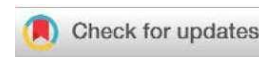


УДК 631.4(571.54)

<https://doi.org/10.31251/pos.v9i3.358>



Почвоподобные субаэральные и субаквальные образования Кулиных болот (Баргузинско-Чивыркуйский перешеек полуострова Святой Нос)

© 2026 В. И. Убугунова ¹, В. Л. Убугунов ¹, Н. И. Дорофеюк ², Л. Д. Балсанова ¹,

Т. А. Аюшина ¹, Ц. Н. Насатуева ¹, Е. И. Ласточкин ³

¹ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, улица Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия. E-mail: ubugunova57@mail.ru

²ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский проспект, 33, г. Москва, 119071, Россия. E-mail: nadin-home@mail.ru

³ФГБУН Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, улица Сахьяновой, 6а, г. Улан-Удэ, 670047, Россия. E-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

Цель исследования. Изучить микроморфологическое строение, свойства, минералогические особенности, состав диатомовых водорослей почвоподобных образований, формирующихся в области активных флюидных разгрузок.

Место и время проведения. Исследования проводили в урочище Кокуй на Баргузинско-Чивыркуйском перешейке полуострова Святой Нос (оз. Байкал). Изучали субаэральные и субаквальные почвоподобные образования Кулиных болот, формирующиеся в зоне геотермальных разгрузок.

Методы. Микроморфологические исследования выполнены в шлифах микромонокристаллов ненарушенного строения под поляризационным микроскопом Полам Р-312, минералогический состав – на электронном микроскопе LEO-1430 (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy-350. Степень и химизм засоления почв определены по показателям активности ионов и легкорастворимым солям. Готовые микропрепараты диатомовых водорослей исследовали при помощи светового микроскопа LevenhukMed 25T, оснащенного масляно-иммерсионным апохроматическим объективом Zeiss с увеличением 100× и числовой апертурой 1.32.

Основные результаты. Микроморфологическая диагностика показала достаточно однородный серый цвет илисто-глинистых пористых почвоподобных образований, незначительное количество слаборазложившихся растительных остатков, многочисленные скелеты диатомовых водорослей разных размеров и форм, наличие железистых пятен. В минералогическом составе субаквальных образований преобладают кварц, кварцсодержащие оксиды и сульфиды железа (пирит, пирротин), а в субаэральные – кварц и кварцсодержащие оксиды (~ 70%), карбонатизированные кальцитом. Для почвоподобных образований характерно высокое содержание оксида кремния и тонкодисперсных частиц, слабокислая и нейтральная реакция среды, слабая и средняя степень засоления хлоридно-сульфатно-натриевого и хлоридно-магниево-натриевого типов. Разнообразие диатомей представлено 35 видами, принадлежащих к пениатным, преобладают роды *Gomphonema* и *Nitzschia*. По комплексу морфологических и химических показателей установлено, что первичное почвообразование на Кулиных болотах происходит на осадочных породах кремнистого состава.

Заключение. В динамических экстремальных условиях области современных геотермальных флюидных разгрузок (Байкальская рифтовая зона, Кулиные болота) формируются своеобразные «минеральные» болота с субаэральными и субаквальными почвоподобными образованиями. Полученные материалы показали отсутствие в данных образованиях травертиновых и гейзеритовых отложений, а также торфообразования, характерного для болотных экосистем. Процессы первичного почвообразования в области современной разгрузки геофлюидов на Кулиных болотах происходят на диатомовых илах. Для их минералогического состава характерно преобладание игольчатых, трубчатых и линзовидных кристалликов кварца. Гидротермальные низкотемпературные процессы в субаквальных почвоподобных образованиях с восстановительными условиями способствуют образованию оксидов с высоким содержанием FeO, SO₃ и сульфидсодержащих минералов (пирит, пирротин). В субаэральные почвоподобных образований с окислительными условиями происходит карбонатизация кварца и образование кварцсодержащих оксидов с высоким содержанием оксида кальция и фтора, что позволяет предположить признаки «зарождения» гидротермального формирования флюоритовой минерализации в условиях начального этапа кайнозойского рифтогенеза. Необходимо дальнейшее проведение детальных комплексных исследований для установления диагностических маркеров почвоподобных образований «минеральных» болот, обоснования их классификационного положения, установления закономерностей пространственного распределения.

Ключевые слова: первичное почвообразование; диатомитовый ил; субаквальные условия; субаэральные условия; диатомовые водоросли; Байкальская рифтовая зона.

Цитирование: Убугунова В.И., Убугунов В.Л., Дорофеев Н.И., Балсанова Л.Д., Аюшина Т.А., Насатиева Ц.Н., Ласточкин Е.И. Почвоподобные субаэральные и субаквальные образования Кулиных болот (Баргузинско-Чивыркуйский перешеек полуострова Святой Нос) // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 3. e358. DOI: [10.31251/pos.v9i3.358](https://doi.org/10.31251/pos.v9i3.358)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная проблема почвоведения – формирование, функционирование и эволюция почв и почвоподобных тел в экстремальных условиях окружающей среды. Решение вопросов в этой области начато в рамках нового научного направления экстремальной географии, объектами которой являются почвы аридных пустынь, полярных областей, высокогорий, пещер, внеземных тел, районов естественных и техногенных катастроф (Фридланд, 1986; Дмитриев, 1996; Андроханов и др., 2004; Мергелов и др., 2016; Таргульян и др., 2017; Горячкин и др., 2019; Никитин, Семенов, 2020; Dolgikh et al., 2015). К этой категории также относятся эндогенно экстремальные и субаквальные почвы (Ковда, 1973; Геохимия лагунно-маршевых ..., 2016). Классификационное положение почвоподобных образований сложное, а диагностические признаки не разработаны (Горячкин, 2022). В классификационной системе Новой Зеландии гидротермально-преобразованные почвы вулканических областей относят к группе молодых гидротермальных почв (Hydrothermal Recent Soils) (Hewitt, 1992), в американской – к слабо развитым энтисолям и инсептисолям (Rodman et al., 1996), почвы Ирландии классифицированы как эндо- и экзотемпературные (Геннадиев и др., 2007), почвы Камчатки – как термоземы (Гольдфарб, 2005; Костюг, Геннадиев, 2014). В международной классификации IUSS Working Group WRB (2014) вулканические почвы районов повышенной вулканической активности отнесены к андосолям. В отечественной классификации (Классификация ..., 2004) почвы, функционирующие в непосредственной близости от действующих вулканов и гидротерм, отнесены к стволу синлитогенных почв отдела вулканических и слабо развитых почв, а в Полевом определителе почв (Полевой ..., 2008) – к стволу первичного почвообразования, отделу слабо развитых почв. Несмотря на достаточно большую площадь почвоподобных образований (примерно 20% почвенного покрова Земли) (Горячкин, 2022), до настоящего времени они слабо изучены, а по ряду регионов какие-либо сведения отсутствуют.

Изучение необычных по генезису газогидротермальных (минеральных) болотных экосистем Байкальской рифтовой зоны, формирующихся при сочетании эндогенных и экзогенных факторов в условиях экстраконтинентального климата, находится на начальном этапе исследований. Эндогенно-экстремальные почвенные образования описаны только для Кучегэрского азонального болота (северо-западный участок Байкальской рифтовой зоны) (Убугунов и др., 2019; Хитров и др., 2020). Показано, что классический механизм образования кочек травяных болот здесь заменяется диапировым, возникающим вследствие давления восходящих газогидротермальных флюидов из сейсмически активных глубинных разломов. В местах прорыва геофлюидов на дневную поверхность формируются «почвоподобные» минеральные образования с начальными стадиями почвообразовательного процесса.

В данной статье представлены материалы комплексных исследований почвоподобных образований Кулиных болот, ранее не изученных из-за их труднодоступности. Целью наших исследований было изучить микроморфологическое строение, свойства, минералогические особенности, состав диатомовых водорослей почвоподобных образований, формирующихся в области активных флюидных разгрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение почвоподобных образований проведено в урочище Котуй на Баргузинско-Чивыркуйском перешейке полуострова Святой Нос (оз. Байкал) (рис. 1). Этот перешеек образовался в миоцен-плиоцен-четвертичный период в результате заполнения осадочными породами Баргузинско-Чивыркуйского пролива (Дмитриев, 1968), он имеет блоковое строение и высокую тектоническую раздробленность поверхности (Лунина и др., 2009). Климат территории исследования континентальный с элементами «байкальского» лимноклимата (Территориальная организация ..., 2002). Среднегодовая температура воздуха отрицательная ($-3,3^{\circ}\text{C}$), количество атмосферных осадков – 382 мм (Байкал. Атлас, 1993).



Рисунок 1. Географическое положение участка исследований (а, б), ландшафты (в) и общий вид Кулиных болот (г). Условные обозначения: 1 – приблизительное место и направление фотосъемки; 2 – площадки пробоотбора.

Растительность Кулиных болот гетерогенная; неодинаковые условия по влажности проявляются в комплексном характере растительного покрова, образующего флористически и физиономически различающиеся участки (Территориальная организация ..., 2002). В местах разгрузки флюидов на

субаквальных участках встречаются бактериальные микробные маты. Диapiroвые валы практически не заняты высшей растительностью. По единичным полуразложившимся остаткам можно предположить, что они до «извержения» газов были заняты осоковыми ассоциациями.

На Баргузинско-Чивыркуйском перешейке отмечаются многочисленные открытые, скрытые, рассеянные и субаквальные выходы термальных вод и газов на дневную поверхность (Дзюба и др., 2002; Петров, Яковлев, 2023). Они типичны для всей рифтовой зоны, протяженность которой составляет 2500 км, а ширина 200–300 км. Наиболее «спрессованное» место разгрузки азотных терм находится вблизи озера Байкал (Хакусский, Давшинский, Язовский, Змеиный, Кулиный, Большереченский и др.), в сухоходной Баргузинской впадине (Гаргинский, Аллинский, Кучигэровский, Сеюйский, Умхейский, Алгинский и др.) и на северных участках Байкальской рифтовой зоны. В юго-западной части рифта разгружаются термальные воды углекислого типа, а в центральной – метановые.

При разгрузке терм на склонах, в реках и озерах не представляется возможным проследить их влияние на формирование почв. В этом отношении болотные экосистемы являются уникальными объектами; как правило, это азональные образования. На северо-восточном фланге рифта нам известно только 2 таких массива: Кучегэское болото и Кулиное. В результате разгрузки термальных вод на площади $>10000 \text{ м}^2$ формируются Кулиные болота (Дзюба, 2007; Плюснин и др., 2021) с многочисленными неглубокими мочажинами с водой и минеральными озерами округлой и овальной форм. Разгружающиеся термы характеризуется широким диапазоном варьирования температуры (от 20 до 70°C), сильнощелочными значениями pH (9,5) и низкой минерализацией; содержание сульфатов 133 мг/л, натрия 154, фтора 19, кремниевой кислоты 121 мг/л (Зиппа и др., 2022). По химическому составу азотные термальные воды сульфатно-натриевые (Перязева и др., 2016). В месте разгрузки грифонов (N 53,61718073°; E 108,96523499°) были взяты пробы субаквальных почвоподобных образований.

На Баргузинско-Чивыркуйском перешейке описаны специфические образования «грязевых вулканов». Для них характерен пульсационный характер проявления флюидодинамических процессов: отмечается чередование длительной стадии накопления газов и воды и кратковременного периода их фонтанирования (Дзюба и др., 2002; Дзюба, 2007). Многообразие форм разгружающейся эндогенной энергии обуславливает неоднородность геоморфологического строения болот, представленного понижениями озерных ванн, болотными кочками (фитогенные, криогенные, зоогенные и др.) переувлажненных ландшафтов, а также приподнятыми повышениями диапировых валов с рыхлым пористым осадком. Механизм формирования последних по аналогии с Кучегэскими болотами может быть определен как газогидротермально-флюидный (Убугунов и др., 2019). На диапировых валах были взяты пробы субаэральных почвоподобных образований (N 53,61858300°; E 108,96222800°; N 53,61901400°; E 108,96043300°).

Морфогенетическая диагностика и классификационное положение почв полуострова Святой Нос приведены для тундрового и тасежного поясов (Балсанова и др., 2022), а также низких абразионных с отчлененными лагунами, низких аккумулятивных и ингрессионных побережий полуострова (Балсанова и др., 2024). Почвенный покров болотных экосистем остается малоизученным. По имеющимся немногочисленным данным, основным типом почв болот тектонических впадин кайнозойского возраста Байкальской рифтовой зоны (Тункинской, Баргузинской, Верхнеангарской) обычно являются почвы органогенного ствола, с ведущим биогенно-аккумулятивным процессом торфообразования и метаморфическим – оглеения (Петрович, 1974; Почвы Баргузинской ..., 1983; Почвы дельты ..., 2012; Убугунов и др., 2016; Черкашина, Голубцов, 2016). Наряду с торфяно-перегнойно-глеевыми почвами, в местах флюидной разгрузки на Кучегэских болотах описаны в таких коллизионных зонах «почвоподобные» образования с вывернутыми наружу глеевыми горизонтами или выходом на дневную поверхность более глубинной разжиженной флюидизированной массы с импрегнированными слоями (Убугунов и др., 2019).

На ключевом участке (см. рис. 1) в июле 2020 года был проведен отбор проб. Данный период выбран как оптимальный для отражения стабильных почвенных характеристик, характерных для летнего сезона, когда почва находится в прогретом состоянии и завершены основные биохимические процессы весеннего периода. Пробы отбирали в пяти повторностях, определение проводили в смешанных образцах. Были взяты пробы с 0–10 см слоя субаквальных (места разгрузки гидротерм с альго-бактериальными матами) и субаэральных (диапировый вал) почвоподобных образований. Глубина отбора проб обусловлена эффективностью извлечения поверхностного слоя с помощью лопаты максимально ненарушенного строения для последующего микроморфологического анализа. Для исследований диатомей и мезофауны достаточно отбора субпробы из 0–1 и 0–10 см (Лихошвай и

др., 2005; Pawlowski et al., 2022). Для обеспечения репрезентативности данных и оценки пространственной вариабельности применяли метод повторных выборок.

Микроморфологические исследования проводили в шлифах, изготовленных из микромонолитов ненарушенного строения (Парфенова, Ярилова, 1977). Шлифы изучали в параллельных николях под поляризационным микроскопом Полам Р-312 с набором окуляров и объективов, позволяющим получать увеличения 56х-400х. Анализ минералогического состава твердого осадка проводился на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) в режиме переменного давления (Variable Pressure, VP).

Анализ физико-химических и химических свойств почв провели стандартными общепринятыми методами в смешанных образцах (Воробьева, 1998): органический углерод (Сорг.) определили методом мокрого сжигания по Тюрину; общий азот (N) – методом Кьельдаля; состав легкорастворимых солей – в водной вытяжке 1:5; гранулометрический состав – пирофосфатным методом по Качинскому; pH, активность ионов натрия – ионоселективными электродами ЭЛИС на регистрирующем иономере Экотест-120 в водах и в пастах из образцов почв и грунтов, увлажненных до 30 мас. % дистиллированной водой. Степень и химизм засоления определили по рекомендациям (Хитров, Понизовский, 1990). Готовые микропрепараты диатомовых водорослей исследовали при помощи светового микроскопа LevenhukMed 25T, оснащенного масляно-иммерсионным апохроматическим объективом Zeiss с увеличением 100× и числовой апертурой 1.32. Микрофотографии створок были получены при помощи цифровой камеры LevenhukM1000 PLUS. Определения размеров створок и частоты структурных элементов проводили по цифровым изображениям с использованием программ ImageJ 1.45si GIMP 2.10.10.

Данные, полученные в результате химического анализа смешанных почвенных проб, подвергали статистической обработке с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0 (TIBCO Soft Inc., США). Для количественной характеристики каждого измеряемого показателя по генетическим горизонтам были рассчитаны основные дескриптивные статистики: среднее арифметическое значение и стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Субаквальные почвоподобные образования представляют собой достаточно однородный, серый, илесто-глинистый пористый легкий материал, местами с непрозрачной окраской из-за включений железистых пятен (рис. 2а); встречаются единичные слаборазложившиеся растительные остатки (рис. 2б), многочисленные скелеты диатомовых водорослей различных форм (рис. 2а–е). В их составе отсутствуют песчаные частицы, доминирует мелкая пыль (0,005–0,001 мм), органического вещества содержится незначительное количество (Сорг. $4,28 \pm 0,02\%$), реакция среды слабокислая (pH 5,4), емкость катионного обмена низкая (14,7 ммоль/100 г), значения aF^- , aCl^- , aNa^+ невысокие (таблица).

Таблица

Некоторые физико-химические свойства 0–10 см слоя субаквальных и субэкральных почвоподобных образований

Физико-химические показатели		0–10 см слой почвоподобных образований	
		Субаквальные	Субэкральные
pH _{водн.}		$5,4 \pm 0,1$	$7,0 \pm 0,1$
Потеря при прокаливании, %		$8,27 \pm 0,03$	$20,01 \pm 3,51$
Сорг., %		$4,28 \pm 0,02$	$10,91 \pm 1,73$
N, %		$0,83 \pm 0,04$	$1,40 \pm 0,07$
SiO ₂ , %		$82,95 \pm 0,07$	$71,33 \pm 3,17$
Легкорастворимые соли, %		$0,412 \pm 0,007$	$0,217 \pm 0,006$
Токсичные соли, %		$0,181 \pm 0,005$	$0,120 \pm 0,002$
Активность ионов (в пасте с влажностью 30%), ммоль/л	aF^-	$0,3 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,6$
	aCl^-	$1,8 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,6$
	aNa^+	$5,5 \pm 0,1$	$8,9 \pm 1,6$
Емкость катионного обмена, ммоль/100 г		$14,8 \pm 0,4$	$19,2 \pm 0,1$
Размер частиц, мм; содержание, %	0,05–0,01	24 ± 1	29 ± 4
	0,01–0,005	27 ± 1	18 ± 1
	0,005–0,001	38 ± 1	31 ± 4
	<0,001	11 ± 1	21 ± 1

Содержание легкорастворимых солей составляет $0,412 \pm 0,007\%$, токсичных – $0,181 \pm 0,005$ (см. табл.). Степень засоления оценивается как слабая. Среди анионов преобладают сульфат-ионы (70% от суммы анионов), а среди катионов – кальций и натрий, их доля составляет 53 и 39% от суммы катионов, соответственно (рис. 3). В донных осадках отмечается присутствие гипса (0,180%), соды не обнаружено. Тип химизма нейтральный, по анионам хлоридно-сульфатный, по катионам – натриевый. Расчет гипотетических солей показал, что 55% из них представлены нетоксичными солями (CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), 45% – токсичными (Na_2SO_4 , NaCl , MgCl_2).

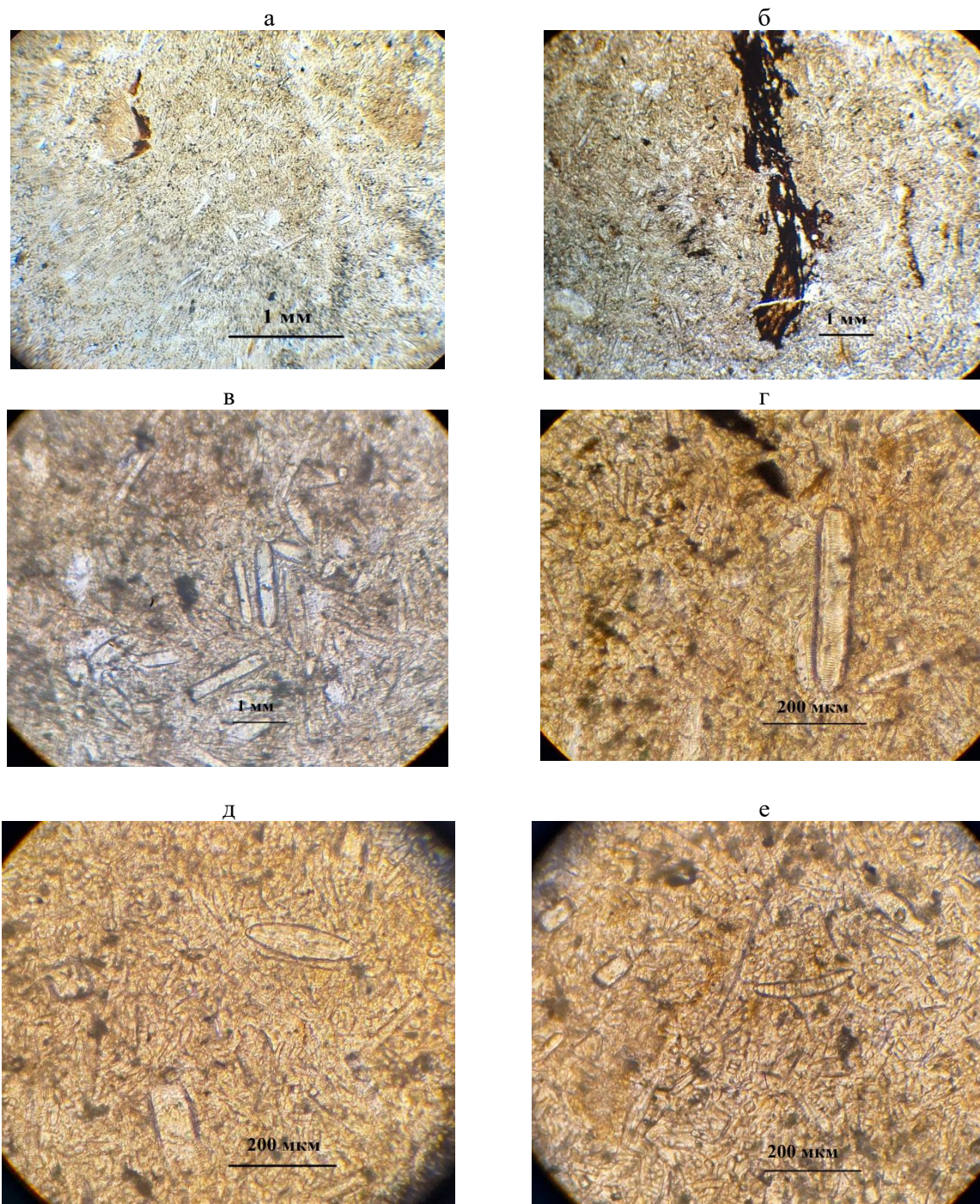


Рисунок 2. Микростроение субаквальных почвоподобных образований в зоне разгрузки многочисленных грифонов термального источника Кулиные болота: а – общее микростроение донных отложений с единичными железистыми пятнами; б – слаборазложившийся растительный остаток; в – скелеты диатомовых водорослей в общей массе; формы диатомовых водорослей: г – линейная, д – эллиптическая, е – полуланцетная.

На растровом электронном микроскопе с сопряженным химическим анализом выявлено высокое содержание кварца, кварцевых оксидов, а также нескольких оксидов с высоким содержанием серы, близких по составу к амфиболу и слюде. Особенностью современного минералообразования в субаквальных почвоподобных образованиях является трансформация поступающих с термальными водами сульфатов в сульфидные минералы железа (пирит, пирротин) и оксиды с высоким содержанием FeO и SO₃, которые встречаются в виде вкрапленности размером до 10, редко 20 мкм в обломках кварца (рис. 4б).

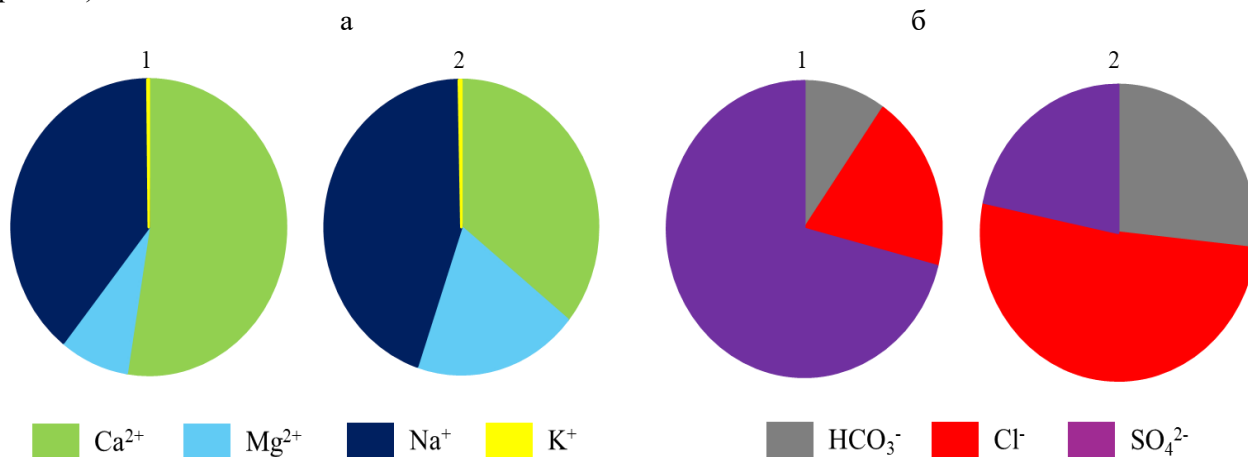


Рисунок 3. Соотношение катионов (а) и анионов (б) в 0–10 см слое субаквальных (1) и субаэриальных (2) почвоподобных образований по данным водной вытяжки.

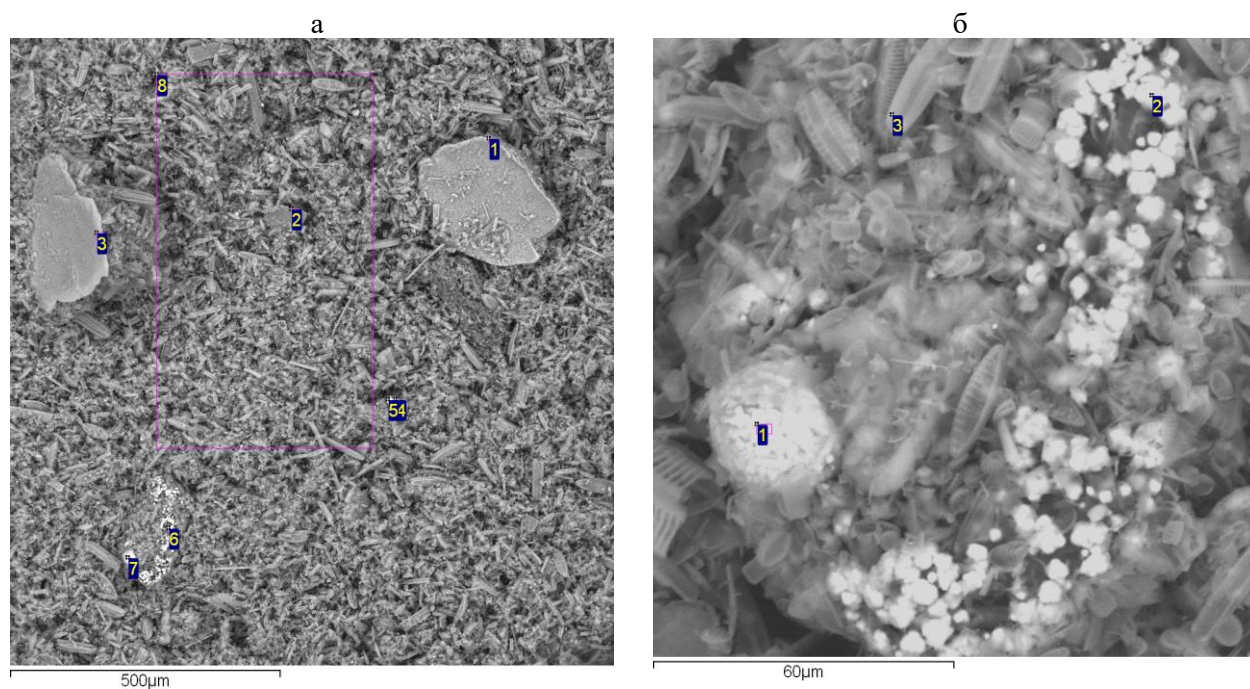


Рисунок 4. Минералогический состав 0–10 см слоя субаквального почвоподобного образования (а) с позициями энергодисперсионного анализа: 1, 3, 8 – кварцсодержащие оксиды, 2 – кварц, 4–7 – пирит; взаимоотношение многочисленных минералов кварца и сульфидов (б) с позициями энергодисперсионного анализа: 1, 2 – пирит, 3 – кварцсодержащий оксид.

Образование сульфидных минералов в условиях сильнощелочной среды и восстановительной обстановки типично для азотных термальных вод (Зиппа, 2020) и связано с интенсивно протекающими процессами бактериальной сульфатредукции (Намсараев и др., 2009; Хахинов и др., 2012). Принимая во внимание положительные значения Eh в 0–30 см толще (Намсараев и др., 2009; Хахинов и др., 2012) можно предположить и наличие окислительной обстановки, при которой сульфидные минералы неустойчивы (Водяницкий, 2010). Трансформация сульфидов может быть обусловлена как

абиогенными, так и биохимическими процессами, при этом бактериальное окисление при воздействии штаммов *Thiobacillus ferrooxidans* интенсивнее химического разложения пирита от 2–13 до 30 и более раз (Красильников, Шоба, 1997). Именно этим процессом можно объяснить несоответствие разгружающихся сильнощелочных термальных вод (pH 9,5) с формированием в зоне влияния их разгрузки слабокислых субаквальных почвоподобных образований (pH 5,4) (см. табл.).

Для изученных проб характерно высокое количество SiO_2 (83%). Накопление кремнезема, как показали проведенные микроморфологические (рис. 2а–д) и минералогические исследования (рис. 4), связано с окремнелой органикой разных размеров и форм. Это, преимущественно, палочковидные прозрачные и бесцветные образования с темным непрозрачным окаймлением, эллиптической, широкоэллиптической, линейной и полуланцетной форм (рис. 2г–е). В общей массе визуально преобладают водоросли с четкими контурами эллиптической и линейной форм. Хорошей сохранности створок диатомовых водорослей способствовала слабокислая реакция среды и низкая минерализация водоема (Flowver, Ruves, 2009).

Проведенные исследования выявили разнообразие диатомовых водорослей субаквальных почвоподобных образований Кулиных болот (35 видов). Все виды принадлежат к пеннатым диатомовым, из которых большая часть является шовными. Наиболее богато представлены видами роды *Gomphonema* (7 таксонов) и *Nitzschia* (5 таксонов).

Субаэральные почвоподобные образования на Кулиных болотах формируются на повышенных участках диапировых валов. Эти формы рельефа, вероятнее всего, имеют аналогичный с Кучегэрским термальным полем (северо-восток Баргузинской котловины) механизм формирования, связанный как с флюидной разгрузкой, так и с мерзлотным фактором (Убугунов и др., 2023, 2025). Верхний (0–10 см) слой изученных почвоподобных образований по микроморфологическому строению представляет собой однородную, пористую, легкую серовато-коричневую массу с многочисленными скелетами диатомовых водорослей разных размеров и форм (рис. 5а, б), железистыми образованиями (рис. 5в) и растительными остатками (рис. 5г). Можно выделить крупные панцири диатомовых водорослей (1–1,3 мм) линейной формы с хорошо видимыми поперечными штрихами. Средний размер (0,5 мм) имеют водоросли эллиптической формы. В шлифах отчетливо видны растительные остатки средней степени разложения (см. рис. 5г). Этому способствует более активное поступление растительной массы на участках диапировых валов, вышедших из постоянного влияния вод.

Субаэральные серовато-коричневые пористые почвоподобные тела характеризуются высоким содержанием тонкодисперсных частиц, органического вещества (потеря при прокаливании $20,01 \pm 3,51\%$), низкими значениями емкости катионного обмена ($19,2 \pm 0,1$ ммоль/100 г) (см. табл.). Эти диссоциирующие показатели можно объяснить тем, что основными компонентами изученных образований являются слаболитифицированные отложения панцирей диатомовых водорослей, которые, как известно, состоят преимущественно из аморфного кремнезема, имеющего низкие обменные свойства (Милютин и др., 2021). Легкорастворимых солей в изученных почвоподобных образованиях содержится от 0,205 до 0,222% ($0,217 \pm 0,006\%$), среди них большая часть представлена токсичными солями ($0,120 \pm 0,002\%$). Среди анионов 50–51% приходится на Cl^- , 26–29% – на HCO_3^- и 20–22% – на SO_4^{2-} . Изученные образования имеют хлоридный химизм по анионам и магниевонатриевый по катионам. Расчет гипотетических солей выявил преобладание токсичных солей (Na_2SO_4 , NaCl , MgCl_2) и отсутствие соды.

В изученных отложениях содержание SiO_2 изменяется от 65 до 76% и в среднем составляет $71,33 \pm 3,17\%$ (см. табл.). На растровом электронном микроскопе выявлено преобладание игольчатых и трубчатых кристаллов кварца и кварцсодержащих оксидов (более 60–70 мас.% SiO_2) размером от 10 до 100 мкм и их агрегатных скоплений (рис. 6). В интерстициях кристаллов кварца отмечается карбонатизация их кальцитом. В кварцсодержащих оксидах установлено высокое содержание CaO и F , что позволяет предположить признаки «зарождения» гидротермального формирования флюоритовой минерализации в условиях начального этапа кайнозойского рифтогенеза. Также встречается тремолит, в единичном случае отмечена мелкая (менее 10 мкм) вкрапленность тетраурикупита в альбите.

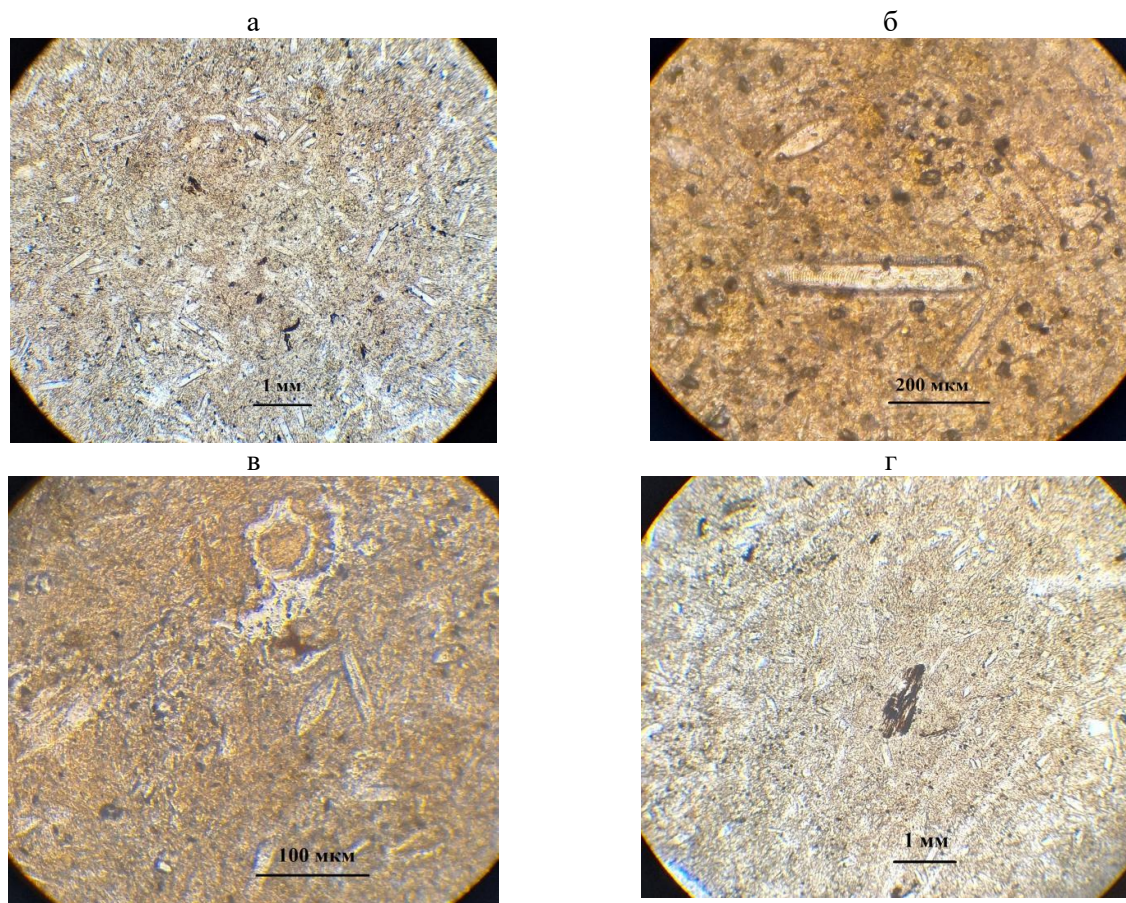


Рисунок 5. Общее микростроение слоя 0–10 см субаэриального почвоподобного образования диапирового вала: а – общее микростроение; б – панцири диатомовых водорослей линейной и эллиптической форм; в – мелкие железистые пятна; г – растительный остаток средней степени разложения.

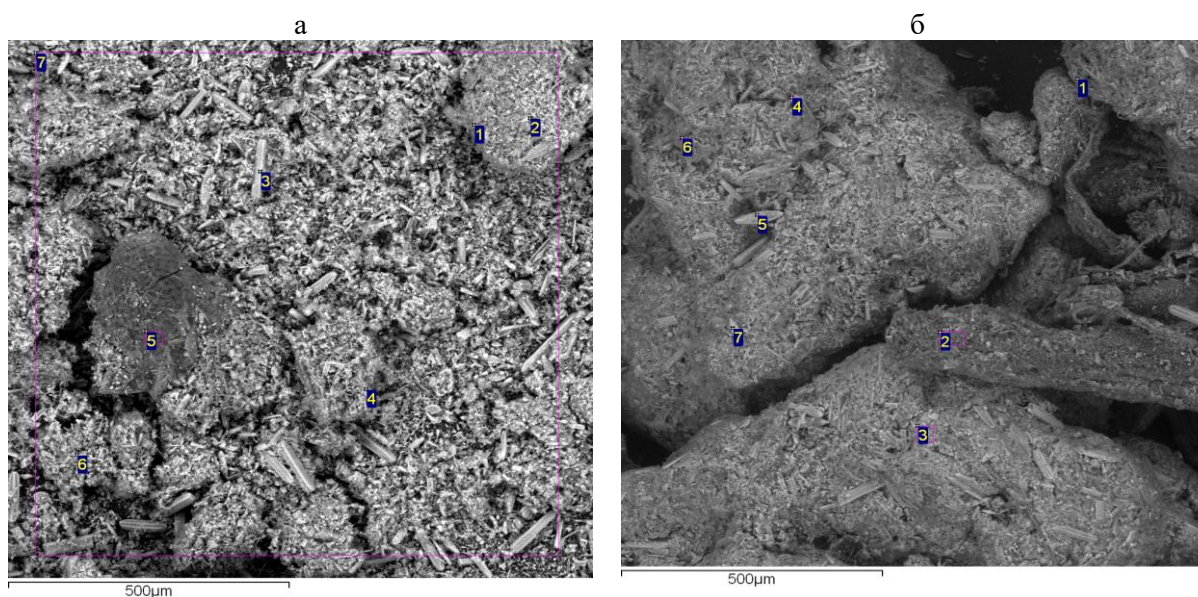


Рисунок 6. Минералогический состав 0–10 см слоя субаэриального почвоподобного образования (а, б) с игольчатыми, трубчатыми и линзовидными кристалликами кварца, в интерстициях тонкозернистый кальцит (а) с позициями энергодисперсионного анализа: а: 1, 2, 6 – кварц; 3, 5–7 – кварцсодержащие оксиды; б: 1–3, 6, 7 – кварцсодержащие оксиды; 4, 5 – кварц.

ОБСУЖДЕНИЕ

В тектонически активных зонах северо-западной части Байкальского рифта избыточно увлажненные территории образуются за счет разгрузки из глубоких слоев литосферы на земную поверхность разжиженных флюидизированных масс. Отличительной особенностью этих болотных экосистем является очень сложная пространственная организация и различная конфигурация микроповышений (бугров, валов, кочек), связанная с диапировым механизмом их формирования (Убугунов и др., 2019). В результате эндогенных процессов почвы болот представляют собой генетический ряд газогидротермальных турбированных образований, представленных как органогенными (23–40% органики), так и минеральными вариантами из выдавленного кверху материала с очень низким содержанием органики (1,5–5,6%) (Хитров и др., 2020). Система генетических горизонтов и «классические» проявления процессов болотного почвообразования (органо-аккумулятивных, метаморфических) в изученных почвоподобных образованиях полностью стерты современным влиянием газо-водо-грязевых флюидных разгрузок. Эти почвоподобные образования нужно рассматривать в соответствии с предложением С. В. Горячкина с соавторами (2019) в качестве объектов экстремального почвообразования, сформированных при сочетании эндо- (повышенный тепловой поток, разгрузка гидротерм, нефтегазовых образований) и экзогенных факторов (экстраконтинентальный климат).

Представленные в статье материалы показали, что в субэкральных и субаквальных почвоподобных образованиях урочища Кокуй отсутствуют типичные для мест разгрузки термальных вод хемогенные породы, которые обычны для Камчатки (Жемчужина Камчатки ..., 2009), Исландии, Йеллоустоуна (Scott, 2008), Новой Зеландии (Houghton, Scott, 2002), районов Кенийского и Эфиопского рифтов, грабена Альбертин Восточно-Африканской внутриконтинентальной рифтовой зоны (Scott, 2008; Renaut et al., 2013). Не установлены и типичные для зон разгрузки термальных вод Байкальской рифтовой зоны травертины и гейзериты (Скляр и др., 2004; Великославинский и др., 2017; Замана и др., 2023; и др.). Это связано в значительной степени с особенностями водного баланса Кулиных болот. Разгружающиеся термальные воды разбавляются талыми водами в ранневесенний период, атмосферными осадками июльско-августовского тихоокеанского циклона, пресными водами ручьев, стекающих с Баргузинского хребта. В таких смешанных слабоминерализованных, нейтральных (pH 6,7–7,1), низкотемпературных болотных водах с повышенным содержанием кремнезема, сульфатов серы, натрия, фтора (Дзюба и др., 2002; Плюснин и др., 2021; Намсараев и др., 2009) создаются оптимальные условия для функционирования диатомовых водорослей. Их разнообразие в субаквальных образованиях представлено 32 видами, в субэкральных – 21 видом. Общими для почвоподобных отложений являются 17 видов диатомей. Виды *Eunotia bilunaris* (Ehrenberg) Schaarschmidt, *Gomphonema* sp. 1, *Gomphonema* sp. 2 характерны только для субэкральных почвоподобных образований. По имеющимся сведениям, все идентифицированные диатомеи являются бентосными (донными или эпифитами), некоторые даже обитателями почв (например, *Nitzschia amphibia* Grunow). Повсеместно встречающаяся не только в водоемах, но и почвах *Nitzschia amphibia* Grunow участвует в первичном заселении влажных субстратов; субэкральных образованиях данный вид не обнаружен.

Образующиеся при этом отложения по комплексу показателей (высокое содержание SiO₂, тонкодисперсных частиц, слабая засоленность, низкая емкость катионного обмена, относительно невысокое содержание органического вещества) более всего соответствуют диатомовым илам (Котляр, Терехина, 2022); именно они являются субстратом для формирования почвоподобных образований. В условиях повышенного теплового потока (Голубев, 2007) отмечается интенсивная деятельность микробиоты (Намсараев и др., 2009; Геохимическая деятельность ..., 2011; Хахинов и др., 2012) и происходит быстрое разложение и минерализация растительных остатков (C/N 5–8), поэтому в изученных почвоподобных образованиях практически не встречается органического вещества слабо разложившегося строения (см. рис. 2, 5). Не установлено каких-либо признаков глеевого процесса в 0–10 см слое, отмечаются только единичные железистые пятна. Поступающие термальные воды способствуют проявлению современных процессов минералообразования. Выявлено, что при преобладании кварцевого компонента в составе минеральных ассоциаций изученных почвоподобных образований отмечаются различные тренды минералообразования в субаквальных и субэкральных обстановках (см. рис. 4, 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые сведения о микроморфологическом строении, минералогическом составе, физико-химических свойствах почвоподобных образований зон флюидной разгрузки, представляющие интерес для теории экстремального почвообразования. Установлено, что почвообразование происходит на диатомитовых илах при различных направлениях современного минералообразования в субэзральных и субаквальных почвоподобных образованиях. Следующим этапом наших исследований будет установление роли различных эндогенных разгрузок (термальных вод, газов, нефтебитумов), гидрологического фактора (поверхностных, болотных, грунтовых, термальных вод), растительности, микробиома в процессах первичного почвообразования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны кандидату биологических наук, научному сотруднику кафедры микологии и альгологии Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Д.А. Чудаеву за помощь в определении диатомовых водорослей.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Института общей и экспериментальной биологии СО РАН «Биогеохимические и агрохимические свойства почв Байкальского региона, их углеродсеквестрирующий потенциал, эволюция в зонах влияния эндогенеза, мониторинг климатических и антропогенных трансформаций» №126021217181-4; Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН №FFER-2024-0025 «Биогеоценология и эволюция экосистем».

ЛИТЕРАТУРА

- Андроханов В.А., Куляпина В.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 151 с.
- Байкал. Атлас. Москва: Роскартография, 1993. 160 с.
- Балсанова Л.Д., Бадмаев Н.Б., Найданов Б.Б., Балсанов А.В. Разнообразие и свойства буроземов прибрежных горных поднятий на восточном побережье озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. 2022. № 3. С. 3–13. <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2022-3-3-13>
- Балсанова Л.Д., Найданов Б.Б., Балсанов А.В. Морфогенетические особенности почв побережья полуострова Святой Нос (Восточное Прибайкалье) // Почвоведение. 2024. № 5. С. 693–706. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24050048>
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Скляр Е.В., Сквитина Т.М., Толмачева Е.В., Склярова О.А., Прокопов Н.С. Геохимические особенности и флюидный режим формирования позднечетвертичных гейзеритов Приольхонья и о. Ольхон (Байкальская рифтовая зона) // Доклады Академии наук. 2017. Том 474. № 4. С. 465–470. <https://doi.org/10.7868/S0869565217160150>
- Водяницкий Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2010. 156 с.
- Воробьева Л.А. Химический анализ почв. Москва: Изд-во Московского университета, 1998. 272 с.
- Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернявский С.С., Пиковский Ю.И. Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии // Почвоведение. 2007. № 6. С. 661–675.
- Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны / Б.Б. Намсараев и др. Новосибирск: Гео, 2011. 302 с.
- Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия / Н.С. Касимов, М.С. Касатенкова, А.Н. Ткаченко и др. Москва: Лига-Вент, 2016. 243 с.
- Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.
- Гольдфарб И.Л. Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки). Автореферат диссертации ... канд. геогр. наук. Москва, 2005. 25 с.
- Горячкин С.В. География экстремальных почв и почвоподобных систем // Вестник Российской Академии наук. 2022. Том 92. № 6. С. 564–571. <https://doi.org/10.31857/S0869587322060056>

- Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. География и генезис почв экстремальных условий // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040>
- Дзюба А.А. Гидротермы Байкальской впадины и платформенных областей южной части Сибирской платформы // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 49–53.
- Дзюба А.А., Кулагина Н.В., Абидуева Т.И., Черных А.Л. Минеральные озера Баргузинско-Чивыркуйского перешейка // География и природные ресурсы. 2002. №2. С. 61–67.
- Дмитриев Г.А. История осадконакопления на перешейке полуострова Святой Нос // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. Москва: Наука, 1968. С. 89–97.
- Дмитриев Е.А. Почва и почвоподобные тела // Почвоведение. 1996. № 3. С. 310–319.
- Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров / В.М. Сугробов и др. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
- Замана Л.В., Солотчин П.А., Скляров Е.В. Низкотемпературный гейзерит и эфемерные минералы Могойского термального источника (Северное Забайкалье, Байкальская рифтовая зона) // Доклады Академии наук. Науки о земле. 2023. Том 511. № 1. С. 19–23. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600431>
- Зиппа Е.В. Геохимия термальных вод провинции Цзянси (Китай). Автореферат диссертации ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2020. 22 с.
- Зиппа Е.В., Пургина Д.В., Дребот В.В. Химический состав и геотермальный режим термальных вод Байкальской складчатой области (Республика Бурятия) // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 110–115. <https://doi.org/10.17513/use.379585>
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Красильников П.В., Шоба С.А. Сульфатнокислые почвы Восточной Финляндии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1997. 160 с.
- Ковда В.А. Основы учения о почвах: в 2 кн. / АН СССР. Науч. совет по проблемам почвоведения и мелиорации почв. Москва: Наука, 1973. 468 с.
- Костюг Д.Н., Геннадиев А.Н. Почвы и почвенный покров долины гейзеров // Почвоведение. 2014. № 6. С. 643–653. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14060069>
- Котляр В.Д., Терёхина Ю.В. Классификационные признаки и особенности опал-кристобалитовых опоквидных пород как сырья для стеновой керамики // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 25–30. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30>
- Лихошвай Е.В., Помазкина Г.В., Костюковская А.О., Сергеева В.Н., Левина О.В. Распределение диатомовых водорослей в верхнем слое донных отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2005. Том 46. № 1. С. 34–49.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Гео, 2009. 316 с.
- Мергелов Н.С., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Конюшков Д.Е., Лупачев А.В., Федоров-Давыдов Д.Г., Горячкин С.В. Почвы и почвоподобные тела оазисов и нунатаков Восточной Антарктиды // Вопросы географии. 2016. № 142. С. 593–628.
- Милютин В.В., Некрасова Н.А., Белоусов П.Е., Крупская В.В. Сорбция радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{233}U на различных природных сорбентах // Радиохимия. 2021. Том 63. № 6. С. 510–517. <https://doi.org/10.31857/S0033831121060022>
- Намсараев Б.Б., Хахинов В.В., Турунхаев А.В. Болотные экосистемы перешейка полуострова Святой Нос // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 66–71.
- Никитин Д.А., Семенов М.В. Субаквальные почвы Антарктиды: условия формирования и перспективы микробиологических исследований // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 48–69. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-49-69>
- Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. Москва: Наука, 1977. 197 с.
- Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И. Особенности формирования химического состава вод озер восточного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 49–59. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59))

- Петров В.В., Яковлев Д.В. Геохимические особенности природных вод центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Региональная геология и металлогения. 2023. № 95. С. 42–53. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2023_95_42-53
- Петрович П.И. Низинные торфяные почв Бурятии. Улан-Удэ: Бур. кн. изд-во, 1974. 139 с.
- Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский, М.К., Перязева Е.Г., Ангахаева Н.А. Факторы и процессы образования соленого озера на берегу Байкала // Водные ресурсы. 2021. Том 48. № 2. С. 194–206. <https://doi.org/10.31857/S0321059621020097>
- Полевой определитель почв России. Москва: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия) / А.Б. Гынинова и др. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. 344 с.
- Почвы Баргузинской котловины / Т.И. Азьмука, В.К. Бахнов, В.И. Волковинцер и др. Новосибирск: Наука, 1983. 270 с.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Кулагина Н.В., Склярова О.А., Сквитина Т.М. Позднечетвертичная "Долина Гейзеров" на западе Байкальского рифта (Ольхонский регион) // Доклады Академии наук. 2004. Том 95. № 3. С. 387–391.
- Таргульян В.О., Мергелов Н.С., Горячкин С.В. Почвоподобные тела на Марсе // Почвоведение. 2017. № 2. С. 205–218. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020125>
- Территориальная организация Забайкальского национального парка / А.Д. Абалаков, Е.Д. Овдин, Л.С. Новикова и др.; отв. ред. В.М. Плюснин. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2002. 125 с.
- Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Цыремпилов Э.Г. Почвы и формы рельефа Баргузинской котловины. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. 212 с.
- Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупышев Ю.А., Хитров Н.Б. Почвенно-растительный покров болот и заболоченных понижений в зоне влияния термальных полей Баргузинского рифта // Природа Внутренней Азии. 2019. № 3(12). С. 37–53. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-3-37-53>
- Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Хитров Н.Б., Ямнова И.А., Лебедева М.П., Насатуева Ц.Н. Почвоподобные образования диапировых конструкций Байкальской рифтовой зоны // Природа Внутренней Азии. 2023. № 1(23). С. 79–97. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2023-1-79-97>
- Убугунов В.Л., Ямнова И.А., Убугунова В.И., Хитров Н.Б., Лебедева М.П. Органическое вещество эндогенных почв Кучегэрского термального поля (Баргузинская котловина, Забайкалье): формы и внутривертикальное распределение // Природа Внутренней Азии. 2025. № 2(31). С. 61–78. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2025-2-61-78>
- Фридланд В.М. Проблемы географии, генезиса и классификации почв. Москва: Наука, 1986. 243 с.
- Хахинов В.В., Намсараев Б.Б., Доржиева Г.С.-С., Бурюхаев С.П. Гидрохимическая и микробиологическая характеристики болотных экосистем перешейка полуострова Святой Нос (озеро Байкал) // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 65–71.
- Хитров Н.Б., Понизовский А.А. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. Москва: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 1990. 236 с.
- Хитров Н.Б., Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Жамбалова А.Д., Цыремпилов Э.Г., Парамонова А.Е., Насатуева Ц.Н. Газогидротермальное турбирование почв как фактор формирования микроповышений // Почвоведение. 2020. № 2. С. 133–151. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020069>
- Черкашина А.А., Голубцов В.А. Структура почвенного покрова Тункинской котловины // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 130–140. [https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2016-3\(130-140\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(130-140))
- Dolgikh A.V., Mergelov N.S., Abramov A.A., Lupachev A.V., Goryachkin S.V. Soils of enderby land // The soils of Antarctica. New York: Springer Verlag, 2015. P. 45–64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_4
- Flowver R.J., Ruves D.B. Diatom preservation: differential preservation of sedimentary Diatoms in two saline lakes // Acta Botanica Croatica. 2009. No. 68(2). P. 381–399.
- Hewitt A.E. New Zealand soil classification // DSIR Land Resources Scientific Report. 1992. No. 19. P. 133.
- Houghton B.F., Scott B.J. Geyserland: a guide to the volcanoes and geothermal areas of Rotorua. Guidebook 13. Lower Hutt: Geological Society of New Zealand, 2002. 48 p.
- 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.

Pawlowski J., Bruce K., Panksep K., Aguirre F.I., Amalfitano S., Apothélos-Perret-Gentil L., Baussant T., Bouchez A., Carugati L., Cermakova K., Cordier T., Corinaldesi C., Costa F.O., Danovaro R., Dell'Anno A., Duarte S., Eisendle U., Ferrari B.J.D., Frontalini F., Frühe L., Haegerbaeumer A., Kisand V., Krolicka A., Lanzén A., Leese F., Lejzerowicz F., Lyautey E., Maček I., Sagova-Marečková M., Pearman J.K., Pochon X., Stoeck T., Vivien R., Weigand A., Fazi S. Environmental DNA metabarcoding for benthic monitoring: A review of sediment sampling and DNA extraction methods // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 818. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151783>

Renaut R.W., Owen R.B., Jones B., Tiercelin J.-J., Ego J.K., Konhauser K.O. Impact of lake-level changes on the formation of thermogene travertine in continental rifts: Evidence from Lake Bogoria, Kenya Rift Valley // Sedimentology. 2013. Vol. 60(2). P. 428–468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01347.x>

Rodman J.E., Karol K.G., Price R.A., Sytsma K.J. Molecules, morphology and dahlgren's expanded order Capparales // Sistematic Botany. 1996. Vol. 21(3). P. 289–307. <https://doi.org/10.2307/2419660>

Scott B. The Geysers of Yellowstone, Fourth Edition. Boulder, CO: University Press of Colorado, 2008. 456 p. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1d8h97t>

Поступила в редакцию 13.03.2026

Принята 14.04.2026

Опубликована 03.07.2026

Сведения об авторах:

Убугунова Вера Ивановна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); ubugunova57@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1399-8283>

Убугунов Василий Леонидович – кандидат биологических наук, заместитель директора ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); ubugunovv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7899-1906>

Дорофеев Надежда Ивановна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии аридных территорий ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (Москва, Россия); nadin-home@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6953-8384>

Балсанова Лариса Даниловна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией географии и экологии почв ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); balsanova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1805-2613>

Аюшина Туяна Аюшиевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); tuyana2602@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7187-0481>

Насатиева Цымпилма Номтоевна – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); tsympilmann@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6794-2872>

Ласточкин Евгений Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории петрологии ФГБУН Геологический институт им Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); gin-buryatia-07@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-0919>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Subaerial and subaqueous soil-like formations of the Kulin Marshes (Barguzinsko-Chivyrkuiv Islands of the Svyatoy Nos Peninsula)

© 2026 V. I. Ubugunova¹, V. L. Ubugunov¹, N. I. Dorofeyuk², L. D. Balsanova¹, T. A. Ayushina¹, Ts. N. Nasatieva¹, E. I. Lastochkin³

¹Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanova street, 6, Ulan-Ude, Russia. E-mail: ubugunova57@mail.ru

²A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution Problems of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Prospekt, 33, Moscow, Russia. E-mail: nadin-home@mail.ru

³N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanova street, 6a, Ulan-Ude, Russia. E-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

The aim of the study was to investigate the micromorphological structure, properties, mineralogical features, and composition of diatoms of soil-like formations formed in the area of active fluid discharge.

Location and time of the study. The research was conducted on the Barguzin-Chivyrkuy isthmus of the Svyatoy Nos in the Kokui tract. Subaerial and subaqueous soil-like formations of Kulin mires (romanized: Kuliniye bolota) formed in the geothermal discharge zone were studied.

Methods. Micromorphological studies were carried out with intact micromonoliths using polarization microscope (Polam P-312). Mineralogical composition was studied using electron microscope LEO-1430, Carl Zeiss, Germany with an INCA Energy-350 energy dispersion spectrometer. The analysis of physico-chemical and chemical properties of soils was performed in mixed samples, the degree and chemistry of salinity were assessed by ions activity and easily soluble salts content. The diatoms were examined using a light microscope LevenhukMed 25T equipped with a Zeiss oil-immersion apochromatic lens with a magnification of 100× and a numerical aperture of 1.32.

The main results. Micromorphological diagnostics showed a fairly uniform gray color of silty-clay porous soil-like formations, a small number of poorly decomposed plant remains, numerous skeletons of diatoms of various sizes and shapes, and the presence of glandular spots. The mineral composition of the subaqueous formations was dominated by quartz, quartz-containing oxides and iron sulfides (pyrite, pyrrhotite), whereas in the subaerial formations the quartz and quartz-containing oxides (~70%) carbonated with calcite predominated. Soil-like formations were characterized by a high content of SiO₂, fine particles, slightly acidic and neutral reaction of the medium, low and medium degree of salinity of chloride-sulfate-sodium and chloride-magnesium-sodium types. Diatoms were represented by 35 species belonging to pennates. The Gomphonema genera (seven taxa) and Nitzschia (five taxa) predominated. According to the morphological and chemical parameters studied, it was concluded that the primary soil formation in the Kulin mires occurred on sedimentary rocks of siliceous composition.

Conclusion. In the dynamic extreme conditions of the area of the contemporary geothermal fluid discharge (Baikal rift zone, Kulin marshes), peculiar "mineral" mires with subaerial and subaqueous soil-like formations are formed. The study showed the absence of travertine and geyserite deposits, as well as peat formation typical for mire ecosystems. The micromorphology, mineralogical composition and physico-chemical properties showed that the processes of primary soil formation at the site of contemporary geofluid discharge in Kulin mires occurred on diatomaceous silts. Its mineralogical composition is characterized by the predominance of needle-like, tubular and lenticular quartz crystals. Hydrothermal processes in subaqueous soil-like formations with reducing conditions contribute to the formation of oxides with a high content of FeO, SO₃ and sulfide-containing minerals (pyrite, pyrrhotite). Quartz carbonatization and formation of quartz-containing oxides with high CaO and F content occur in subaerial soil-like formations with oxidative conditions, which suggests signs of the "origin" of hydrothermal formation of fluorite mineralization in the initial stage of Cenozoic rifting. Further detailed comprehensive studies are needed to establish diagnostic markers of soil-like formations of "mineral" mires, substantiate their classification position and establish patterns of spatial distribution.

Keywords: primary soil formation; diatomaceous silts; subaquatic conditions; subaerial conditions; diatoms; Baikal Rift Zone.

How to cite: Ubugunova V.I., Ubugunov V.L., Dorofeyuk N.I., Balsanova L.D., Ayushina T.A., Nasatueva Ts.N., Lastochkin E.I. Subaerial and subaqueous soil-like formations of the Kulin Marshes (Barguzinsky-Chivyrkuy Isthmus of the Svyatoy Nos Peninsula). The Journal of Soils and Environment. 2026. 9(3). e358. DOI: [10.31251/pos.v9i3.358](https://doi.org/10.31251/pos.v9i3.358)

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to D.A. Chudaev, Cand. Biol. Sci., Researcher at the Department of Mycology and Algology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, for his assistance in identifying diatoms.

FUNDING

The study was carried out as a part of the state projects of the Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: "Biogeochemical and Agrochemical Properties of Soils in the Baikal Region, Their Carbon Sequestration Potential, Evolution in Areas Influenced by Endogenesis, and Monitoring of Climate and Anthropogenic Transformations" No. 126021217181-4; A.N.

Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences: "Biogeocenology and Ecosystem Evolution" No. FER-2024-0025.

REFERENCES

- Androkhanov V.A., Kulyapina V.D., Kurachev V.M. The soils of technogenic landscapes: genesis and evolution. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2004. 151 p. (in Russian).
- Baikal. Atlas. Moscow: Roskartografiya, 1993. 160 p. (in Russian).
- Balsanova L.D., Badmaev N.B., Naidanov B.B., Balsanov A.V. Properties and diversity of cambisols of the coastal mountains at the east coast of lake Baikal. BSU Bulletin. Biology. Geography. 2022. No. 3. P. 3–13. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2022-3-3-13>
- Balsanova L.D., Naidanov B.B., Balsanov A.V. Morphogenetic features of soils of the Svyatoi Nos peninsula coast (Eastern Cisbaikalia). Eurasian Soil Science. 2024. Vol. 57. No. 5. P. 751–761. <https://doi.org/10.1134/s1064229323603633>
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sklyarov E.V., Skovitina T.M., Tolmacheva E.V., Sklyarova O.A., Prokopov N.S. Geochemical features and fluid conditions of the formation of Late Quaternary geyserites in the Olkhon area and on Olkhon Island (Baikal rift zone). Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 474. No. 2. P. 631–635. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17060083>
- Vodyanitsky Yu.N. Iron compounds and their role in soil protection. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2010. 156 p. (in Russian).
- Vorobyeva L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Moscow University Press, 1998. 272 p. (in Russian).
- Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Chernyanskii S.S., Pikovskii Yu.I., Geptner A.R. Exothermic and endothermic soils of iceland. Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40. No. 6. P. 595–607. <https://doi.org/10.1134/S1064229307060014>
- Geochemical activity of microorganisms in hydrothermal vents of the Baikal Rift Zone / B.B. Namsaraev et al. Novosibirsk: Geo Publ., 2011. 302 p. (in Russian).
- Geochemistry of Lagoon-March and Delta Landscapes of the Caspian Sea region / N.S. Kasimov, M.S. Kasatenkova, A.N. Tkachenko, et al. Moscow: Liga-Vent Publ., 2016. 243 p. (in Russian).
- Golubev V.A. Conduction and convection heat removal in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Geo Publ., 2007. 222 p. (in Russian).
- Goldfarb I.L. The Influence of the Hydrothermal Process on Soil Formation (on the Example of Kamchatka). Abstract of the Dissertation ... Cand. of Geogr. Sci. Moscow, 2005. 25 p. (in Russian).
- Goryachkin S.V. Geography of Extreme Soils and Soil-Like Systems. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022. Vol. 92. No. 3. P. 335–341. <https://doi.org/10.1134/s1019331622030091>
- Goryachkin S.V., Mergelov N.S., Targulian V.O. Extreme pedology: elements of theory and methodological approaches. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 1. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010046>
- Dzyuba A.A. The hydrotherms of the Baikal depression and of the platform regions in the southern part of the Siberian platform. Geografia i prirodnye resursy. 2007. No. 4. P. 49–53. (in Russian).
- Dzyuba A.A., Kulagina N.V., Abidueva T.I., Chernykh A.L. Mineral Lakes of the Barguzinsky-Chivyrkuy Isthmus. Geografia i prirodnye resursy. 2002. No. 2. P. 61–67. (in Russian).
- Dmitriev G.A. The history of sedimentation on the isthmus of the Svyatoy Nos Peninsula. In book: Mesozoic and Cenozoic Lakes of Siberia. Moscow: Nauka Publ., 1968. P. 89–97. (in Russian).
- Dmitriev E.A. Soils and soil-like bodies. Eurasian Soil Science. 1996. Vol. 29. No. 3. P. 275–282.
- The Pearl of Kamchatka: Geyser Valley / V.M. Sugrobov et al. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 108 p. (in Russian).
- Zamana L.V., Solotchin P.A., Sklyarov E.V. Low-temperature geyserite and ephemeral minerals of Mogoyksy thermal spring (Northern Transbaikalia, Baikal Rift Zone). Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 511. No. 1. P. 526–530. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23600615>
- Zippa E.V. Geochemistry of Thermal Waters of Jiangxi Province (China). Abstract of Dissertation ... Cand. Geol-mineral. Sci. Tomsk, 2020. 22 p. (in Russian).
- Zippa E.V., Purgina D.V., Drebot V.V. Chemical composition and geothermal regime of thermal waters of the Baikal folded region (Republic of Buryatia). Advances in Current Natural Sciences. 2022. No. 12. P. 110–115. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.379585>

- Soil classification and diagnostic of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Krasilnikov P.V., Shoba S.A. Sulfate-Acid Soils of Eastern Fennoscandia. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the RAS, 1997. 160 p. (in Russian).
- Kovda V.A. Fundamentals of the doctrine of soils: in 2 books / USSR Academy of Sciences. Scientific. council on problems of Soil Science and soil reclamation. Moscow: Nauka Publ., 1973. 468 p. (in Russian).
- Kostyuk D.N., Gennadiev A.N. Soils and the soil cover of the valley of geysers. Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. No. 6. P. 529–539. <https://doi.org/10.1134/S1064229314060040>
- Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V. Classification Features and Peculiarities of Opal-Cristobalite Opoka-like Rocks as Raw Materials for Wall Ceramics. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). 2022. No. 4. P. 25–30. (in Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30>
- Likhoshvay E.V., Pomazkina G.V., Kostjukovskaja A.O., Sergeeva V.N., Levina O.V. Distribution of diatoms in the upper layer of the bottom sediments of lake Baikal. Geologiya i Geofizika. 2005. Vol. 46. No. 1. P. 34–49. (in Russian).
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Neveldrova N.N. Rift Basins of the Baikal Region: Tectonic Structure and Development History. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, 2009. 312 p. (in Russian).
- Mergelov N.S., Dolgikh A.V., Zazovskaya E.P., Konyushkov D.E., Lupachev A.V., Fedorov-Davydov D.G., Goryachkin S.V. Soils and Soil-like Bodies of Oases and Nunataks in Eastern Antarctica. Voprosy Geografii. 2016. No. 142. P. 593–628. (in Russian).
- Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Belousov P.E., Krupskaya V.V. Sorption of radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{233}U on various natural sorbents. Radiohimia. 2021. Vol. 63. No. 6. P. 510–517. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0033831121060022>
- Namsaraev B.B., Khakhinov V.V., Turunkhaev A.V. Swamp Ecosystems of the Isthmus of the Svyatoy Nos Peninsula. Geografia i prirodnye resursy. 2009. No. 4. P. 66–71. (in Russian).
- Nikitin D.A., Semenov M.V. Subaquatic Soils of Antarctica: Formation Conditions and Prospects for Microbiological Research. Dokuchaev Soil Bulletin. 2020. No. 102. P. 48–69. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-49-69>
- Parfenova E.I., Yarilova E.A. Guide to micromorphological studies in soil science. Moscow: Nauka Publ., 1977. 197 p. (in Russian).
- Peryazeva E.G., Plyusnin A.M., Garmayeva S.Z., Budaev R.Ts., Zhambalova D.I. Features of the formation of chemical composition of lake waters along the eastern shores Baikal. Geografia i prirodnye resursy. 2016. No. 5. P. 49–59. (in Russian). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59))
- Petrov V.V., Yakovlev D.V. Geochemical features of natural waters in the Central Eco-Zone of the Baikal nature reserve. Regional Geology and Metallogeny. 2023. No. 95. P. 42–53. (in Russian). https://doi.org/10.52349/0869-7892_2023_95_42-53
- Petrovich P.I. Lowland peat soils of Buryatia. Ulan-Ude: Bur. publishing house, 1974. 139 p. (in Russian).
- Plyusnin A.M., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Peryazeva E.G., Angakhaeva N.A. Factors and processes of salt lake formation on Baikal shore. Water Resources. 2021. Vol. 48. No. 2. P. 273–284. <https://doi.org/10.1134/S0097807821020093>
- Field Guide to the Soils of Russia. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
- Soils of the Selenga River delta (Genesis, geography, geochemistry) / A.B. Gininova et al. Ulan-Ude: Publishing house of BSC SB RAS, 2012. 344 p. (in Russian).
- Soils of the Barguzin Basin / T.I. Azmuka, V.K. Bakhnov, V.I. Volkovintser et al. Novosibirsk: Nauka Publ, 1983. 270 p. (in Russian).
- Sklyarov E.V., Kulagina N.V., Skovitina T.M., Fedorovskii V.S., Sklyarova O.A. The late quaternary "Geyser Valley" in the western flank of the Baikal rift (Ol'khon Region). Doklady Earth Sciences. 2004. Vol. 395. No. 3. P. 324–327.
- Targulyan V.O., Mergelov N.S., Goryachkin S.V. Soil-like bodies on Mars. Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50. No. 2. P. 185–197. <https://doi.org/10.1134/S1064229317020120>
- Territorial organization of the Trans-Baikal National Park / A.D. Abalakov, E.D. Ovdin, L.S. Novikova, et al.; resp. ed. V.M. Plyusnin. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Geography of the SB RAS, 2002. 125 p. (in Russian).
- Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Tsyrempilov E.G. Soils and Landforms of the Barguzin Basin. Ulan-Ude: Publishing house of the BSC SB RAS, 2016. 212 p. (in Russian).

- Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Rupyshev Yu.A., Khitrov N.B. Soil and vegetable cover of marshes and marshy depressions in the area of thermal fields influence in Barguzin rift. *Nature of Inner Asia*. 2019. No. 3(12). P. 37–53. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-3-37-53>
- Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Khitrov N.B., Yamnova I.A., Lebedeva M.P., Nasatueva Ts.N. Soil-like formations of the Baikal rift zone diapir structures. *Nature of Inner Asia*. No. 2023. 1(23). P. 79–97. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2023-1-79-97>
- Ubugunov V.L., Yamnova I.A., Ubugunova V.I., Khitrov N.B., Lebedeva M.P. Soil organic matter of the Kuchiger thermal field (Barguzin Basin, Transbaikalia): forms and intra-profile distribution. *Nature of Inner Asia*. 2025. No. 2(31). P. 61–78. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2025-2-61-78>
- Fridland V.M. Problems of Geography, Genesis and Classification of Soils. Moscow: Nauka Publ., 1986. 243 p. (in Russian).
- Khakhinov V.V., Namsaraev B.B., Buryukhaev S.P., Dorzhieva G.S-S. Hydrochemical and microbiological characteristics of bog ecosystems on the Isthmus of Svyatoy Nos Peninsula (Lake Baikal). *Geography and Natural Resources*. 2012. Vol. 33. No. 4. P. 298–303. <https://doi.org/10.1134/S1875372812040075>
- Khitrov N.B., Ponizovsky A.A. Manual on Laboratory Methods for Studying the Ionic and Saline Composition of Neutral and Alkaline Mineral Soils. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1990. 236 p. (in Russian).
- Khitrov N.B., Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Rupyshev Yu.A., Ayushina T.A., Zhambalova A.D., Tsyrempilov E.G., Paramonova A.E., Nasatueva T.N. Gas-hydrothermal turbation of soils as a factor of microhighs forming. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 2. P. 137–154. <https://doi.org/10.1134/S1064229320020064>
- Cherkashina A.A., Golubtsov V.A. Structure of the soil cover in the Tunkinskaya Basin. *Geografia i prirodnye resursy*. 2016. No. 3. P. 130–140. (in Russian). [https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2016-3\(130-140\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(130-140))
- Dolgikh A.V., Mergelov N.S., Abramov A.A., Lupachev A.V., Goryachkin S.V. Soils of enderby land. In book: *The soils of antarctica*. New York: Springer Verlag, 2015. P. 45–64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_4
- Flowver R.J., Ruves D.B. Diatom preservation: differential preservation of sedimentary Diatoms in two saline lakes. *Acta Botanica Croatica*. 2009. No. 68(2). P. 381–399.
- Hewitt A.E. New Zealand soil classification. DSIR Land Land Resources Scientific Report. 1992. No. 19. P. 133.
- Houghton B.F., Scott B.J. Geyserland: a guide to the volcanoes and geothermal areas of Rotorua. Guidebook 13. Lower Hutt: Geological Society of New Zealand, 2002. 48 p.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating ledends for soil maps. World Soil Resources Reports No 106. FAQ, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- Pawlowski J., Bruce K., Panksep K., Aguirre F.I., Amalfitano S., Apothéoz-Perret-Gentil L., Baussant T., Bouchez A., Carugati L., Cermakova K., Cordier T., Corinaldesi C., Costa F.O., Danovaro R., Dell'Anno A., Duarte S., Eisendle U., Ferrari B.J.D., Frontalini F., Frühe L., Haegerbaeumer A., Kisand V., Krolicka A., Lanzén A., Leese F., Lejzerowicz F., Lyautey E., Maček I., Sagova-Marečková M., Pearman J.K., Pochon X., Stoeck T., Vivien R., Weigand A., Fazi S. Environmental DNA metabarcoding for benthic monitoring: A review of sediment sampling and DNA extraction methods. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 818. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151783>
- Renaut R.W., Owen R.B., Jones B., Tiercelin J.-J., Ego J.K., Konhauser K.O. Impact of lake-level changes on the formation of thermogene travertine in continental rifts: Evidence from Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. *Sedimentology*. 2013. Vol. 60(2). P. 428–468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01347.x>
- Rodman J.E., Karol K.G., Price R.A., Sytsma K.J. Molecules, morphology and dahlgren's expanded order Capparales. *Sistematic Botany*. 1996. Vol. 21(3). P. 289–307. <https://doi.org/10.2307/2419660>
- Scott B. The Geysers of Yellowstone, Fourth Edition. Boulder, CO: University Press of Colorado, 2008. 456 p. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1d8h97t>

Received 13 March 2026

Accepted 14 April 2026

Published 03 July 2026

About the authors:

Vera I. Ubugunova – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); ubugunova57@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1399-8283>

Vasily L. Ubugunov – Candidate of Biological Science, Deputy Director of the Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); ubugunovv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7899-1906>

Nadezhda I. Dorofeyuk – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Arid Territory Ecology, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); nadin-home@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6953-8384>

Larisa D. Balsanova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Geography and Ecology, Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); balsanova@mail.ru; эл. адрес; <https://orcid.org/0000-0002-1805-2613>

Tuyana A. Ayushina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); tuyana2602@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7187-0481>

Tsympilma N. Nasatueva – Junior Researcher in the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); tsympilmann@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6794-2872>

Evgeny I. Lastochkin – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher in the Petrology Laboratory, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); gin-buryatia-07@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-0919>

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/)