

Почвенно-растительный покров и микробиоморфная оценка экосистем прибрежных понижений высокоминерализованных бессточных пульсирующих озер Даурии (Юго-Восточное Забайкалье)

В. И. УБУГУНОВА¹, Л. Л. УБУГУНОВ^{1, 2}, А. С. СЫРЕНЖАПОВА², Е. Ю. АБИДУЕВА¹,
Т. А. АЮШИНА¹, А. Д. ЖАМБАЛОВА¹, Т. Е. ТКАЧУК^{3, 4}

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

²ФГБОУ ВО Бурятская государственная сельскохозяйственная
академия им. В. Р. Филиппова
670010, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8
E-mail: arunass_70@mail.ru

³ГОУ ВПО Забайкальский государственный университет
672014, Чита, ул. Александро-Заводская, 30
E-mail: tetkachuk@yandex.ru

⁴ФГБУ Государственный природный биосферный заповедник “Даурский”
674480, Нижний Цасучей, ул. Комсомольская, 76
E-mail: tetkachuk@yandex.ru

Статья поступила 22.05.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к печати 20.07.2023

АННОТАЦИЯ

Впервые проведены комплексные исследования почв, растительного покрова и микробиоты прибрежных понижений высокоминерализованных бессточных хлоридных озер Юго-Восточного Забайкалья (Даурия, оз. Бабье). Выявлено, что формирование приозерных экосистем степной зоны связано с циклическими изменениями уровня озер и происходящей при этом смене химического состава. Определенное влияние оказывает эоловый фактор. Исследованы динамические свойства и вещественный состав почв супераквально-субаквальных, супераквальных и элювиально-супераквальных позиций, выявлено проявление на них современного континентального засоления различного химизма и гидрогенного окарбоначивания. Изучение пространственной структуры фитоценозов и их видового состава в зависимости от их рельефного расположения в приозерных понижениях, почвенных условий и галогенеза показало приуроченность пионерных гипергалофитных и галофитных сообществ к солончакам квазиглеевым. На супераквальной части приозерного понижения произрастают растительные сообщества с преобладанием

галофитов и мезофитов с участием гликоолигогалофитов и мезоксерофитов. На светлогумусовых почвах сформирована ковыльно-разнотравно-вострецовая (*Leymus chinensis*, *Artemisia frifida*, *Bupleurum bicaule*, *Stipa krylovi*) степь с участием мезофитов и ксерофитов, близкая по составу к зональным степям. Установлено, что в динамически эволюционирующих приозерных почвах в зависимости от абиотических факторов формируются различные микробиоморфные комплексы. Высокоминерализованные хлоридные озерные воды способствуют образованию близких микробных сообществ в донных осадках оз. Бабье и сильнозасоленных горизонтах солончака квазиглеевого. При этом во всех почвенных образцах обнаружена большая доля неклассифицируемых прокариот. Этот важный неизученный микробный компонент представлен на уровне домена Bacteria в солончаках (до 22 %), гумусово-квазиглеевой засоленной (до 15 %) и светлогумусовой засоленной (до 16 %) почвах. Структура микробиома в гумусово-квазиглеевой почве характеризуется присутствием галобактерий и кренархеот. В светлогумусовой засоленной почве установлена значительная доля таксонов, участвующих в круговоротах углерода и азота и играющих важную роль в глобальных биогеохимических циклах. Также в этом типе почв выявлено отсутствие галобактерий, что связано с незначительным содержанием легкорастворимых солей в гумусовом и переходном горизонтах.

Ключевые слова: Юго-Восточное Забайкалье, высокоминерализованные хлоридные озера, приозерные экосистемы, почвы, засоление, растительность, микробиоморфные комплексы.

ВВЕДЕНИЕ

Педосфера является активной зоной геосферно-биосферных взаимодействий и выполняет важнейшие экологические функции как местообитание животного, растительного и микробного мира [Zhao et al., 2018; Zhang et al., 2019; Эволюция..., 2020]. Галоморфные же почвы представляют собой своеобразные природные образования, в которых высокие концентрации солей и недостаток влаги создают экстремальные условия для существования живых организмов: снижение интенсивности биологического круговорота и низкое таксономическое разнообразие многих групп живых организмов [Гришко и др., 2015; de León-Lorenzana et al., 2018]. В то же время засоленные почвы являются, как правило, оптимальным местообитанием галофильных и алкалолотерантных видов микробных сообществ, водорослей [Звягинцева, 1989; Лысак и др., 1994; Штина и др., 1998; Заварзин и др., 1999; Зенова и др., 2007; Норовсурэн и др., 2007; Navarro-Noya et al., 2015; Zhao et al., 2018; Zhang et al., 2019].

Одним из обширных районов локализации современных процессов засоления является трансграничная территория России, Монголии и Китая, где отмечается высокая плотность многочисленных солоноватых и соленых озер различного химического состава и разной степени минерализации [Скляров и др., 2011; Borzenko, Shvartsev, 2019; Kashnitskaya, Bolgov, 2021]. Эти озерные водоемы и прибрежные территории являются местом локализации многотысячных гнездовых колоний местных и перелетных птиц. В настоящее время изучены гидрологические особен-

ности некоторых из этих озер [Цыбекмитова, 2018; Борзенко, 2022], разнообразие орнитофауны [Горошко, 2011], мелких млекопитающих [Баженов, 2019], водорослей [Афони-на, Ташлыкова, 2019; Bazarova et al., 2019], почвенных беспозвоночных [Мордкович, 1973; Мордкович, Любеченский, 2017], наземной растительности [Ткачук, Жукова, 2013], состав микробных матов, донных осадков, численность различных физиологических групп бактерий-деструкторов органического вещества и скорость микробных процессов [Сыренжапова, 2004; Абидуева и др., 2006; Солоноватые и соленые озера..., 2009; Цыренова, 2009; Namsaraev et al., 2015]. Исследований по почвенному покрову данной территории проведено недостаточно и только по свойствам приозерных почв, характеризующихся содовым или близким к содовому засолениями [Титлянова, Мордкович, 1970; Хадеева, 2021]. По почвенно-растительному покрову, микробиоте и другим компонентам экосистем, формирующимся в ландшафтах, прилегающих к озерам с хлоридным засолением, исследований в научной литературе нами не обнаружено.

Целью настоящей работы явилось комплексное изучение почв, растительного покрова и таксономического разнообразия микробных сообществ прибрежных экосистем пульсирующих высокоминерализованных хлоридных бессточных озер Даурии (Юго-Восточного Забайкалья).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования явились прибрежные экосистемы высокоминерализованного

хлоридного оз. Бабье (Россия, Юго-Восточное Забайкалье, 50.296291 с. ш., 116.379090 в. д.), расположенного в пределах Восточно-Монгольской платформы. Котловина озера расположена между разнородными и разновозрастными террейнами [Парфенов и др., 1999], породы которых включают осадочные и вулканогенно-осадочные образования окраинных морей, формировавшихся на различных этапах и при неодинаковых геодинамических режимах по периферии Сибирского континента [Государственная геологическая карта..., 2010]. К основным чертам климата относятся: резкая континентальность, отрицательные среднегодовые температуры, недостаточная увлажненность, неравномерное выпадение атмосферных осадков по сезонам, влияние тихоокеанских муссонов [Климатический справочник СССР, 1958]. Очень важной особенностью является выраженная цикличность количества выпадающих осадков с периодом около 30 лет, которая оказывает влияние на уровень водности озер [Обязов, 1999; Кашницкая, 2021].

По ботанико-географическому районированию изученная территория относится к Монгольской степной провинции Центральноазиатской степной подобласти Евразии с преобладанием крыловоковыльных степей [Лавренко, 1970]. Основной чертой пространственной структуры растительности приозерных экосистем является наличие поясов, слагающих пространственную серию. В центре соленакопления формируются пионерные гипергалофитные сообщества из *Suaeda corniculata* и *Kochia angustifolia*, далее, в зависимости от увлажнения и засоленности, – бескильничевые луга, ползучеосоковые, ячменные, разнотравные сообщества, вострецовые луга и степи, сазовые степи из *Achnatherum splendens*. Особенностью озер Онон-Борзинской группы Юго-Восточного Забайкалья является чередование циклов иссушения и наполнения. В засушливую фазу отмечается возрастание площади галофитных лугов и пионерной галофитной растительности с доминированием однолетних маревых [Дулепова, 2010; Ткачук, Жукова, 2013; Tkachuk et al., 2014].

Озеро Бабье представляет собой бессточный водоем с изменяющейся площадью (от 0,35 до 1,3 км²). Дно озера выстлано черно-серым илом, глубже находится рых-

лый пласт мирабилита. Грязи обладают лечебными свойствами и широко используются местным населением для лечения. Озеро относится к Онон-Борзинской группе высокоминерализованных соленых озер хлоридного типа вод. Состав воды озера в аридную и гумидную фазы различен по степени минерализации, рН, химизму [Борзенко, 2022]. В сухой период увеличиваются соленость вод ($M = 85$ г/л), щелочность (рН 8,9), Cl^- и SO_4^{2-} . В гумидную фазу минерализация воды низкая ($M = 1,6-6,6$ г/л), снижаются значения рН (8,1), увеличивается доля карбонатов (до 50 % от суммы анионов). При таком метаморфизме вод изменяется и тип химизма.

При комплексном изучении приозерных экосистем выбраны три ключевых участка. Они расположены на супераквально-субаквальных, супераквальных и элювиально-супераквальных позициях. На них проведено геоботаническое описание растительных сообществ, заложено три опорных и девять вспомогательных почвенных разрезов, отобраны пробы на изучение почвенной микробиоты. Также изучался состав озерных и почвенных вод.

Названия почв даны в соответствии с Классификацией почв России [Классификация..., 2004; Полевой определитель..., 2008; IUSS..., 2015]. $pH_{водн}$ измеряли на иономере Эко-тест-120, определение органического углерода – методом мокрого сжигания по Тюрину, содержание карбонатов – газоволюметрически, гранулометрический состав – методом Качинского, определение обменных катионов – по Пфефферу [Руководство..., 1990], содержание и состав легкорастворимых солей – из водной вытяжки 1 : 5 [Воробьева, 1998], расчет гипотетических солей – по [Базилевич, Панкова, 1968]. Дополнительно использовались расчетные параметры динамического фактора (F), характеризующего условия осадконакопления [Казанский и др., 2018].

Геоботанические описания выполняли по общепринятым методикам [Полевая геоботаника, 1964; Ярошенко, 1969]. Отнесение растений к экологическим группам по факторам влажности и засоленности давали в соответствии с работами [Королук, 2006; Клещева, 2010; Найданов и др., 2010].

Для микробиологических исследований пробы образцов отбирали в стерильную по-

суду и доставляли в лабораторию при хранении на льду. Для выделения ДНК использован набор реактивов NucleoSpin Soil (Macherey-Nagel, Германия) согласно инструкции производителя. ПЦР продукты очищали по рекомендованной фирмой Illumina методике с использованием магнитных частиц AMPureXP (BeckmanCoulter, США). Разнообразие микробного сообщества изучали методом высокопроизводительного секвенирования гена *16S рРНК* с использованием платформы Illumina MiSeq. Исследование проводилось с использованием оборудования ЦКП “Геномные технологии, протеомика и клеточная биология” ФГБУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии. Для характеристики разнообразия сообществ использовали индекс Шеннона–Уинера (Shannon–Wiener) [Шитиков и др., 2005]. Кластерный анализ микробного сообщества выполняли в программе Statistics-6.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый модельный полигон (Б-1) расположен на наиболее динамичном циклическом супераквально-субаквальном участке приозерного понижения. Прибрежная часть (от 2 до 5 м) практически лишена растительности, встречаются только пионерные группировки *Suaeda corniculata*. Примесь других видов очень незначительна и составляет не более 1 % от проективного покрытия. Выше по трансекту на первом береговом вале растительные группировки становятся более мно-

говидовыми и переходят в разнотравно-сведовые сообщества, представляющие собой галофитные луга. Разрез Б-1 заложен в сосну-реево-сведовом (*Suaeda corniculata*, *Saussurea amara*) сообществе, для которого характерны низкое проективное покрытие (17 %) и маловидовой (9 %) состав. Семь видов являются типичными галофитами, *Saussurea amara* – эвригалинный вид, *Phragmites australis* – индифферентный к засолению верхних горизонтов вид (рис. 1, а). По отношению к влажности почти все виды этого сообщества относятся к мезофитам, за исключением тростника, который имеет широкую экологическую амплитуду: в многоводные годы он занимает экологическую нишу гидрофита, в засушливые – фреатофита (рис. 1, б).

Морфологический профиль почв резко дифференцирован и имеет следующую систему генетических горизонтов: Sq–Cs–CQs. Водный режим этих почв неустойчив. В период исследований (июль, 2022) стояние грунтовых вод было на глубине 80 см, с 60 см сочилась вода. Верхняя толща (0–60 см) имела оптимальное увлажнение. По системе генетических горизонтов этот тип почвы относится к солончакам квазиглеевым (Gleyic Solonchaks Aridic) [Классификация..., 2004; Полевой определитель..., 2008; IUSS..., 2015].

В изученных почвах отмечается чередование тяжелосуглинистого (0–5 см), супесчаного (5–20(22) см) и среднесуглинистого (30–80 см) слоев (табл. 1). Такой состав характеризует различные этапы седиментогенеза: верхний 0–5 см и 30–80 см слои соответствуют

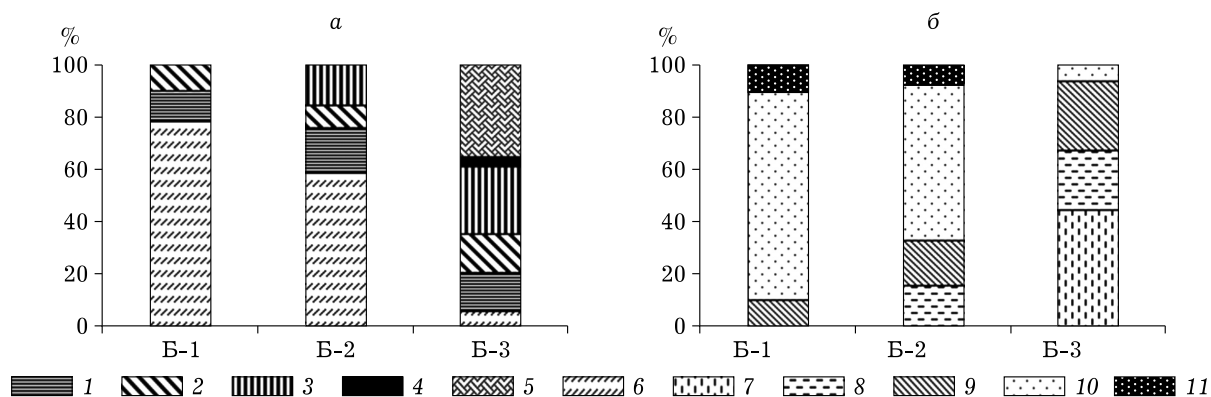


Рис. 1. Экологические спектры растительных сообществ по отношению: а) к засолению почвы (1 – индифферентный; 2 – олигогалофит; 3 – гликоолигогалофит; 4 – олигогалогликофит; 5 – гликофит; 6 – галофит); б) к влажности почвы (7 – ксерофит; 8 – мезоксерофит; 9 – ксеромезофит; 10 – мезофит; 11 – гидрофит/фреатофит)

Т а б л и ц а 1
Физико-химические свойства приозерных почв оз. Бабье

Горизонт	Глубина, см	рН	СО ₂	Гумус	<0,001 мм	Подвижные формы (по Мачигину)	
						P ₂ O ₅	K ₂ O
						%	мг/100 г
Солончак квазиглеевый (разр. Б-1)							
Sq	0–5	8,4	8,35	4,84	54	6,66	74,71
Cs	5–20 (22)	8,8	2,34	0,48	14	0,18	15,42
CQs	20 (22)–30	8,5	7,80	0,64	37	0,14	20,96
	30–80	8,2	9,38	0,45	41	0,93	17,83
Гумусово-квазиглеевая засоленная почва (разр. Б-2)							
AJs	0–15 (18)	8,6	1,87	1,22	14	0,18	19,52
ACs	15 (18)–34 (39)	9,7	1,59	0,29	15	1,20	15,66
CQs	34 (39)–65	9,6	6,0	0,42	31	0,66	16,87
Светлогумусовая засоленная почва (разр. Б-3)							
AJ	0–33 (39)	7,5	0,47	1,27	13	0,22	12,05
ACs	33 (39)–44 (47)	9,4	0,65	0,91	20	0,66	12,05
Cs	4 4(47)–60	9,2	1,31	0,67	31	0,66	13,73

озерным условиям осадконакопления ($F \leq 1$) с тонкоколлоидальной глинистой компонентой, а супесчаная толща ($F \geq 3$) с более крупными коллоидально-илистыми частицами отражает возрастание роли эоловых процессов при аридизации климата и сокращении площадей озер [Баженова, Черкашина, 2018].

Формирование тяжелосуглинистого слоя 0–5 см, вероятнее всего, происходит под воздействием соленых вод озера, выходящих на поверхность при периодическом влиянии озерных заплесков, супесчаный слой – результат аридной фазы почвообразования с преобладанием эоловой составляющей, нижний слой – озерные отложения.

Отмечается бурное вскипание от HCl по всему почвенному профилю. Максимальное количество карбонатов отмечается в горизонте Sq (испарительная концентрация) и озерных отложениях (водородная аккумуляция). Значения рН соответствуют щелочным и сильнощелочным значениям (см. табл. 1). Емкость катионного обмена (ЕКО) изменяется от 12,8 до 27,5 смоль(экв)/кг почвы. В солончаковом горизонте значения этого показателя максимальные, а в песчаных слоях – минимальные. В составе обменных катионов преобладают об-

менный натрий (44–68 % от ЕКО) и обменный магний (рис. 2).

Солончаковый горизонт обогащен $C_{\text{орг}}$ (2,80 %). Так как на данном участке высшая растительность представлена только монодоминантными сообществами галофитов с низким проективным покрытием, то доминирующим источником органического вещества, вероятнее всего, являются цианобактериальные маты [Абидуева и др., 2006]. С глубины 5 см содержание гумуса резко падает и составляет 0,45–0,64 %. Обеспеченность подвижными фосфором и калием низкая (см. табл. 1).

Почвы сильно и очень сильно засолены (табл. 2). Максимальное количество легкорастворимых солей сосредоточено в верхнем горизонте. Прослеживается однотипность состава вод в озере и в солончаках. Тип химизма квазиглеевого солончака – хлоридный. Содержание Cl^- в верхнем горизонте высокое. Глубже концентрация легкорастворимых солей уменьшается, но при этом доля хлора (74–77 %) остается высокой, отмечается увеличение сульфатов. Отношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ в изученных солончаках высокое (4,8–9,6). В составе катионов преобладает натрий. Количество Ca^{+2} низкое. Отмечаются

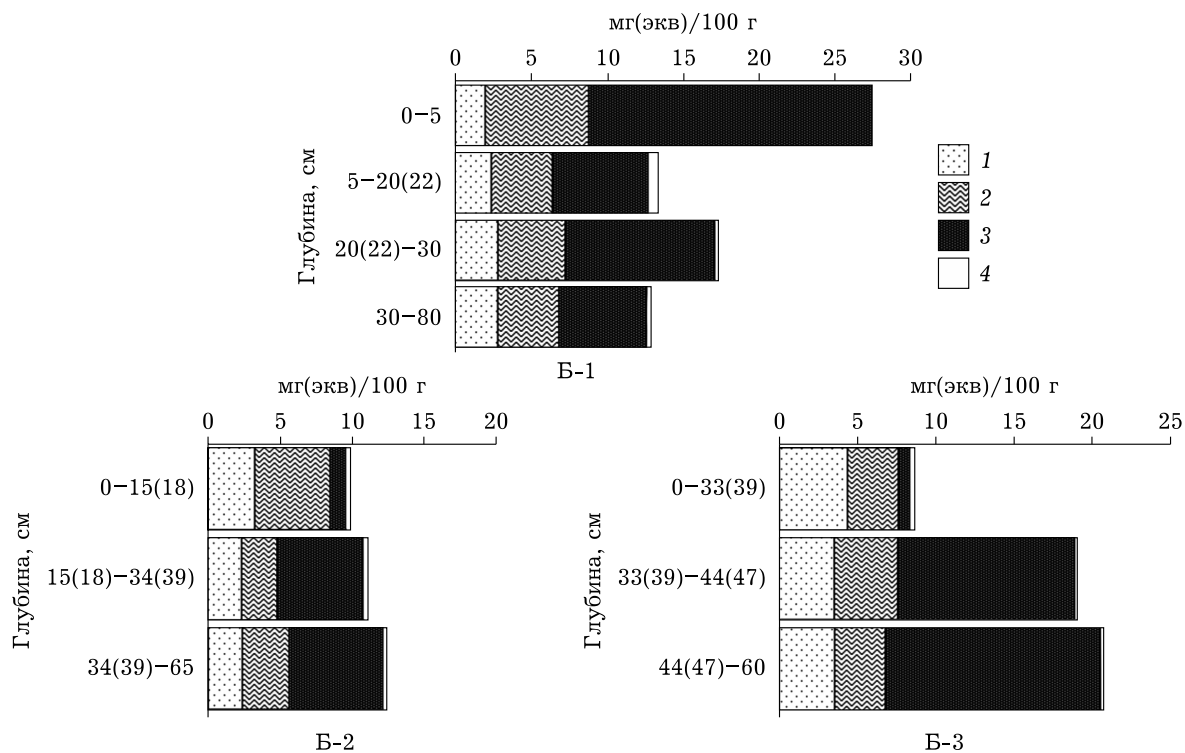


Рис. 2. Содержание обменных катионов в почвах (по Пфефферу): 1 – обменный кальций, 2 – обменный магний, 3 – обменный натрий, 4 – обменный калий

Т а б л и ц а 2
Водная вытяжка приозерных почв оз. Бабье

Слой, см	Сумма солей, %	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻
		смоль(экв)/кг почвы								
Солончак квазиглеевый (разр. Б-1)										
0–5	2,680	0,32	1,16	39,72	4,13	0,70	2,10	42,30	0,23	9,62
5–20 (22)	0,761	0,36	0,94	8,64	2,63	0,45	0,30	11,37	0,03	3,29
20 (22)–30	0,643	0,36	0,90	7,90	1,46	0,45	0,20	9,95	0,02	5,41
30–80	0,495	0,16	0,68	6,02	1,25	0,40	0,25	7,44	0,02	4,82
Гумусово-квазиглеевая засоленная почва (разр. Б-2)										
0–15 (18)	0,103	0,16	0,68	0,68	0,06	0,30	0,15	1,08	0,05	11,33
15 (18)–34 (39)	0,340	1,36	3,04	0,72	0,25	0,60	0,50	4,17	0,10	2,88
34 (39)–65	0,212	0,64	1,60	0,84	0,25	0,30	0,35	2,59	0,09	3,36
Светлогумусовая засоленная почва (разр. Б-3)										
0–33 (39)	0,059	0,00	0,24	0,64	0,05	0,25	0,10	0,57	0,01	16
33 (39)–44 (47)	0,298	1,20	2,12	0,92	0,59	0,60	0,15	4,03	0,05	1,56
44 (47)–60	0,418	1,60	2,56	1,44	1,22	0,60	0,20	6,00	0,02	1,18

небольшие значения щелочности, обусловленные карбонатами.

Расчет гипотетических солей показал, что новообразования легкорастворимых солей в хлоридном солончаке представлены в основном галитом, значительно меньше накапливается мирабилит (табл. 3). Гипсовая стадия минералообразования, несмотря на высокую соленость озера и высокое содержание сульфатов в воде, не наступает, что связано с мобилизацией кальция карбонатными минералами. В составе карбонатов преобладает $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Сильное засоление токсичными ионами создает экстремальные условия для функционирования микробиоты. В изученных солончаках выявлено изменение последовательностей ампликонов (ASVs) от 93 до 270 (табл. 4). Наибольшие значения этого показателя встречаются в донных отложениях (220) и солончаковом горизонте (270). Микробные сообщества всех образцов были достаточно разнообразными, индекс Шеннона – Уинера варьировал от 1,6 до 3,4. Максимальный индекс характерен для донных осадков и сильнозасоленного слоя 0–20 (22) см, наименьший – для нижнего горизонта (30–80 см).

Микробное сообщество солончакового горизонта представлено 18 филотипами (72 %), доминирующими являются *Bacteroidota*, *Actinobacteriota*, *Gammaproteobacteria*, *Archaea* и *Alphaproteobacteria* (рис. 3). С глубиной отмечается снижение разнообразия прокариотного сообщества (12–15 филумов) и резкое доминирование *Gammaproteobacteria*. В слое 5–20 (22) см наряду с его увеличением (28 %) высока доля *Alphaproteobacteria* (19 %), *Archaea* (16 %) и *Actinobacteriota* (11 %). В озерных отложениях на глубине 20 (22)–30 см при преобладании *Gammaproteobacteria* (69 %) встречается *Firmicutes* (13 %). В обводненной среде (30–80 см) 94 % приходится на три филотипа: *Gammaproteobacteria* (53 %), *Alphaproteobacteria* (24 %) и *Actinobacteriota* (17 %). В микробных сообществах донных осадков оз. Бабье и в верхних горизонтах солончака (Sq, ca, Cca, s) доминировали галофильные бактерии рода *Halomonas*. В переувлажненном слое 20 (22)–30 см и сильно обводненном из-за близкого стояния озерных вод слое 30–80 см доминировали γ -протеобактерии родов *Photobacterium*, *Marinobacterium*, *Pseudomonas*, *Marinobacter*, *Methylophaga*, *Halomonas*, *Acinetobacter*.

Т а б л и ц а 3

Состав солей приозерных почв в пересчете на гипотетические соли

Глубина, см	Na_2CO_3	NaHCO_3	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Na_2SO_4	NaCl	MgCl_2	KCl
смоль(экв)/кг почвы								
Солончак квазиглеевый (разр. Б-1)								
0–5	0,64	–	0,60	1,40	8,26	62,70	0,46	0,46
5–20 (22)	0,72	–	0,61	0,90	5,26	16,76	–	0,06
20 (22)–30	0,72	0,14	0,40	0,90	2,92	12,74	–	0,04
30–80	0,32	–	0,40	0,80	2,50	10,0	0,10	0,04
Гумусово-квазиглеевая засоленная почва (разр. Б-2)								
0–15 (18)	0,32	0,30	0,30	0,60	0,12	1,36	–	–
15 (18)–34 (39)	2,72	1,40	1,0	1,20	0,50	0,52	–	0,20
34 (39)–65	1,28	1,26	0,70	0,60	0,50	1,68	–	–
Светлогумусовая засоленная почва (разр. Б-3)								
0–33 (39)	–	–	–	0,48	0,10	1,04	0,20	0,02
33 (39)–44 (47)	2,40	1,54	0,30	1,20	1,18	0,22	–	–
44 (47)–60	3,20	1,92	0,40	1,20	2,44	2,88	–	–

П р и м е ч а н и е. Прочерк – не обнаружено.

Индексы разнообразия микробного сообщества в прибрежных почвах и донных осадках высокоминерализованного оз. Бабье

Объект	Горизонт	Глубина, см	Количество классифицированных последовательностей, %	ASVs	Индекс разнообразия Шеннона – Уинера
Озеро, донные осадки		0–5	12860 / 66,5	220	3,1
Солончак квазиглеевый (Б-1)	Sq	0–5	8491 / 48,4	270	3,4
	Cs	5–20 (22)	5998 / 37,3	175	2,9
	CQs	20 (22)–30	11584 / 66,4	117	1,6
		30–80	10532 / 73,6	93	1,8
Гумусово-квазиглеевая засоленная почва (Б-2)	AJs	0–15 (18)	8828 / 45,3	239	3,1
	ACs	15 (18)–34 (39)	7542 / 52,6	157	2,4
	CQs	34 (39)–65	6567 / 38,3	142	2,4
Светлогумусовая засоленная почва (Б-3)	AJ	0–33 (39)	4299 / 77,3	75	2,7
	ACs	33 (39)–44 (47)	4702 / 27,2	131	3,0
	Cs	44 (47)–60	6757 / 41,2	154	2,8

Содержание *Gamma*proteobacteria изменялось в солончаках от 16 до 69 %. В сильнозасоленных горизонтах (Sq, Cs) доминировали галофильные бактерии рода *Halomonas*. Класс *Alphaproteobacteria* был обнаружен во всех изученных пробах (8–24 %). Последовательности в основном соотносились с порядками *Rhodobacterales*, *Rhizobiales*, *Sphingomonadales*. В филуме *Bacteroidota* преобладали представители классов *Bacteroidia* и *Rhodothermia*, последние из которых являются экстремофилами в отношении соли, pH, температуры [Physiology..., 2017]. Филум *Actinobacteriota* обнаружен во всех горизонтах солончака и таксономически отнесен к классам *Actinobacteria* и *Acidimicrobiia*. Класс *Acidimicrobiia* соотносен к неклассифицированным представителям семейства *Plumatobacteraceae*. Некоторые виды этой группы являются ацидофилами. Филум *Firmicutes* во всех горизонтах представлен в основном двумя классами – *Clostridia* и *Bacilli*, с большой долей некультивируемых бактерий.

В сильнозасоленных слоях изученной почвы (Sq, Cs) археи представлены двумя филумами: *Halobacterota* и *Crenarchaeota*, к последнему принадлежат в основном неклассифицированные аммоний-окисляющие археи семейства *Nitrososphaeraceae*. В солончаковом горизонте (Sq) доминирует *Halobacterota*

(67 %), затем зафиксировано его снижение. Отмечается резкая внутривидовая дифференциация и по распределению филума *Crenarchaeota*: в горизонте Sq ее доля составляла 33 %, а в почвообразующих озерных отложениях – 100 %.

Второй модельный полигон (Б-2) расположен на супераквальных позициях приозерного понижения, в 153 м от береговой линии озера. Растительность представлена бескильницево-полынно-ячменевым лугом. Проективное покрытие составляет 35 %, количество видов – 12. Это растительное сообщество имеет мозаичную структуру, в которой отмечается чередование микрогруппировок *Artemisia anethifolia*, *Puccinellia tenuiflora* и *Hordeum brevisubulatum*, что указывает на неравномерность степени засоления в горизонтальном направлении. Растительность носит галофитный характер и представляет собой сложившееся сообщество с доминированием многолетников, очень характерных для растительности сильно засоленных почв Южной Даурии и широко распространенных в этом регионе [Флора Центральной Сибири, 1979; Грубов, 1982; Ткачук, Жукова, 2013; Ткачук, 2021]. В экологических спектрах здесь, как и в первом модельном полигоне, преобладают галофиты и мезофиты, но закономерно увеличена

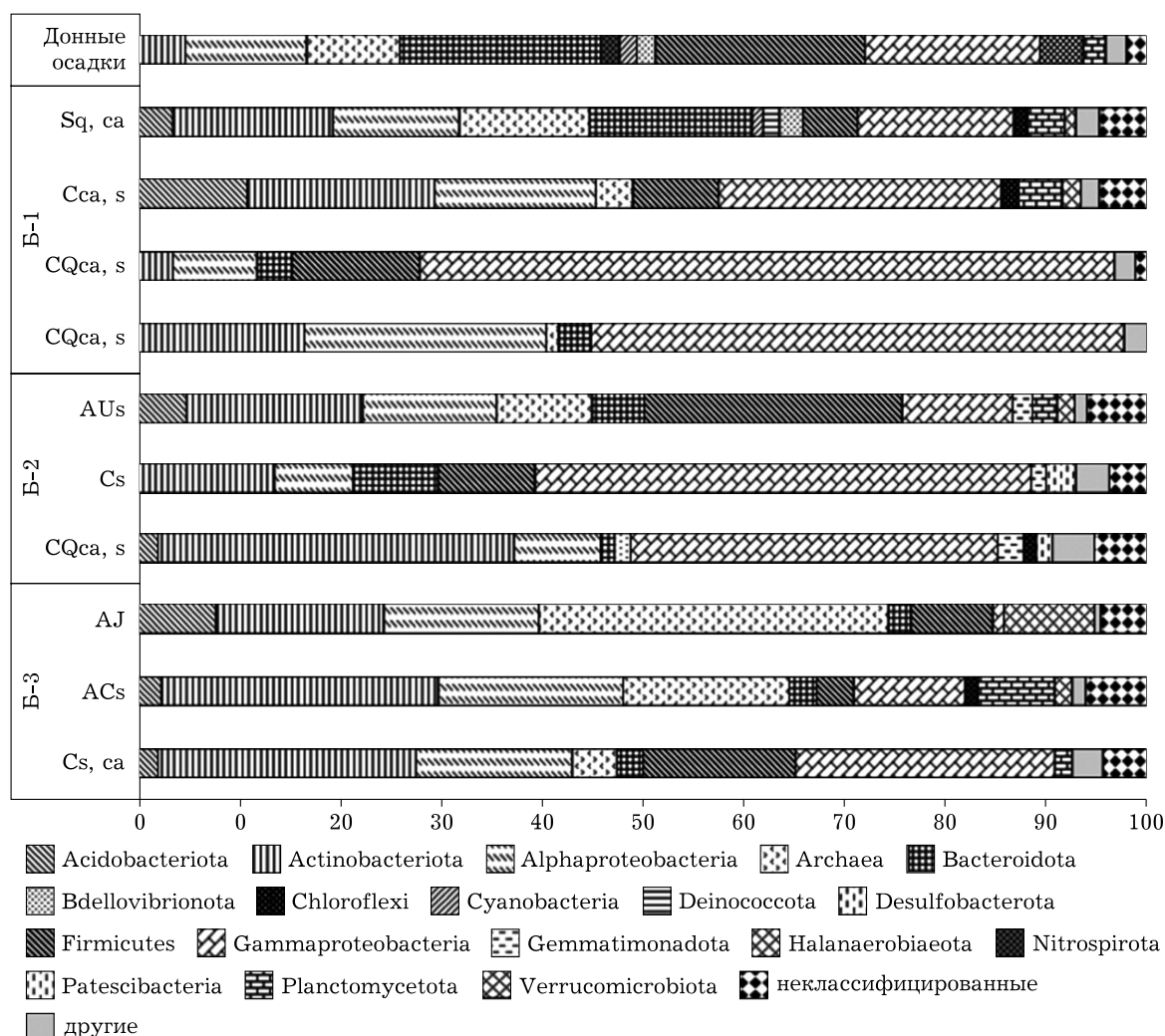


Рис. 3. Таксономический состав микробного сообщества в прибрежных почвах высокоминерализованного оз. Байкал

доля гликоолигогалофитов и мезоксерофитов (см. рис. 1).

Предшествующая череда сухих лет, мелководья и усыхания озер способствовали снижению уровня грунтовых вод, которые на момент исследования в профиле почв отсутствовали, поэтому окислительно-восстановительные условия были достаточно стабильные. Тип почвенного профиля представлен следующей системой генетических горизонтов: AJs – ACs – CQs и по [Классификация..., 2004; Полевой определитель, 2009; IUSS, 2015] соответствует гумусово-квизиглеевой засоленной почве (Endosalic Gleysoils Sodic).

Изученные почвы имеют неоднородный гранулометрический состав: выделяются су-

песчаная (0–34 (39) см) и среднесуглинистая (34 (39)–65 см) толщи. По динамическому коэффициенту верхние слои диагностируют эоловые ($F > 3$), а нижние – озерные ($F < 1$) условия седиментации. По значениям pH верхние горизонты имеют щелочные показатели (8,6), а нижние – сильнощелочные (9,7). Содержание карбонатов варьирует от 1,6 (ACs) до 6,0 % (QCs). Почвы малогумусные (см. табл. 1). Емкость катионного обмена низкая (9,5–12,0 ммоль/100 г почвы), однако состав обменных катионов вполне оптимальный для произрастания растений. В гумусовом горизонте преобладают магний и кальций, токсичного натрия содержится незначительное количество. В горизонтах ACs и QCs наблюдается резкое увеличение доли натрия (до 53 % от

суммы катионов) (см. рис. 2). Обеспеченность подвижными фосфором и калием низкая.

Гумусово-квизиглеевые почвы (Б-2) засолены: верхний песчаный слой 0–30 см – слабо, а нижележащие суглинистые горизонты (Cs, CQca, s) – средне- и сильно (см. табл. 2). По сравнению с солончаками в изученных почвах значительно снижается (в 9–10 раз) средневзвешенное содержание Cl^- . Тип химизма засоления светлогумусового горизонта содовохлоридный, в составе анионов преобладают HCO_3^- и Cl^- . В нижележащих горизонтах существенно возрастает содержание карбонатов, химизм же засоления меняется на хлоридно-содовый. Среди катионов во всех горизонтах преобладает Na^+ , но отмечается по сравнению с солончаками увеличение доли Mg^{+2} .

Расчет гипотетических солей показал значительную роль в минералообразовании карбонатных соединений (56 % от суммы солей) (см. табл. 3). Больше всего образуется нетоксичной соли $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, меньшее содержание характерно для токсичных Na_2CO_3 , NaHCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Процесс гипсообразования в изученных почвах, так же как и в озерных водах [Борзенко, 2022], не реализуется. Вероятнее всего, весь резерв кальция был использован при образовании карбонатных соединений. Содержание NaCl достаточно высокое (0,040 %) и составляет 40 % от суммы солей. Количество мирабилита (Na_2SO_4) низкое. В нижних горизонтах значительно возрастает сумма легкорастворимых солей (0,340 %), в том числе карбонатных (86 %, преобладают Na_2CO_3 и NaHCO_3), снижается хлоридных (NaCl до 10 %) и сульфатных (Na_2SO_4 4–6 %) (см. табл. 3).

В гумусово-квизиглеевой засоленной почве последовательности ампликонов (ASVs) изменяются от 142 до 239, индекс разнообразия Шеннона – Уинера – от 2,4 до 3,1 (см. табл. 4). Наибольшие значения ASVs (239) и индекса разнообразия характерны для гумусового горизонта (3,1). Количество классифицированных последовательностей составляет всего 38–53 %, остальные отнесены к неклассифицируемым. Полученные данные о присутствии в метагеноме большого числа последовательностей, имеющих наибольшее сходство с некультивируемыми формами и неясным таксономическим положением, соответствуют литературным данным [Mesbah et al., 2013].

Микробное сообщество гумусового горизонта изученных почв представлено 17 филумами (66 %), среди которых доминируют *Firmicutes*, *Actinobacteriota*, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria* (см. рис. 3). Глубже отмечается структурная перестройка прокариотного сообщества. В горизонте ACs преобладают *Gammaproteobacteria* (49 %) и *Actinobacteriota* (13 %). В озерных засоленных отложениях (34 (39)–65 см) имеют преимущественное распространение такие же филотипы, но увеличивается доля *Actinobacteriota* (35 %) и снижается *Gammaproteobacteria* (36 %). В составе прокариотного сообщества изученной почвы появляются представители филума *Gemmatimonadota*, адаптированные к почвам с низкой влажностью [Fawaz, 2013], также неклассифицированные представители *Patescibacteria* и *Bdellovibrionota*.

Разнообразие гаммапротеобактерий представлено в гумусово-квизиглеевой почве следующими доминирующими родами: *Burkholderiales*, *Rheinheimera*, *Azoarcus*, *Cellvibrio*, а также родами *Pseudoxanthomonas*, *Luteimonas*, *Arenimonas* семейства *Xanthomonadaceae*. В изученных почвах встречались галоалкалолотолерантные и галофильные бактерии родов *Salinarimonas*, *Roseovarius*, *Rhodovibrio*, *Roseibaca*, *Pelagibius*. Филум *Bacteroidota* в гумусово-квизиглеевых почвах состоит исключительно из представителей класса *Bacteroidia*. Филум *Firmicutes* в гумусовом и переходном горизонтах представлен в основном двумя классами – *Clostridia* и *Bacilli*, с большой долей некультивируемых бактерий.

Архейное разнообразие гумусово-квизиглеевой засоленной почвы представлено филумом *Crenarchaeota*. Только в гумусовом слое 1,4 % приходится на филум *Halobacterota* – доминанта донных осадков оз. Бабые.

Третий модельный полигон (Б-3) заложен на пологом склоне элювиально-супераккумулятивного участка палеогидроморфной позиции озерной депрессии. Растительность представлена ковыльно-разнотравно-вострещеной степью. Проективное покрытие травостоя около 30 %. Ксерофиты составляют в совокупности основную часть травостоя (более 20 %). Доля ксерофильных видов достигает 45 %, ксеромезофильные и мезоксерофильные виды составляют 26 и 22 % соответственно; доля мезофитов незначительна (7 %). Растительное

сообщество носит в основном зональный характер, но с участием видов галофитной экологии (см. рис. 1, а). Примерно половину видового состава составляют виды, способные произрастать на почвах с той или иной степенью засоления, включая доминанты *Stipa krylovii* и *Leymus chinensis*. Такой видовой состав обусловлен относительно неглубоким залеганием засоленных горизонтов.

Морфологическое строение почв (Б-3) имеет следующую формулу: АJ-ACs-Cs и диагностирует тип светлогумусовой засоленной почвы (Mollic Leptosols Eutric Sodic) [Классификация..., 2004; Полевой определитель..., 2008; IUSS..., 2015]. По физико-химическим свойствам достаточно четко выделяются гумусовая часть, переходный горизонт и озерные засоленные отложения. Горизонт АJ имеет легкий гранулометрический состав (супесчаный), ниже по профилю отмечается утяжеление состава до средне- (ACs) и тяжелосуглинистого (Cs). В гумусовом горизонте слабощелочная реакция среды (7,5), содержание карбонатов очень низкое, горизонт не засолен, соотношение обменных катионов в нем типичное для зональных почв (см. табл. 1, рис. 2). В горизонтах ACs и Cs отмечается резкое возрастание pH до сильнощелочных значений (9,2–9,4), увеличивается содержание CO₂, емкости катионного обмена. В составе катионов возрастает доля натрия (59–66 %). Почвы малогумусные (см. табл. 1).

Светлогумусовая почва обладает дифференцированным солевым профилем. Верхний гумусовый горизонт не засолен (см. табл. 2), тогда как в горизонтах ACs и Cs содержание солей увеличивается соответственно в 5 и 7 раз по сравнению с АJ и соответствует средней (ACs) и сильной (Cs) степеням засоления. Распределение легкорастворимых солей по профилю имеет грунтово-аккумулятивный тип. Профильное распределение CO₃²⁻ и HCO₃⁻ неравномерное: в светлогумусовом горизонте их содержание минимальное, в озерных отложениях – максимальное. Такая высокая концентрация гидрокарбонатных ионов обуславливает содовый химизм засоления. Содержание хлор-ионов невысокое (0,64–1,44 смоль(экв)/кг), с глубиной в засоленных горизонтах его содержание увеличивается (см. табл. 2). Содержание сульфат-ионов в верхней части профиля низкое, с глубиной

отмечается постепенное увеличение этого показателя. Отношение Cl⁻/SO₄²⁻ изменяется по профилю от 16 в светлогумусовом горизонте до 1,2 в озерных отложениях. Такой широкий диапазон варьирования связан с возрастанием сульфатов (в 24 раза) в почвообразующих породах. Среди катионов доминирует натрий. Химизм засоления изученных почв по анионам содово-хлоридный и хлоридно-содовый; по катионам – натриевый.

В горизонте АJ встречаются только две соли: нетоксичный карбонат кальция и галит. С глубины 33 см отмечается увеличение солей карбонатов, однако карбонаты связываются в большей степени с натрием (см. табл. 3). Самые высокие значения солей встречаются в горизонте ACs, доминируют NaHCO₃, Na₂CO₃·NaHCO₃·2H₂O, Na₂CO₃·10H₂O, также участвуют NaHCO₃, Ca(HCO₃)₂, Mg(HCO₃)₂. В горизонте Cs отмечена аккумуляция галита NaCl и тенардита Na₂SO₄.

В зональной светлогумусовой почве последовательности ампликонов (ASVs) ниже по сравнению с солончаками и гумусово-квазиглеевой почвой (75 до 154), индекс разнообразия Шеннона – Уинера относительно одинаковый по профилю (2,7–3,0). Наибольшие значения ASVs и индекса разнообразия характерны для озерных засоленных отложений (Cs). Следует отметить, что количество классифицированных последовательностей варьирует в широких пределах (27–77 %), наименьшие значения характерны для переходного горизонта (27 %) (см. табл. 4).

Микробное сообщество гумусового горизонта представлено 11 филотипами, доминируют *Actinobacteriota* и *Alphaproteobacteria*. В равных долях (8–9 %) в этом слое присутствуют *Firmicutes* и *Acidobacteriota* и представители домена *Archaea*. В горизонте ACs увеличивается разнообразие прокариотного сообщества до 14 филумов. В составе доминантов, так же как и в АJ, встречаются *Actinobacteriota* и *Alphaproteobacteria*, значительно возрастает доля *Archaea* и *Gammaproteobacteria* (рис. 4). В озерных отложениях *Actinobacteriota* и *Alphaproteobacteria* сохраняют определяющую роль. Наряду с ними значительное участие в составе прокариотного сообщества имеют *Gammaproteobacteria* (26 %) и *Firmicutes* (15 %).

Разнообразие филума *Actinobacteriota* в светлогумусовой почве соотнесено с классами Ас-

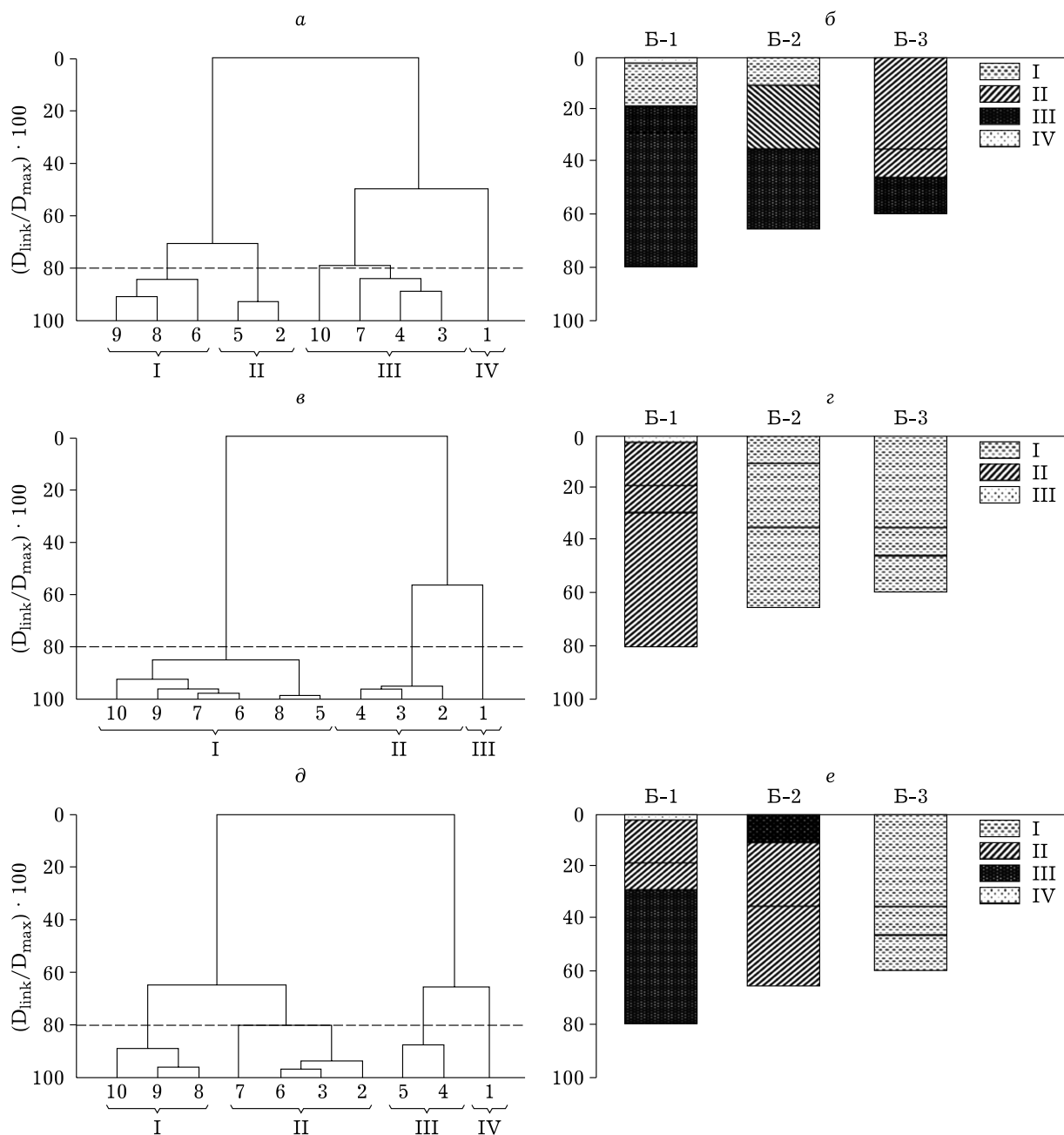


Рис. 4. Дендрограмма сходства и ранжирования почв по данным гранулометрического состава (а, б); физико-химическим свойствам (в, г), микробиому (д, е). Номера точек: Б-1: 1 – S (0 – 5 см); 2 – ACs (5 – 20/22 см); 3 – CQs (20/22 – 30 см); 4 – 2CQs (30 – 80 см); Б-2: 5 – AUs (0 – 15/18 см); 6 – ACs (15/18 – 34/39 см); 7 – CQs (34/39 – 65 см); Б-3: 8 – AJ (0 – 33/39 см); 9 – ACs (33/39 – 44/47 см); 10 – Cs (44/47 – 60 см). I-IV – кластеры

tinobacteria, *Acidimicrobiia* и *Thermoleophilia* и может быть связано с низкой влажностью почв [Чернов, 2016].

В горизонтах AJ, ACs, Cs, са филум *Firmicutes* состоял исключительно из представителей класса *Bacilli*. На долю филума *Bacteroidota* в изученных почвах приходится

2–3 %, во всех образцах он представлен классом *Bacteroidia* с большой долей некультивируемых бактерий.

Архейное разнообразие светлогумусовой засоленной почвы представлено только филумом *Crenarchaeota* и принадлежит в основном к неклассифицированным аммоний-окисляющим

представителям семейства Nitrososphaeraceae. Представители этого филума обнаруживаются практически во всех природных экосистемах и играют важную роль в круговороте азота в почве и в природе в целом [Чернов, 2016].

ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленные солончатые и соленые озера различного химического состава и разной степени минерализации северной окраины бессточного Центрально-Азиатского бассейна (Монголия, Китай, Россия) [Скляр и др., 2011] являются центрами современного соленакопления. Особенности функционирования экосистем приозерных понижений этой территории, как показали проведенные исследования, является контрастная смена экологических условий, связанная с циклическими изменениями уровня озер, современными процессами континентального соленакопления, гидроморфизмом, криогенезом, субаквальным и субаэральным седиментогенезом.

Для установления общности динамических (почва “момент”) и устойчивых (почва “память”) показателей горизонтов изученных почв, а также их роли в формировании микробиома полученные данные были обработаны методом кластерного анализа. В изученных почвах пороговые расстояния разграничивают субаэральные супесчаные и легкосуглинистые (I, II кластер), озерные средне- и тяжело-суглинистые (III) и глинистые (IV) отложения (рис. 4, а, б). Гумусово-квизиглеевая и светлогумусовая почвы имеют однотипное чередование слоев: в верхней части – супесчаные (субаэральные), в нижней – среднесуглинистые (озерные) (рис. 4, б). В солончаке ранжировались глинистые озерные, супесчаные субаэральные и средне- и тяжелосуглинистые озерные отложения.

Физико-химические свойства (pH, CO₂, содержание легкорастворимых, токсичных солей, водорастворимых анионов и катионов, обменные Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, активности aNa⁺, aCl⁻, aF⁻, содержание C_{орг}) ранжировались на три кластера (рис. 4, в, г).

В первый объединились все горизонты светлогумусовой и гумусово-квизиглеевой почв. Такая группировка по динамическим свойствам показывает однотипность процессов, происходящих в современное время в этих почвах

и показывает отсутствие влияния грунтовых озерных вод на формирование динамических показателей. В солончаках, расположенных на супераквально-субаквальных позициях и формирующихся в наиболее динамичных по водному режиму условиях, ранжируются на два кластера: солончаковый горизонт (Sq) разделяется от избыточно увлажненного квазиглеевого (Q) горизонта и озерных отложений (рис. 4, г).

Разнообразие микробного сообщества донных осадков и приозерных почв ранжировалось на 5 кластеров (рис. 4, д, е). Засоленные озерные отложения (кластер I) характеризуются резким доминированием *Gammaproteobacteria* (49–69 %). Озерно-эоловые седиментационные слои ранжировались отдельно (кластер IV), в них преобладают *Actinobacteriota*, *Alphaproteobacteria*, *Gemmatimonadota*, *Archaea*, *Firmicutes*. Незасоленный горизонт AJ светлогумусовой зональной почвы выделялся также в отдельный кластер (II), особенностями состава микробного сообщества которого является доминирование *Actinobacteriota* и *Alphaproteobacteria*.

По таксономическому разнообразию горизонт CQs гумусово-квизиглеевой почвы обособился в отдельный кластер (III). Микробное сообщество характеризуется доминированием гаммапротеобактерий и актинобактерий, отсутствием фило типов *Archaea*, *Firmicutes*, *Verrucomicrobiota*. В незначительном количестве встречались в составе прокариотного сообщества *Gemmatimonadota*, *Patescibacteria*, *Bdellovibrionota*. Такой состав микробного сообщества может быть связан с очень неустойчивым водным режимом этого слоя из-за близкого залегания грунтовых вод.

В отдельный кластер объединились сильно засоленные донные отложения и горизонт S солончака (V), а также слабозасоленный светлогумусовый горизонт (AJs) гумусово-квизиглеевой засоленной почвы (II) (рис. 4, д, е). Верхние горизонты солончака (гумидная, аридные фазы) и гумусово-квизиглеевой почвы (гумидная фаза) периодически затапливаются водами озера, на них отлагаются донные отложения, вероятно, поэтому микробные сообщества имеют таксономическую идентичность. Для этих горизонтов характерен наиболее высокий индекс микробного разнообразия, прокариотное сообщество представлено

17–18 филумами. Доминирующими являются *Bacteroidota*, *Actinobacteriota*, *Gammaaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Archaea*, *Firmicutes*. Эта закономерность наиболее типична для микробных сообществ засоленных почв [Janssen, 2006; Hansel et al., 2008; Першина, 2012]. В донных осадках озера и сильнозасоленных горизонтах широко представлено архейное сообщество с доминированием филума *Halobacterota*. Отличительной особенностью является функционирование в них фотосинтезирующих бактерий.

Комплексное изучение приозерных экосистем показало, что абиотические факторы среды определяют особенности формирования разнообразных растительных и микробных сообществ. Это связано со сменой анаэробных и аэробных условий, различной увлажненностью, степенью и химизмом засоления, неоднородным гранулометрическим составом почв (см. рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приозерные экосистемы степной зоны Юго-Восточного Забайкалья формируются при циклических изменениях уровня озер и смене их химического состава. Немаловажное значение оказывает эоловый фактор. Морфологическое строение, а также данные по динамическим свойствам и вещественному составу почв супераквально-субаквальных, супераквальных и элювиально-супераквальных позиций выявили проявление современного континентального засоления различного химизма и гидрогенного окисления.

Основной чертой пространственной структуры растительности приозерных экосистем оз. Бабье является приуроченность пионерных гипергалофитных и галофитных сообществ к супераквально-субаквальным позициям с сильнозасоленными почвами хлоридного засоления (Б-1). Растительность супераквальных участков на гумусово-квизиглеевых засоленных почвах хлоридно-содового химизма с неустойчивым типом водного режима (Б-2) сформирована преимущественно многолетниками с преобладанием галофитов и мезофитов, что указывает на длительность ее развития в данных условиях. Более низкая засоленность и влажность почв в этой позиции по сравнению с супераквально-субаквальной обуслов-

ливает участие гликоолигогалофитов и мезоксерофитов. На элювиально-супераквальных позициях на светлогумусовых почвах (Б-3) сформировалась ковыльно-разнотравно-вострещовая степь. Ксерофиты составляют в совокупности основную часть травостоя (более 2/3 общего проективного покрытия и около 45 % видового). Незасоленность 0–44 см слоя благоприятствует развитию растительного сообщества в основном зонального (степного) характера, но с участием мезофитов и ксеромезофитов. Относительно неглубокое залегание засоленных (содово-хлоридное засоление) горизонтов АСs и Сs благоприятствует произрастанию галотолерантных видов, включая доминанты *Stipa krylovii* и *Leymus chinensis*.

В динамически эволюционирующих приозерных почвах формируются в зависимости от абиотических факторов различные микробиоморфные комплексы. Влияние минерализованных хлоридных вод способствует формированию близких по таксономическому составу микробных сообществ донных осадков оз. Бабье и сильнозасоленных горизонтов. Во всех почвенных образцах обнаружена большая доля неклассифицируемых прокариот, т. е. включающей пока неописанные и еще неизвестные таксоны. Этот важный неизученный микробный компонент представлен на уровне домена *Bacteria* в солончаках (до 22 %), гумусово-квизиглеевой засоленной (до 15 %) и светлогумусовой засоленной (до 16 %) почвах.

Гумусово-квизиглеевые почвы формируются в различных режимах в аридную и гумидную фазы. Структура микробиома этого типа почв характеризуется присутствием галобактерий и кренархеот. Отсутствие галобактерий в светлогумусовой засоленной почве, вероятно, связано с отсутствием легкорастворимых солей в гумусовом горизонте и низким содержанием их в переходном (Асs).

Для микробных сообществ зональных почв установлена значительная доля таксонов, участвующих в круговоротах углерода и азота (азотфиксирующих, восстанавливающих нитриты и нитраты, окисляющих аммоний), играющих ключевую роль в глобальных биогеохимических циклах.

Выражаем надежду, что наши комплексные исследования по изучению приозерных

экосистем высокоминерализованных озер внутриконтинентальных районов Евразии, расположенных в переходной зоне юга Восточной Сибири и Северной Монголии, дадут дополнительный материал для развития представлений о многообразии процессов, происходящих в них. Продолжение исследований будет связано с дальнейшим изучением засоленных приозерных почв содового и сульфатного типов засоления.

Исследования выполнены в рамках тем государственного задания Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (№ 121030100228-4, 121030100228-1), Бурятской ГСХА им. В. Р. Филиппова (тема I, подтема, I.03) и Государственного природного биосферного заповедника “Даурский” (№ 122062400034-8).

Результаты секвенирования гена *16S рНК* получены в лаборатории ФГБНУ “Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии” (г. Санкт-Петербург) по договору 18/2022/2н от 16.09.2022.

ЛИТЕРАТУРА

- Абидуева Е. Ю., Сыренжапова А. С., Намсараев Б. Б. Функционирование микробных сообществ в содово-соленых озерах Онон-Керуленской группы (Забайкалье и Северо-Восточная Монголия) // Сиб. экол. журн. 2006. Т. 13, № 6. С. 707–716.
- Афонина Е. Ю., Ташлыкова Н. А. Планктон минеральных озер Юго-Восточного Забайкалья: трансформация и факторы среды // Сиб. экол. журн. 2019. Т. 26, № 2. С. 192–209 [Afonina E. Yu., Tashlykova N. A. Plankton of saline lakes in southeastern Transbaikalia: transformation and environmental factors // Contemporary Problems of Ecology. 2019. Vol. 12, N 2. P. 155–170].
- Баженов Ю. А. Население мелких млекопитающих окрестностей Торейских озер (Юго-Восточное Забайкалье) в период сухой климатической фазы: динамика и связь с осадками // Сиб. экол. журн. 2019. Т. 26, № 1. С. 29–41 [Bazhenov Yu. A. Population of small mammals in the vicinity of the Torey lakes (southeast Transbaikalia) during the dry climatic phase: dynamics and connection with precipitation // Contemporary Problems of Ecology. 2019. Vol. 12, N 1. P. 23–33].
- Баженова О. И., Черкашина А. А. Голоценовый морфолитогенез в озерных котловинах Юго-Восточного Забайкалья // Геоморфология. 2018. № 2. С. 4–19.
- Базилевич Н. И., Панкова Е. И. Методические указания по учету засоленных почв. М.: Гипроводхоз, 1968. 91 с.
- Борзенко С. В. Причины гидрогеохимического разнообразия соленых озер Восточного Забайкалья // Успехи соврем. естествознания. 2022. № 9. С. 51–60.
- Воробьева Л. А. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
- Горошко О. А. Влияние многолетних климатических циклов на орнитокомплексы Даурии // Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования. Чита, 2011. С. 140–143.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист М50 – Борзя. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
- Гришко В. Н., Сыщикова О. В., Зенова Г. М., Кожевин П. А., Дуброва М. С., Лубсанова Д. А., Чернов И. Ю. Мицелиальные актинобактерии засоленных почв аридных территорий Украины и России // Почвоведение. 2015. № 1. С. 81–86 [Grishko V. N., Syshchikova O. V., Zenova G. M., Kozhevnikov P. A., Dubrova M. S., Lubsanova D. A., Chernov I. Yu. Mycelial actinobacteria in salt-affected soils of arid territories of Ukraine and Russia // Eur. Soil Sci. 2015. Vol. 48, N 1. P. 72–76].
- Грубов В. И. Определитель сосудистых растений Монголии (с атласом). Моноолайн цоргот ургамал таних бичиг (эургийн хамтаар). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982. 443 с.
- Дулупова Б. И. Растительность Даурского озерно-степного заповедника // Уч. зап. Забайкальского гос. гум.-пед. ун-та им. Н. Г. Чернышевского. 2010. Т. 1. С. 35–39.
- Заварзин Г. А., Жилина Т. Н., Кевбрин В. В. Алкалофильное микробное сообщество и его функциональное разнообразие // Микробиология. 1999. Т. 68. С. 579–599.
- Звягинцева И. С. Галобактерии // Успехи микробиологии. 1989. Т. 58, вып. 23. С. 112–137.
- Зенова Г. М., Оборотов Г. В., Норовсүрэн Ж., Федоров А. В., Яковлева Л. В. Галофильные и алкалофильные стрептомицеты засоленных почв // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1347–1351 [Zenova G. M., Oborotov G. V., Norovsuren Zh., Fedotova A. V., Yakovleva L. V. Halophilic and alkaliphilic streptomycetes in salt-affected soils // Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40, N 11. P. 1203–1207].
- Казанский А. Ю., Матасова Г. Г., Шетников А. А., Филинов А. И., Ербаева М. А. Петромагнитные и гранулометрические характеристики четвертичных отложений опорного разреза Тологой (Бурятия, Россия) // Проблемы геокосмоса: материалы 12-й Международ. шк.-конф. СПб., 2018. С. 105–112.
- Кашницкая М. А. Исследование динамики площадей водной поверхности озер степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанц. зондирования Земли // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 242–253.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Клещева Е. А. Индикационные особенности растений юга Сибири по отношению к фактору увлажнения почв // Экология. 2010. № 6. С. 425–431.
- Климатический справочник СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1958. Вып. 23, ч. 1. 288 с.
- Королюк А. Ю. Экологические оптимумы растений юга Сибири // Ботан. исследования Сибири и Казахстана. 2006. Вып. 12. С. 3–28.
- Лавренко Е. М. Провинциальное разделение Центрально-азиатской подобласти Степной области Евразии // Ботан. журн. 1970. Т. 55, № 12. С. 511–526.
- Лысак Л. В., Трошин Д. В., Чернов И. Ю. Бактериальные сообщества солончаков // Микробиология. 1994. Т. 63, № 4. С. 721–729.

- Мордкивич В. Г. Зоологическая характеристика примитивных почв в осушенных зонах соленых озер юга Сибири // Зоол. журн. 1973. Т. 53, № 9. С. 1321–1329.
- Мордкивич В. Г., Любечанский И. И. Роль крупных членистоногих (Arthropoda: aranei, inse) в развитии галоморфных почв на юге Сибири // Почвоведение. 2017. № 5. С. 698–710 [Mordkovich V. G., Lyubechanskii I. I. The role of large arthropods in the development of halomorphic soils in the south of Siberia // Eur. Soil Sci. 2017. Vol. 50, N 6. P. 688–700].
- Найданов Б. Б., Бадмаева Н. К., Аненхонов О. А., Пыхалова Т. Д. Галофитная растительность Западного Забайкалья: Флора и синтаксономия // Раст. мир Азиат. России. 2010. № 2 (6). С. 66–72.
- Норовсурэн Ж. Ю., Оборотов Г. В., Зенова Г. М., Алиев Р. А., Звягинцев Д. Г. Галоалкалофильные актиномицеты в почвах пустынных степей Монголии // Изв. РАН. Сер. Биол. 2007. № 4. С. 501–507 [Norovsuren Zh. Yu., Oborotov G. V., Zenova G. M., Aliev R. A., Zvyagintsev D. G. Haloalkaliphilic actinomycetes in soils of Mongolian desert steppes // Biol. Bull. 2007. Vol. 34, N 4. P. 417–422].
- Обязов В. А. Вековые тенденции изменений климата на юго-востоке Забайкалья и в сопредельных районах Китая и Монголии // Метеорология и гидрология. 1999. № 10. С. 33–40.
- Парфенов Л. М., Попоко Л. И., Томуртоого О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 5. С. 24–43.
- Першина Е. В., Тамазян Г. С., Дольник А. С., Пинаев А. Г., Сергалиев Н. Х., Андронов Е. Е. Изучение структуры микробного сообщества засоленных почв с использованием высокопроизводительного секвенирования // Экол. генетика. 2012. Т. 10, № 2. С. 32–39.
- Полевая геоботаника Т. III / под ред. Е. М. Лавренко, А. А. Корчагина. М.: Наука, 1964. 531 с.
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / разраб. Н. Б. Хитров, А. В. Понизовский. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. 1990. 236 с.
- Скляров Е. В., Склярова О. А., Меньшагин Ю. В., Данилова М. А. Минерализованные озера Забайкалья и Северо-Восточной Монголии: особенности распространения и рудогенерирующий потенциал // География и природ. ресурсы. 2011. № 4. С. 29–39 [Sklyarov E. V., Sklyarova O. A., Men'shagin Yu. V., Danilova M. A. Mineralized lakes of the Transbaikalia and Northeastern Mongolia: specific features of occurrence and ore-generating potential // Geogr. and Nat. Res. 2011. Vol. 32, N 4. P. 323–332].
- Солоноватые и соленые озера Забайкалья: гидрохимия, биология / Б. Б. Намсараев, В. М. Горленко и др. / Улан-Удэ: Бурят. гос. ун-т, 2009. 340 с.
- Сыренжапова А. С. Сезонные и межгодовые изменения активности микроорганизмов высокоминерализованных содово-соленых озер Онон-Керуленской группы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2004. 19 с.
- Титлянова А. А., Мордкивич В. Г. Некоторые биогеоценоотические особенности осушной зоны озера Большой Чиндант // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. 1970. № 5 (170). С. 59–66.
- Ткачук Т. Е. Основные черты динамики растительности в Даурском экорегионе в засушливую фазу климатического цикла // Academician Leo Berg – 140 years: Collection of Scientific. сб. науч. ст. Bendery: EcolIRAS, 2021. P. 230–233.
- Ткачук Т. Е., Жукова О. В. Динамика растительности Даурского заповедника // Уч. зап. ЗабГГПУ. 2013. № 1 (48). С. 45–57.
- Флора Центральной Сибири: в 2 т. / под ред. Л. И. Малышева, Г. А. Пешковой. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1979. 1048 с.
- Хадеева Е. Р. Галогенез почв Забайкалья и Предбайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2021. 20 с.
- Цыбекмитова Г. Ц. Гидрохимия некоторых озер Онон-Торейской высокой равнины // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исследований. 2018. № 11-1. С. 144–148.
- Цыренова Д. Д. Видовой состав и экофизиология цианобактерий солоноватых и соленых озер Южного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2009. 21 с.
- Чернов Т. И. Метагеномный анализ прокариотных сообществ профилей почв европейской части России: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 23 с.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Структурный анализ экологических систем. Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.
- Штина Э. А., Зенова Г. М., Манучарова Н. А. Альгологический мониторинг почв // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1–12.
- Эволюция, функционирование и экологическая роль почв как компонента биосферы / отв. ред. А. О. Алексеев, В. Н. Кудеяров. Пушино: Т-во науч. изд. КМК, 2020. 290 с.
- Ярошенко П. Д. Геоботаника. М.: Просвещение, 1969. 200 с.
- Bazarova B. B., Tashlykova N. A., Afonina E. Y., Kuklin A. P., Matafonov P. V., Tsybekmitova G. T., Gorchacheva E. P., Itigilova M. T., Afonin A. V., Butenko M. N. Long-term fluctuations of the aquatic ecosystems in the Onon-Torey plain // Shengtai Xuebao. 2019. Vol. 39, N 2. P. 157–165.
- Borzenko S. V., Shvartsev S. L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Appl. Geochem. 2019. N 103. P. 72–84.
- de León-Lorenzana A. S., Delgado-Balbuena L., Domínguez-Mendoza C. A., Luna-Guido M., Dendooven L., Navarro-Noya Y. E. Soil salinity controls relative abundance of specific bacterial groups involved in the decomposition of maize plant residues // Front. Ecol. Evol. 2018. Vol. 6. P. 1–21.
- Fawaz M. Revealing the Ecological Role of Gemmatimonadetes Through Cultivation and Molecular Analysis of Agricultural Soils // Master's Thesis. University of Tennessee. 2013. 118 p.
- Hansel C., Fendorf S., Jardine P., Francis C. Changes in bacterial and archaeal community structure and functional diversity along a geochemically variable soil profile // Appl. Environ. Microbiol. 2008. Vol. 74. P. 1620–1633.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports N 106. FAO, Rome. 2015. 192 p.

- Janssen P. H. Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes // *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. Vol. 72. P. 1719–1728.
- Kashnitskaya M. A., Bolgov M. V. Closed Torey lakes: is it possible to predict changes in hydrological regime? // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2021. Vol. 46. P. 341–344.
- Mesbah N. M., Abou-El-Ela S. H., Wiegel J. Novel and unexpected prokaryotic diversity in water and sediments of the alkaline, hypersaline lakes of the Wadi An Natrun, Egypt // *PLoS ONE.* 2013. N 8 (8). P. e72577.
- Namsaraev Z. B., Gorlenko V. M., Zaitseva S. V., Kozyreva L. P., Namsaraev B. B. Microbial processes and factors controlling their activities in alkaline lakes of the Mongolian plateau // *Chin. J. Oceanol. and Limnol.* 2015. Vol. 33, N 6. P. 1391–1401.
- Navarro-Noya Y. E., Valenzuela-Encinas C., Sandoval-Yuriar A., Jiménez-Bueno N. G., Marsch R., Dendooven L. Archaeal communities in a heterogeneous hypersaline-alkaline soil // *Archaea.* 2015. Vol. 2015. P. 1–11.
- Physiology and biochemistry of extremophiles / Ed. by C. Gerday, N. Glansdorff. Washington, DC: ASM Press, 2017. 429 p.
- Tkachuk T. E., Pazdnikova N. M., Kozlova V. N., Saraeva L. I., Goryunova S. V. Dynamics of riparian Vegetation of Steppe Lakes in the Dauria // *Proceedings of the International Conference of China-Mongolia-Russia Dauria International Protected Area.* Ulaanbaatar: Wildlife Conservation Society, 2014. P. 52–56.
- Zhang K., Shi Y., Cui X., Yue P., Li K., Liu X., Tripathi B. M., Chu H. Salinity is a key determinant for soil microbial communities in a desert ecosystem // *mSystems.* 2019. Vol. 4, N 1. P. 1–11.
- Zhao S., Liu J. J., Banerjee S., Zhou N., Zhao Z. Y., Zhang K., Tian Ch. Y. Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, N 4550. P. 1–11.

Soil and plant cover and microbial-biomorphic assessment of ecosystems within coastal depressions of highly mineralized drainless pulsating lakes of Dauria (Southeastern Transbaikalia)

V. I. UBUGUNOVA¹, L. L. UBUGUNOV^{1, 2}, A. S. SYRENZHAPOVA², E. Yu. ABIDUEVA¹,
T. A. AYUSHINA¹, A. D. ZHAMBALOVA¹, T. E. TKACHUK^{3, 4}

¹*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6
E-mail: ubugunova57@mail.ru*

²*Buryat State Agricultural Academy named after V. R. Filippova
670010, Ulan-Ude, Pushkin str., 8
E-mail: arunass_70@mail.ru*

³*Transbaikalian State University
672014, Chita, Aleksandro-Zavodskaya str., 30
E-mail: tetkachuk@yandex.ru*

⁴*Daurian State Nature Biosphere Reserve
674480, Nizhny Tsasuchey, Komsomolskaya str., 76
E-mail: tetkachuk@yandex.ru*

Complex studies of soils, vegetation cover, and microbiota of coastal depressions of highly mineralized drainless chloride lakes in Southeastern Transbaikalian Region (Dauria, Lake Babie) were performed for the first time. It was revealed that the lakeside ecosystems formed within the steppe zone under cyclic changes in the level of lakes and the resulting change in the lake water chemical composition. The eolian factor has a certain influence. The dynamic properties and material composition of soils of superaqueous-subaqueous, superaqueous, and eluvial-superaqueous positions have been studied. Current continental salinization of various chemistry and hydrogenous carbonization has been revealed there. The study of the spatial structure of

phytocenoses and their species composition, depending on relief location in lakeside depressions, soil conditions and halogenesis revealed the confinement of pioneer hyperhalophytic and halophytic communities to quasigley solonchaks. Within the superaquatic part of the lakeside depression, plant communities grow with a predominance of halophytes and mesophytes with the participation of glyco-oligoahalophytes and mesoxerophytes. The feather-grass-forb-leymus (*Leymus chinensis*, *Artemisia frifida*, *Bupleurum bicaule*, *Stipa krylovi*) steppe was formed on the light-humus soils, similar in composition to zonal steppes, with the presence of mesophytes and xerophytes. Various microbiomorphic complexes have been established to be in dynamically evolving lakeside soils, depending on abiotic factors. Highly mineralized chloride lake waters contribute to forming of similar microbial communities in the bottom sediments of the Lake Babie and highly saline horizons of the quasigley solonchak. At the same time, a large proportion of unclassified prokaryotes were found in all soil samples. This important unstudied microbial component is present at the level of the Bacteria domain in solonchaks (up to 22 %), saline humus-quasigley (up to 15 %), and light-humus saline (up to 16 %) soils. The microbiome structure in humus-quasigley soil is characterized by the presence of halobacteria and krenarcheotes. A significant proportion of taxa involved in carbon and nitrogen cycles, and play an important role in global biogeochemical cycles, have been established in light-humus saline soil. Also, halobacteria were not revealed in this type of soil due to insignificant content of easily soluble salts in the humus and transitional horizons.

Key words: Southeastern Transbaikalia, highly mineralized chloride lakes, lakeside ecosystems, soils, salinization, vegetation, microbial-biomorphic complexes.