное участие в полевых работах. Будучи начальником отряда лаборатории БГЦ, кроме полевой работы, она выполняла множество функций, связанных с обустройством стационара на новом месте. Казалось, что всё было хорошо налажено, однако через два года руководство деревни предложило участникам экспедиции покинуть эти дома. Работы были в разгаре, а, вот, где жить — неизвестно. С.В. Шибарева вместе с заведующей лабораторией А.А. Титляновой, после долгого хождения по Владимировке, стали присматриваться к старой заброшенной школе. Там были выбиты окна, сняты двери, разбиты полы, время от времени заходили свиньи и коровы. Казалось, что привести такое здание в порядок и превратить в жилое помещение невозможно. Однако Светлана Васильевна решилась на этот героический поступок. Сколько трудов, нервов, времени ей это стоило... Но она это сделала! В обновлённом здании зазвучали голоса, пошла работа, и всё стало как обычно на рабочем стационаре.

Работа на стационарах была закончена в начале 90-х XX столетия. Лаборатория БГЦ приступила к обработке материалов, полученных за годы работ на стационарах, написанию статей, книг, и поиску нового направления.

В 1990–1993 гг. С.В. Шибарева находилась в отпуске в связи с рождением дочери. В 1993 г. она вернулась к работе в лаборатории БГЦ, была назначена на должность младшего научного сотрудника и занялась обработкой ранее полученных данных. Эти результаты были обобщены и опубликованы в соавторстве с А.А. Титляновой, Н.П. Косых и Т.Н. Рябовой (Титлянова и др., 1996). В последующие годы она активно участвовала в публикациях коллектива лаборатории БГЦ (Титлянова и др., 2002а, б; 2004; 2005; Биеньковский и др., 2003; Базилевич и др., 2004; Кудряшова и др., 2011; и др.). Заслуживает отдельного упоминания статья «Базы данных "органический углерод" и "запасы растительного вещества в экосистемах Сибири" как средство оценки углеродного баланса, его моделирования и прогнозирования на геоинформационной основе», отражающая многолетнюю работу лаборатории в этом направлении (Титлянова и др., 2007).

За время работы в поле и лаборатории родилась идея диссертации «Запасы и элементный состав подстилок в лесных и травяных экосистемах Сибири», которую Светлана Васильевна защитила в 2004 г. (Шибарева, 2004); решением диссертационного совета ИПА СО РАН ей была присуждена учёная степень кандидата биологических наук.

С 2005 г. Светлана Васильевна начала работать в должности научного сотрудника. С этого года началась также длительная совместная работа сотрудников ИПА СО РАН (лаборатория БГЦ) и Института экологии Польской академии наук (аналитическая лаборатория). Результаты первых работ были опубликованы в статье «Chemical properties of litter of forest and grassland ecosystems: transect studies in Siberia (Russia)» в журнале «Polish Journal of Ecology» (Bieńkowski et al., 2006),

одним из авторов которой была С.В. Шибарева. В дальнейшем работы в Польше были сосредоточены на болотах и продолжались более пяти лет. В исследованиях принимали участие польские учёные. По результатам проделанной работы было опубликовано ещё несколько статей (Биеньковски и др., 2008; Миронычева-Токарева и др., 2009; Коронатова, Шибарева, 2010; Титлянова и др., 2011, 2014; и др.). Одновременно с исследованиями в Польше Светлана Васильевна занималась подготовкой монографии «Подстилки в лесных и травяных экосистемах» (Титлянова, Шибарева, 2012). В книге обсуждаются как результаты работ, на основании которых была защищена кандидатская диссертация Шибаревой С.В. (2004), так и исследования, проведённые совместно с польскими коллегами на болотах в Польше. В книгу, в том числе, вошли полученные во время работы в Польше результаты исследований Светланы Васильевны, проводимых под руководством А.А. Титляновой: прирост болотных растений, их отмирание, первая стадия образования торфа, определение запасов и состава подстилок в лесных и травяных экосистемах. Для определения запасов и состава подстилок было разобрано 37 подстилок на 17 фракций (включая подстилки из лесотундры, северной и южной тайги, лесостепи). Подстилки были охарактеризованы по массе и по составу. Полный химический анализ подстилок проводился в ИПА СО РАН. Оценка зольности подстилок, а также определение содержания в них калия, кальция и магния были сделаны Светланой Васильевной. Как показали исследования (Титлянова, Шибарева, 2012), работа с подстилками требует много времени, поскольку запасы подстилок в лесах даже на небольшом расстоянии (от кроны одного дерева к кроне другого дерева) могут отличаться в 2–3 раза, что требует отбора большого количества проб. Кроме того, состав подстилок чрезвычайно сложен, она состоит из многих отличающихся фракций, и поэтому разбор проб на отдельные фракции очень трудоёмок.

Результаты исследований, опубликованные в книге «Подстилки в лесных и травяных экосистемах» (Титлянова, Шибарева, 2012), и их анализ позволили сделать несколько важных экологических выводов, приведём лишь некоторые из них:

✓ Подстилка выполняет важнейшие функции в экосистеме. В лесах она служит главным источником элементов питания для растений. В лесах запасы подстилок варьируют очень широко. В лесотундре и северной тайге они составляют от 25 до 80 т/га, в южной тайге – от 40 до 60, в лиственных лесах лесостепи – от 16 до 20, в травяных экосистемах – от 2 до 6 т/га.

✓ В некоторых лесах южной тайги и лесостепи Европы обменный фонд элементов в подстилке невелик, и процессы круговорота совершаются очень быстро; чем дальше на север, тем меньше ежегодное потребление элементов питания фитомассой, тем больше запас элементов в подстилке и медленнее круговорот.

✓ Травяные подстилки, как и лесные, играют определённую роль в питании растений химическими элементами и в гумусообразовании. Однако в лугах и степях основной вклад в эти процессы вносит подземная мортмасса (отмершие корни и корневища растений), которая превышает надземную мортмассу приблизительно в 10 раз. В травяных экосистемах (особенно в степях) роль подстилки проявляется в затенении почвы и сохранении влаги под подстилкой. Кроме того, её наличие предотвращает почвенную эрозию, которая быстро развивается на выбитых легких почвах.

✓ Сравнение запасов химических элементов в фитомассе древостоев и в подстилке показывает, что в ельниках и лиственничниках тундры и северной тайги главным хранилищем азота является подстилка. В среднем в ней аккумулировано в 1,8 раза больше азота, чем в древостоях. Накопление фосфора в подстилке и древостое почти одинаково. Резко отличается от азота распределение калия: его запас в фитомассе значительно выше, чем в подстилке, из которой он легко выщелачивается.

✓ В южной тайге, где процессы минерализации протекают значительно быстрее, в связи с чем запас подстилки здесь ниже, химические элементы (N, K, Ca) аккумулируются в основном в фитомассе. Оба процесса – длительное удержание элементов в подстилке лесотундры и северной тайги и быстрое освобождение тех же элементов из подстилки южной тайги – являются звеньями биологического круговорота, происходящего в экосистемах.

Как автореферат диссертации Светланы Васильевны (Шибарева, 2004), так и книга о подстилках в лесных и травяных экосистемах (Титлянова, Шибарева, 2012) вызвали большой интерес у экологов, лесоведов, почвоведов, что было отмечено в различных отзывах учёных. В разработке темы «Продуктивность травяных экосистем» С.В. Шибарева продолжала участвовать

все последующие годы (Шибарева, Миронычева-Токарева, 2015; Титлянова, Шибарева, 2017; Миронычева-Токарева и др., 2017; Титлянова и др., 2020; Титлянова, Шибарева, 2021, 2022).

Светлана Васильевна проработала в науке более 50-ти лет. Ей опубликовано лично и в соавторстве около 60-ти статей и книг. Особенно важна одна из последних работ, созданная вместе с Аргентой Антониновной Титляновой – справочник «Продуктивность травяных экосистем» (2020), изданный как в печатном, так и в электронном вариантах.

Труд Светланы Васильевны неоднократно был отмечен благодарностями за многолетнюю и добросовестную работу. В 1996 г., учитывая личные заслуги в научной, производственной и общественной работе, С.В. Шибаревой было присвоено почётное звание «Заслуженный ветеран Сибирского отделения РАН» с вручением нагрудного знака.

В августе 2004 г. Светлане Васильевне вручили памятную медаль, посвященную 100-летию выхода книги В.В. Докучаева «Русский чернозём», за активную плодотворную работу по подготовке и проведению IV съезда Общества почвоведов.

За многолетний творческий труд, большой вклад в развитие науки и в связи с 50-летием Сибирского отделения РАН, в 2007 г. Светлану Васильевну наградили почётным знаком – «Серебряная сигма».

В 2018 г. в связи с 50-летием со дня основания ИПА СО РАН Светлану Васильевну наградили почетной грамотой за многолетний добросовестный труд, большой вклад в развитие почвенной и агрохимической науки, успешное содействие проведению фундаментальных и прикладных научных исследований.

Вся научная жизнь Светланы Васильевны была связана с Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН, активным, деятельным и любящим свою работу сотрудником и душой коллектива которого она была все эти долгие годы, и, несомненно, память о ней будет долго жить в сердцах её коллег, друзей и единомышленников в науке.

ЛИТЕРАТУРА

Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Косых Н.П., Шибарева С.В. Запасы азота и зольных элементов в наземных экосистемах Америки, Африки, Австралии и Океании // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2004. № 6. С. 17–30.

Биеньковски П., Титлянова А.А., Дитвалд Э., Шибарева С. Изменение элементного состава фитомассы сфагновых мхов в процессе торфообразования // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2008. № 4 (78). С. 30–34.

Биеньковски П., Титлянова А.А., Шибарева С.В. Трансформационные процессы в подстилках бореальных лесов // Сибирский экологический журнал. 2003. Т. 10. № 6. С. 707–712.

Коронатова Н.Г., Шибарева С.В. Изменение массы торфа в процессе его разложения на болотах Польши и Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 17. № 3. С. 445–451.

Кудряшова С.Я., Байков К.С., Титлянова А.А., Дитц Л.Ю., Косых Н.П., Махатков И.Д., Шибарева С.В. Распределение ГИС для оценки запасов углерода в почвах бореальной зоны Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 5. С. 641–655.

Миронычева-Токарева Н.П., Шибарева С.В., Громадка П. Запасы фитомассы и депонированных в ней элементов питания в травяном болоте Польши // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 261–267.

Миронычева-Токарева Н.П., Шибарева С.В., Коронатова Н.Г., Михайлова Е.В. Влияние пастбищной нагрузки на динамику макроэлементов в системе "почва – растение" // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4. № 2. С. 197–201.

Продуктивность травяных экосистем: справочник / составители А.А. Титлянова, С.В. Шибарева; Почвенный институт имени В.В. Докучаева; Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. Москва: ООО «Издательство МБА», 2020. 100 с.

Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шибарева С.В. Запасы азота и зольных элементов в наземных экосистемах Евразии // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2002а. № 1. С. 28–35.

Титлянова А.А., Биеньковски П., Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Миронычева-Токарева Н.П., Шибарева С.В., Дитвалд Э., Громадка П. Элементный состав фитомассы, процессы ее образования и разложения в некоторых лесных и болотных экосистемах // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Сборник Материалов Четвёртого Международного полевого симпозиума. Под редакцией А.А. Титляновой, М.И. Дергачёвой, 2014. С. 226–230.

Титлянова А.А., Косых Н.П., Курбатская С.С., Кыргыз Ч.С.О., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П., Самбуу А.Д., Шибарева С.В. Продуктивность травяных экосистем Тувы // Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3. № 2. С. 2. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.110>.

Титлянова А.А., Косых Н.П., Рябова Т.Н., Шибарева С.В. Первичная продукция и поступление органического вещества в почвы лесостепной и степной зон Сибири // Информационный бюллетень Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). 1996. № 4. Отчёт о НИР № 96-04-50125.

Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П., Шибарева С.В. Воспроизводство фитобиоты и почвенного органического вещества // Природные ресурсы антропосферы: воспроизводство, стоимость, рента. Москва: Янус-К, 2002б. С. 110–137.

Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П., Шибарева С.В. Биологический круговорот углерода и его изменение под влиянием деятельности человека на территории Южной Сибири // Почвоведение. 2005. № 10. С. 1240–1250.

Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П., Шибарева С.В. Базы данных "органический углерод" и "запасы растительного вещества в экосистемах Сибири" как средство оценки углеродного баланса, его моделирования и прогнозирования на геоинформационной основе // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № S2. С. 131–139.

Титлянова А.А., Фролова Р.А., Шибарева С.В. Запасы растительного вещества // Агроценозы степной зоны / В.Б. Ильин (отв. ред.). Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1984. С. 109–116.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Подстилки в лесных и травяных экосистемах. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012. 137 с.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Новые оценки запасов фитомассы и чистая первичная продукция степных экосистем Сибири и Казахстана // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 4. С. 43–55. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0373244417040041>.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Роль стационара Института почвоведения и агрохимии СО АН СССР "Карачи" в работах по Международной Биологической Программе (1968–1974) // Почвы и окружающая среда. 2018. Т. 1. № 3. С. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.19>.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Природное богатство Тувы – степи // Роль Российско-Монгольской программы «Эксперимент Убсу-Нур» в развитии науки и инноваций в Республике Тыва. Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию Убсунурского международного центра биосферных исследований и 100-летию Тувинской Народной Республики. Правительство Республики Тыва, Министерство образования и науки Республики Тыва, Министерство природных ресурсов и экологии, Республики Тыва, Тувинский научный центр, Государственный природный биосферный заповедник, «Убсунурская котловина» (Кызыл, 26–29 апреля 2021 г.). Кызыл: Издательство ООО Профпринт, 2021. С. 253–264.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Изменение чистой первичной продукции и восстановление запасов углерода в почвах залежей // Почвоведение. 2022. № 4. С. 500–510. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X2204013X>.

Титлянова А.А., Шибарева С.В., Биеньковски П. Процессы разложения торфа в переходном болоте центральной Польши // Почвоведение. 2011. № 2. С. 165–172.

Титлянова А.А., Шибарева С.В., Самбуу А.Д. Травяные и лесные подстилки в горной лесостепи Тувы // Сибирский экологический журнал. 2004. Т. 11. № 3. С. 425–432.

Шибарева С.В. Запасы и элементный состав подстилок в лесных и травяных экосистемах Сибири. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2004. 22 с.

Шибарева С.В., Миронычева-Токарева Н.П. Динамика растительности и растительного вещества степных экосистем юга Челябинской области // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10 (185). С. 94–96.

Bieńkowski P., Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Chemical properties of litter of forest and grassland ecosystems: transect studies in Siberia (Russia) // *Polish Journal of Ecology*. 2006. Т. 54. № 1. С. 91–104.

Поступила в редакцию 18.10.2023

Принята 23.11.2023

Опубликована 28.11.2023

Сведения об авторах:

Титлянова Аргента Антониновна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); argenta@issa-siberia.ru

Варакина Зоя Вадимовна – техник-лаборант лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); evzova@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/)

IN MEMORIAM OF SVETLANA VASILIEVNA SHIBAREVA (21.05.1953 – 25.05.2023)

© 2023 **A. A. Titlyanova** , **Z. V. Varakina** 

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

The article provides information about the research activities of Svetlana Vasilievna Shibareva, candidate of biological sciences, the researcher at the laboratory of biogeocenology at the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the SB RAS, briefly describing the main areas of her research such as carbon cycle, nitrogen and other elements in agrocenoses and on coal mining spoils, peat reserves and decomposition in the mires of West Siberia and Poland, as well as fractional and chemical composition of litter in the forest and grassland ecosystems of Siberia.

Key words: *S.V. Shibareva; litter; composition; cycle of elements; forest and grassland ecosystems; peat; mires.*

How to cite: *Titlyanova A.A., Varakina Z.V. In memoriam of Svetlana Vasilievna Shibareva (21.05.1953 – 25.05.2023) // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(3). e222. DOI: [10.31251/pos.v6i3.222](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.222). (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Shibareva S.V. Storage of nitrogen and ash elements in terrestrial ecosystems of America, Africa, Australia and Oceania. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2004. No. 6. P. 17–30. (in Russian).

Bieńkowski P., Titlyanova A.A., Dittwald E., Shibareva S. Changes in the elemental composition of sphagnum moss phytomass in the process of peat formation. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2008. No. 4 (78). P. 30–34. (in Russian).

Bienkovski P., Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Transformation processes in the litter of boreal forests. *Siberian Ecological Journal*. 2003. T. 10. No. 6. P. 707–712. (in Russian).

Koronatova N.G., Shibareva S.V. Change of peat mass during decomposition in mires of Poland and West Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 312–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425510030094>.

Kudryashova S.Ya., Baykov K.S., Titlyanova A.A., Ditz L.Yu., Kosykh N.P., Makhatkov I.D., Shibareva S.V. GIS Distribution for assessing carbon reserves in soils of the boreal zone of Western Siberia. *Siberian Ecological Journal*. 2011. Vol. 18. No. 5. P. 641–655. (in Russian).

Mironycheva-Tokareva N.P., Shibareva S.V., Gromadka P. A grass mire in Poland: reserves of phytomass and deposited nutrition elements. *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425509020076>.

Mironycheva-Tokareva N.P., Shibareva S.V., Koronatova N.G., Mikhailova E.V. The influence of pasture load on the dynamics of macroelements in the soil-plant system. *Interexpo Geo-Siberia*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 197–201. (in Russian).

Productivity of grass ecosystems: a reference book / compiled by A.A. Titlyanova, S.V. Shibareva. Moscow: MBA Publishing House, 2020. 100 p. (in Russian).

Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shibareva S.V. Storage of nitrogen and ash elements in Eurasia terrestrial ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2002a. No. 1. P. 28–35. (in Russian).

Titlyanova A.A., Bienkowski P., Kosykh N.P., Koronatova N.G., Mironycheva-Tokareva N.P., Shibareva S.V., Tikhomirova N.A., Ditwald E., Gromadka P. Elemental composition of phytomass, processes of its formation and decomposition in some forest and mire ecosystems. In book: West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Proceedings of the Fourth International Field Symposium. Edited by A.A. Titlyanova and M.I. Dergacheva, 2014. P. 226–230. (in Russian).

Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Kurbatskaya S.S., Kyrgys Ch.S., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P., ambuu A.D., Shibareva S.V. Productivity of grassland ecosystems in the Tyva Republic, Russia. The Journal of Soils and Environment. 2020. Vol. 3. No. 2. P. e110. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.110>. (in Russian).

Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Ryabova T.N., Shibareva S.V. Primary production and input of organic matter into soil in Siberian forest-steppe and steppe zones. Information Bulletin of the Russian Foundation for Fundamental Research (RFFR). 1996. No. 4. Report No. 96-04-50125. (in Russian).

Titlyanova A.A., Kudryashova S.Ya., Kosykh N.P., Shibareva S.V. Reproduction of phytobiota and soil organic matter. In the book: Natural resources of the anthroposphere: reproduction, cost, rent. Moscow: Janus-K, 20026. P. 110–137. (in Russian).

Titlyanova A.A., Kudryashova S.Ya., Kosykh N.P., Shibareva S.V. Biological carbon cycle and its human-induced changes in Southern Siberia. Eurasian Soil Science. 2005. Vol. 38. No. 10. P. 1098–1107.

Titlyanova A.A., Kudryashova S.Ya., Kosykh N.P., Shibareva S.V. Databases “organic carbon” and “reserves of plant matter in Siberian ecosystems” as a means of assessing the carbon balance, its modeling and forecasting on a geoinformation basis. Computational technologies. 2007. Vol. 12. No. S2. P. 131–139. (in Russian).

Titlyanova A.A., Frolova R.A., Shibareva S.V. Plant matter reserves. In book: Agroecosystems of the steppe zone / V.B. Ilyin (ed.). Novosibirsk: Novosibirsk branch of the publishing house "Nauka", 1984. C. 109–116. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Litter in forest and grass ecosystems. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2012. 137 p. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Phytomass stock and net primary production in the steppe ecosystems of Siberia and Kazakhstan. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2017. No. 4. P. 43–55. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0373244417040041>. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. The role of Karachi experimental station of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the USSR SB as in the International Biological Program Research (1968–1974). The Journal of Soils and Environment. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.19>. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Steppes are natural wealth of Tuva. In book: The role of the Russian-Mongolian program "Ubsu-Nur Experiment" in the development of science and innovation in the Republic of Tuva. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 30th anniversary of the Ubsunur International Center for Biosphere Research and the 100th anniversary of the Tuva Republic (Kyzyl, 26–29 April, 2021). Kyzyl: Publishing house Profprint, 2021. P. 253–264. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Change in the net primary production and carbon stock recovery in fallow soils. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 4. P. 501–510. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322040135>.

Titlyanova A.A., Shibareva S.V., Bienkowski P. Peat decomposition in a transitional mire in central Poland. Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 44. No. 2. P. 149–156. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229311020165>.

Titlyanova A.A., Shibareva S.V., Sambuu A.D. Grass and forest litter in the mountain forest-steppe of Tuva. Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2004. Vol. 11. No. 3. P. 425–432. (in Russian).

Shibareva S.V. Stocks and elemental composition of litter in forest and grass ecosystems of Siberia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2004. 22 p. (in Russian).

Shibareva S.V., Mironycheva-Tokareva N.P. Dynamics of vegetation and plant matter of steppe ecosystems in the south of the Chelyabinsk region. Bulletin of the Orenburg State University. 2015. No. 10 (185). P. 94–96. (in Russian).

Bieńkowski P., Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Chemical properties of litter of forest and grassland ecosystems: transect studies in Siberia (Russia). *Polish Journal of Ecology*. 2006. Vol. 54. No. 1. P. 91–104.

*Received 18 October 2023
Accepted 23 November 2023
Published 28 November 2023*

About the authors:

Titlyanova Argenta Antoninovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal 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), argenta@issa-siberia.ru

Varakina Zoya Vadimovna – laboratory technician 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); evzova@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/)