

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 556:550.424.6

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА БУРЕЙСКОГО ОПОЛЗНЯ ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМЕРЗАНИЯ/ОТТАИВАНИЯ *IN VITRO*© 2024 г. Л. М. Кондратьева^{1,*}, Е. М. Голубева^{2,3,**}, Н. С. Коновалова^{2,***}¹Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,
ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения РАН,
ул. Ким-Ю-Чена, 65, Хабаровск, 680000 Россия³ФГБОУВО Тихоокеанский государственный университет,
ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035 Россия

*E-mail: kondratevalm@gmail.com

**E-mail: evg8302@yandex.ru

***E-mail: turtle_83@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 13.03.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

В работе приведены результаты экспериментального исследования (*in vitro*) трансформации обломочного материала (ОМ) тела оползня на Бурейском водохранилище. Образцы ОМ рассматриваются в качестве модели для оценки влияния абиогенных и биогенных факторов на трансформацию (разрушение, растворение) кремнийсодержащих минералов при различных условиях циклического заморозания/оттаивания (ЦЗО): сухой образец; образец, помещенный в деионизированную воду и раствор низкомолекулярных пептидов. Замораживание проводили при температуре -18°C , а оттаивание при разном диапазоне температур ($+4^{\circ}\text{C}$ и $+23^{\circ}\text{C}$). Определение элементного состава водных растворов после ЦЗО проводили методом ICP-MS, а изменение микроструктуры поверхности образцов ОМ с использованием сканирующей электронной микроскопии. В результате 5 циклов через 7 сут ЦЗО образцов ОМ в деионизированной воде содержание водорастворимых форм химических элементов (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi, As) было ниже пределов обнаружения прибора ($<0.001 \text{ мкг/дм}^3$). Однако в присутствии питательной среды с пептоном и природного микробного консорциума концентрации ряда элементов (Al, Ca, Mg, Fe, Mn, As, Hg) в водной среде значительно увеличивались. Согласно СЭМ-изображениям существенное изменение микроструктуры поверхности образцов происходило независимо от температуры оттаивания при активизации микроорганизмов низкомолекулярными пептидами. Образование биопленок на поверхности зерен ОМ сопровождалось формированием различных изоморфных микроагрегатов.

Ключевые слова: оползень, заморозание/оттаивание, кремнийсодержащие минералы, элементный состав, СЭМ изображения

DOI: 10.31857/S0869780924030063 EDN: SPQNQC

ВВЕДЕНИЕ

В холодных регионах наиболее активные био-геохимические процессы происходят на внешних границах оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) и почв [17]. Часто таяние ММП сопровождается опасными геологическими явлениями (оползнями, провалами, наводнениями и др.) — источниками рисков для инфраструктурных сооружений (мосты, тоннели, автомагистрали и др.) [8, 26, 48]. Эти риски усиливаются в условиях циклического заморозания-оттаивания ММП [18, 45]. Однако, несмотря на обширные сведения

по местам оттаивания ММП и экспериментальным данным по заморозанию/оттаиванию почв и пород [1, 47], крайне мало конкретных данных об изменении экологической обстановки в районах с их периодическим заморозанием/оттаиванием, особенно с позиции оценки поступления органических веществ (ОВ) в водоемы. Сезонное оттаивание ММП усиливает эффекты их разрушения и служит важным фактором для изменения качества поверхностных и подземных вод.

Существуют различные режимы таяния ММП [25], от которых зависит концентрация и состав

ОВ в поверхностных водах. Важным фактором, регулирующим состав ОВ в принимающих водоемах при оттаивании мерзлых грунтов, выступает гидрологический режим, влияющий на степень увлажнения береговых склонов [40]. Установлено, что разрушение горных пород и изменение устойчивости горных склонов происходит ускоренно при минусовых температурах и их повышенном увлажнении [41]. В случае неоднократного замораживания и оттаивания увеличивается раскрытие трещин, поскольку вода переходит в лед, и возникает сила морозного пучения [42]. Установлено, что в интервале температур от -20°C до -40°C повышается хрупкость пород за счет увеличения количества микротрещин, снижается устойчивость горных пород к деформации и разрушению [46].

Особенности поведения глинистых почв при замерзании/оттаивании, приводящие к критическим ситуациям, были выявлены в Северо-Восточном Китае при строительстве железной дороги [18, 22]. При длительных циклах замерзания/оттаивания устойчивость материнских пород зависела от присутствия монтмориллонита. Установлено, чем выше содержание этого силикатного минерала, тем больше риски от расширения и сжатия грунтов [20]. Разрушение силикатных пород оказывает большое влияние на геохимический состав различных водных объектов, формирование микробного разнообразия, обеспечивающего круговорот макро- и микроэлементов [15]. Выявление ключевых факторов, контролирующих трансформацию силикатов, стало предметом лабораторных и полевых экспериментальных исследований [13, 31].

Большинство низкотемпературных биотопов заселено адаптированными к холоду организмами трех доменов: Eukarya, Bacteria и Archaea. Способность психрофильных микроорганизмов выживать при низких температурах закодирована на клеточном и молекулярном уровнях [36]. В разрушении горных пород участвуют бактерии, развивающиеся в виде биопленок на их поверхности, в трещинах и порах [28]. Они имеют особый состав клеточных мембран; ферменты с эффективной каталитической активностью при низкой температуре; обладают способностью удалять денатурированные холодом белки и специализированные гены, отвечающие за поддержание жизнеспособности при холодовом шоке [16, 23].

В связи с изменением климата, все больший интерес вызывают исследования, раскрывающие особенности трансформации горных пород при участии микроорганизмов в условиях оттаивания ММП и сезонного замерзания/оттаивания грунтов [38]. Яркими представителями устойчивости к низким температурам являются бактерии родов *Pseudomonas* и *Bacillus*. Роль бактериальных антифризов могут выполнять белки и некоторые

полисахариды [10, 30]. Установлено, что температура окружающей среды – важный фактор, влияющий на разрушение гранита при участии *Bacillus subtilis* [34]. В результате эксперимента на биоразрушение базальта, гранита и гнейса установлено, что температура влияет на микробное выветривание пород и обуславливает изменение последовательности извлечения элементов [37].

Важные биогеохимические процессы в Бурейском водохранилище (БВДХ) происходят под влиянием сезонного колебания уровней воды, когда переувлажненные горные породы на берегах могут циклически замерзать, оттаивать и затем разрушаться. До настоящего времени продолжается дискуссия [2, 5, 6] о причинах схода гигантского зимнего оползня, который произошел в декабре 2018 г. при -32°C с левого берега БВДХ. Этот оползень – один из крупнейших в мире, представляет собой уникальное природное явление в водоеме, покрытом льдом. Его обрушение вызвало высокую волну цунами [3, 7]. Большая скорость прохождения волны и физические свойства почвы (пористость, способность к размоканию, повышенная пластичность) привели к полному разрушению почвенного покрова фактически до скальных пород [7]. Глубина водохранилища на месте схода оползня составляет более 70 м. По расчетам специалистов основная часть оползня находится под водой. Описание геологических, геоморфологических и геофизических особенностей Бурейского оползня представлены в ряде работ [2, 3, 5–7].

Основная цель исследований состояла в оценке влияния циклического замораживания/оттаивания (ЦЗО) и диапазона температуры оттаивания на изменение элементного состава водных растворов и микроструктуры поверхности минеральных образцов. В нашей экспериментальной работе (*in vitro*) образцы обломочного материала тела оползня используются в качестве модели для исследования абиогенных и биогенных факторов, влияющих на трансформацию (разрушение, растворение) и вторичное образование минералов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика объекта исследования. Водосборная площадь БВДХ приурочена к области развития островной, прерывистой и сплошной многолетней мерзлоты. В пределах Бурейского хребта мощность многолетнемерзлых толщ достигает 200 м при температуре пород до -3°C . Мерзлота встречается на низинных участках водоразделов и склонах рек северной экспозиции. Предпосылками опасных экзогенных геологических процессов, включая оползни, являются сильная раздробленность скальных пород и густая сеть тектонических нарушений [5]. Размельчение пород происходило в результате непосредственно произошедшего оползня и после проведенных

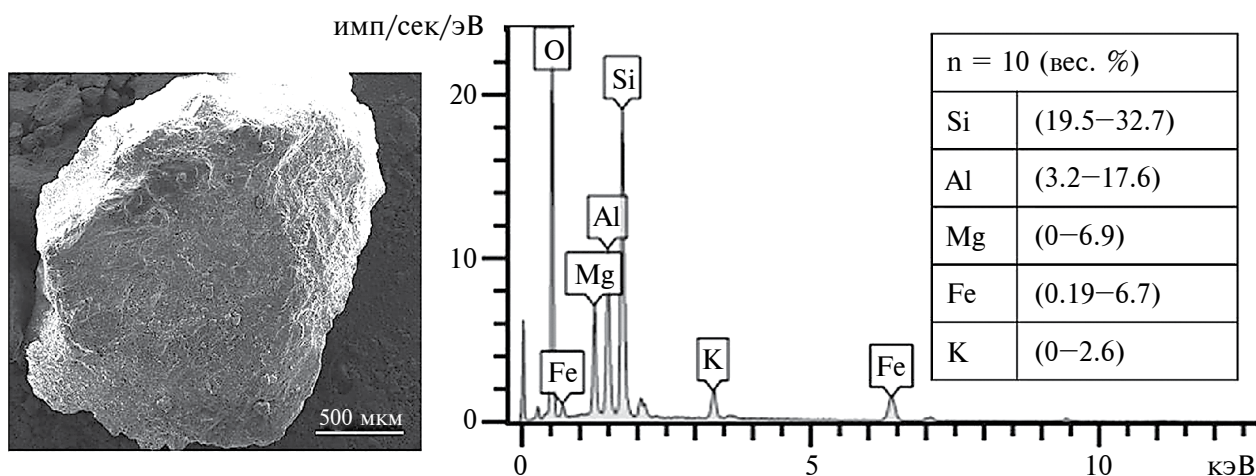


Рис. 1. Общая характеристика элементного состава образцов ОМ, использованных в эксперименте.

взрывных работ для восстановления проточности в водохранилище [4]. Амплитуда сезонного колебания уровней воды в БВДХ между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляет 20 м. В этом “флуктуационном поясе” происходят трансформация и разрушение горных пород при различной степени их обводненности и разном диапазоне температур.

В районе БВДХ более 80% площади сложено интрузивными породами преимущественно кислого состава. На левом борту БВДХ, где произошёл гигантский оползень, развиты палеозойские интрузии в виде гранитов [5]. Субстрат тела оползня представлен мета-андезитами протерозоя с прорвавшей их экструзией граносиенит-порфиров [3]. Часть тела оползня на северо-западе сложена обломками различного размера (до многометровых глыб) в разной степени выветрелых и деформированных мета-андезитов, а на самом узком участке – обломками свежих, массивных мета-андезитов размером от 10 см до 3 м. Многие глыбы несут выраженные следы гранитизации (гнезда, жильные выделения и скопления кристаллов плагиоклаза и калиевого шпата) [3].

Граниты характеризуются сложной морфологией минералов, входящих в состав этой породы

и высокой микротрещиноватостью. Размер зерен гранитов составляет от 0.2 до 5 мм. Среди крупных зерен гранитов чаще всего встречается полевой шпат с пластинчатой формой кристаллов. К минералам, имеющим размер зерен 0.4–1.0 мм, относится биотит с чешуйчатой структурой поверхности [12]. В основу химического состава гранитов входят SiO_2 68–72%; Al_2O_3 15–18%; Na_2O_3 –6%; Fe_3O_4 1–5%; CaO 1.5–4%; MgO до 1.5% и другие микропримеси.

Описание эксперимента. В качестве образцов использовали обломочный материал (ОМ) тела Бурейского оползня, который просеяли через гранулометрическое сито для получения фракции размером 3 мм. По данным электронного зондирования 10 отдельных зерен из отобранной фракции ОМ установлено, что содержание элементов варьирует в следующих пределах (вес. %): Si (19.5–32.7); Al (3.2–17.6); Mg (0–6.9); Fe (0.19–6.7); K (0–2.6). Образцы, использованные в эксперименте, согласно доминирующему элементу можно условно отнести к кремнийсодержащим минералам (рис. 1).

Перед началом эксперимента образцы отобранной фракции ОМ прокаливали в сушильном шкафу в течение 1 час при температуре 110°C. Навески

Таблица 1. Этапы экспериментального исследования обломочного материала тела оползня на Бурейском водохранилище

Образец	1 этап		2 этап		
Обломочный материал тела оползня, фракция 3 мм	Сухой образец	Замораживание всех образцов при −18°C, 30 сут	ЦЗО образцов при разной температуре оттаивания, 5 циклов, через 7 сут	4°C	
	Образец + вода деионизированная			23°C	
				Образец + среда с пептоном	4°C
					23°C
				23°C	

образца (5 г) загружали в стерильные одноразовые медицинские полимерные контейнеры на 50 мл с крышкой (Berimed, ООО “ЕВРОКЭП”, РФ). Для проведения экспериментальных исследований ЦЗО подготовлены три варианта образцов (табл. 1): сухие, залитые 50-ю мл деионизированной воды и залитые 50-ю мл питательной среды, содержащей 0.2% низкомолекулярных пептидов (пептон).

Деионизированная вода (H_2O/D) для эксперимента была подготовлена на приборе Barnstead EASYpure II (фирма Thermo Scientific, США). По химическим и биологическим показателям она имела следующие характеристики: содержание общего органического углерода после финального фильтра (размер пор 0.2 мкм) не более 5–10 ppb; содержание бактериальных клеток меньше 1 КОЕ/мл.

Первое замораживание длилось 30 сут в морозильной камере при температуре $-18^\circ C$. Две группы образцов отличались условиями оттаивания:

- оттаивание в холодильнике от $-18^\circ C$ до $+4^\circ C$;
- быстрое оттаивание при комнатной температуре от $-18^\circ C$ до $+23^\circ C$.

Все образцы прошли 5 циклов поочередного ЦЗО через 7 сут. Общая продолжительность эксперимента составила 80 сут.

Для дальнейших анализов использовали растворы, отобранные из верхней части контейнера с помощью шприцевых мембранных фильтров с диаметром пор 0.45 мкм (фирма Navigator, КНР). Пробы водных растворов консервировали свежеприготовленным раствором HNO_3 , очищенной методом изотермической перегонки, в соотношении 1 : 1 (HNO_3 ; H_2O). В полипропиленовые пробирки на 50 мл вносили 3 мл раствора HNO_3 и 100 мкл азотнокислого раствора In в концентрации 20 ppm, в качестве внутреннего стандарта. Анализировали водорастворимые формы химических элементов методом ICP-MS на приборе ELAN9000 (фирмы Perkin Elmer, США) по стандартным методикам (ПНД Ф 14.1: 2.4.143–98, 2011).

Предварительно высушенные в стерильном боксе при комнатной температуре образцы помещали на предметные столики с токопроводящей углеродной пленкой и напыляли слоем платины (~ 15 – 20 нм) для формирования поверхностного электропроводящего слоя и отвода электрического заряда, образующегося при электронной бомбардировке.

Исследование отдельных микроструктур на поверхности частиц образцов ОМ после ЦЗО и определение элементного состава в локусах (электронное зондирование) проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA 3 LMN (TESCAN, Чехия), оснащенный приставкой для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) с кремний-дрейфовым рентгеновским детектором X-MAX 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Электронно-микроскопическое фотографирование объектов проводили в режиме вторичных электронов (SE-детектор) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Определение элементного состава экспериментальных растворов и микроструктуры поверхности образцов ОМ проводили в Хабаровском инновационно-аналитическом центре коллективного пользования на базе Института тектоники и геофизики ДВО РАН.

Доказательство жизнеспособности микроорганизмов. Перед ЦЗО из суспензии размельченного ОМ на азотсодержащей питательной среде (РПА – рыбо-пептонный агар) были выделены палевые, слизистые бактериальные колонии разного размера. Согласно морфологии клеток (короткие, спорообразующие палочки) и окраске по Граму, эти грамположительные бактерии условно отнесены к представителям рода *Bacillus*. На разбавленной питательной среде (РПА:10) росли мицелиальные колонии, характерные для актиномицетов рода *Streptomyces*.

Через 30 сут замораживания образцов ОМ при $-18^\circ C$ был произведен посев суспензии методом “штриха” из вариантов с деионизированной водой (H_2O/D) и пептоном на плотную питательную среду, а частицу сухого образца помещали

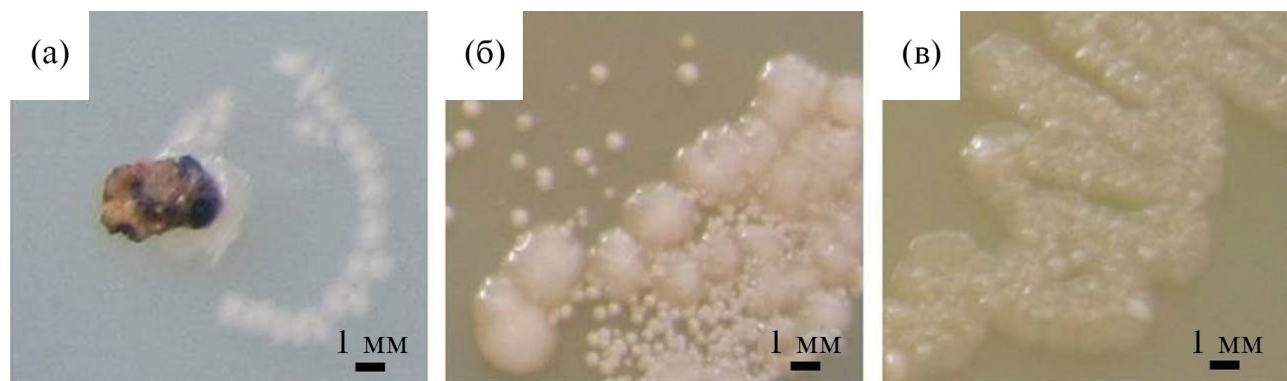


Рис. 2. Доказательство жизнеспособности микроорганизмов после 30 сут замораживания при $-18^\circ C$ образцов ОМ: а – сухой образец; б – образец в H_2O/D ; в – образец в присутствии пептона.

Таблица 2. Выщелачивание химических элементов из образцов ОМ при разной температуре оттаивания и в присутствии органических веществ

Условия эксперимента		Элементы, мкг/л							
		Al	Ca	Mg	Fe	Mn	As	Hg	Pb
H ₂ O/Д	+4°C	17.91	952.2	412.5	<0.001	2.23	<0.001	0.02	2.22
	+23°C	43.9	907.2	370.2	<0.001	6.54	<0.001	0.003	<0.001
Пептон	+4°C	69.51	9824.2	17706.4	99.46	27.39	3.01	0.08	1.06
	+23°C	131.91	8716.2	19738.7	79.03	75.17	8.53	0.19	<0.001

непосредственно на поверхность среды (рис. 2). Через 7 сут вокруг частицы сухого образца (см. рис. 2а) на плотной питательной среде обнаружили колонии микроорганизмов с характерным для актиномицетов мицелиальным ростом, которые могли сохранять свою жизнеспособность при замораживании, образуя споры. В вариантах с H₂O/Д и с добавкой пептона в качестве источника С и N свою жизнеспособность сохраняли бактерии – продуценты экзополисахаридов, образующие слизистую биомассу (см. рис. 2б, в). В период оттаивания эти микроорганизмы проявляли активность и взаимодействовали с поверхностью образцов ОМ, участвуя в выщелачивании элементов в водную среду.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количественная оценка влияния микроорганизмов на скорость растворения минералов является одной из нерешенных задач при моделировании взаимодействия воды с горными породами [32].

Анализ элементного состава растворов в вариантах эксперимента с образцами ОМ, помещенными в H₂O/Д, показал, что концентрации многих металлов были ниже пределов обнаружения прибора (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi). Условия размораживания не оказывали влияния на особенности распределения данных химических элементов (табл. 2). Однако в растворах, отобранных после 5 ЦЗО при температуре оттаивания 23°C, отмечено увеличение концентрации водорастворимых форм Al и Mn. Содержание водорастворимой формы железа в H₂O/Д было ниже пределов обнаружения. В исследованиях биогенной трансформации базальтов, установлено, что растворимая форма Fe²⁺, поступившая из зерен базальта, была немедленно ферментативно окислена *Acidithiobacillus ferrooxidans* до Fe³⁺ [31]. Для термокарстовых вод установлено, что после нескольких циклов замораживания/оттаивания происходит снижение содержаний Fe, Al и Mn, за счет осаждения оксигидроксидов этих металлов [27]. В условиях кислой среды микробные комплексы плохо развивались и не оказывали

влияния на кристаллическую решетку силикатных пород [35].

Содержание халькофильных элементов в H₂O/Д зависело от температуры оттаивания (см. табл. 2). Так Hg и Pb присутствовали в повышенных концентрациях в растворах при более длительном оттаивании при температуре +4°C. При анализе валового содержания ртути и свинца в образцах ОМ оползня установлены значительные концентрации этих элементов (4.07 мкг/г и 25.28 мкг/г соответственно). Этот факт может служить предпосылкой повышенного содержания этих элементов в воде вокруг оползня в зимне-весенний период. Содержание As в этом варианте эксперимента коррелировало с поведением железа, это может быть связано с его адсорбцией на поверхности частиц совместно с нерастворимой формой Fe. Известно, что в природных водах As может адсорбироваться на оксигидроксидах Fe [14].

В вариантах эксперимента с пептоном установлены значительные отличия содержания химических элементов по сравнению с предыдущим вариантом. Так, для петрогенных металлов Al, Mg, Fe, Mn и халькофильных элементов As, Hg за исключением Pb наблюдали значительное увеличение концентраций в растворе при 23°C. Содержание Pb в двух вариантах экспериментального раствора при быстром оттаивании было ниже пределов обнаружения. Из табл. 2. видно, что в присутствии пептона (источник С и N) не зависимо от температурного диапазона оттаивания происходит активный процесс выщелачивания элементов за счет метаболизма микроорганизмов.

Распределение содержания Hg *in vitro* отражает зависимость металлоида от присутствия ОВ. Так в вариантах с добавлением пептидов концентрация Hg увеличивалась более существенно при температуре 23°C. Подобная зависимость была установлена ранее на фронте таяния ММП с максимальной толщиной активного слоя, где могло происходить усиленное образование ртутьсодержащего взвешенного вещества [21]. Полученные данные не противоречат исследованиям других авторов. Так было доказано, что бактерии могут существенно влиять на скорость растворения

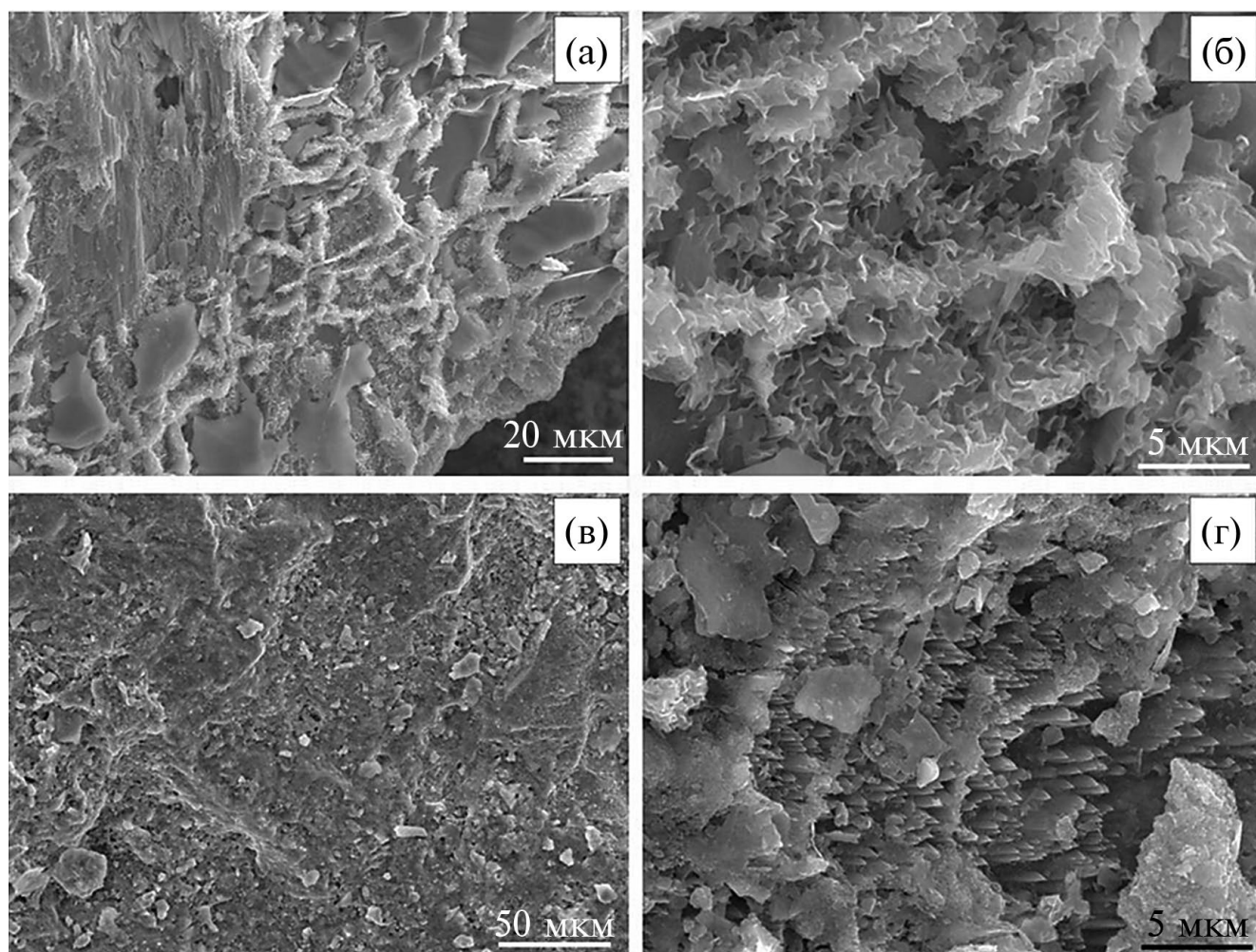


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности образца ОМ в деионизированной воде при температуре оттаивания: а, б – 4°C (×2000; ×10000); в, г – 23°C (×1000; ×10000).

алюмосиликатов, оксидов Al и Fe в условиях наземных экосистем [39]. Например, при исследовании трансформации оливина было показано, что в нейтральных средах в присутствии ОВ бактериальные биопленки оказывают выраженное влияние на его растворение [37]. Некоторые бактериальные метаболиты и продукты лизиса клеток образуют комплексы с Al^{3+} на поверхности минералов и в водном растворе, способствуя разрыву связей Al–O в кристаллической решетке несмотря на то, что экзополисахариды могут ингибировать скорость растворения некоторых элементов, блокируя участки отслоения катионов с поверхности минерала [19]. Кроме того, выделение отдельными штаммами бактерий фенолов и органических кислот приводит к образованию комплексных соединений с двухвалентными металлами. Например, штаммы *Burkholderia* sp. и *Aeromonas* sp. повышали растворимость Ca и Mg из силикатной матрицы [29].

Изменение микроструктуры поверхности образцов ОМ. С использованием метода СЭМ было показано, что трансформация образцов гранита

связана с минеральным составом, морфологией минералов и взаимодействием между минеральными частицами. Авторы [12] считают, что микротрещины приводят к разрыву по плоскостям спайности гранитных минералов под воздействием внешних сил, не называя их. Однако другие исследователи [13] пришли к выводу, что изменение температуры не является важным фактором разрушения горных пород без присутствия влаги, тогда как присутствие в поровом пространстве воды в твердой или жидкой фазе, играет ключевую роль в процессах разрушения (дезинтеграции) породы.

В наших экспериментах в результате ЦЗО сухой породы при разной температуре оттаивания поверхность частиц изменялась незначительно. На СЭМ-изображениях поверхность частиц образцов ОМ в большей степени покрыта чешуйчатыми микроструктурами.

Мы предполагали, что, используя H_2O/D можно получить более четкий ответ о влиянии непосредственно влаги на трансформацию поверхности

образца ОМ при ЦЗО. На СЭМ-изображениях (рис. 3) видно, что микроструктура поверхности частиц отличалась при разной температуре оттаивания.

Особенно заметны явные различия при увеличении $\times 10000$ (см. рис. 3б, г). При температуре оттаивания в 4°C отмечена повышенная эрозия поверхности частиц в виде микроскладок. Подобные “гофрированные” микроструктуры, некоторые авторы называют волнистыми кристаллами монтмориллонита [11], или идентифицируют как волокнистый иллит [9]. При 23°C отмечено образование разнообразных изоморфных микроструктур, отличающихся непостоянством элементного состава. Столбчатые микроструктуры представлены следующими основными элементами (вес. %): Si-20.3; Ca-12.1; Mg-7.7; Fe-5.9; Al-1.8. Среди пластинчатых микроструктур доминировали по вес. % либо Si (21.4), либо Fe (53.9). Рыхлые структуры напоминали биопленки с аккумулярованными в них различными элементами, включая фосфор.

Хорошо выраженные на СЭМ-изображениях ячеистые микроструктуры (см. рис. 3б) чаще всего характерны для смектита, хотя формирование иллита тоже связывают с образованием волокнистой текстуры. Например, на периферии пластинчатых частиц аутигенного иллита иногда формируются решетчатые или волокнистые микроструктуры, похожие на смектит. Однако после обработки монтмориллонита пресной водой происходила морфологическая трансформация агрегатов неправильной ячеистой формы в аморфный гель [44].

Превращение глинистых минералов в другие фазы довольно сложный процесс. Под влиянием различных физико-химических и биогенных факторов может происходить дезинтеграция пород, затем измельчение, растворение минералов и осаждение новых фаз. Мы предполагаем, что эти микроструктурные различия могут быть связаны с функциональным развитием разных групп литотрофных микроорганизмов, имеющих свои температурные предпочтения и обладающих способностью продуцировать экзополимерные соединения. Эти метаболиты способствуют лучшей адгезии бактериальных клеток к поверхности, что приводит к разрушению кристаллической решетки и выщелачиванию отдельных элементов в водную среду. Выше было показано (см. табл. 2), что в водном растворе состав элементов и их концентрация зависели от температуры оттаивания, повлиявшей на метаболизм микроорганизмов.

В нашем эксперименте бактериальный вклад в трансформацию поверхности частиц ОМ был продемонстрирован в варианте, содержащем в водном растворе низкомолекулярные пептиды, которые выступали в качестве источника С и N для микроорганизмов. После ЦЗО и температуре оттаивания 4°C на СЭМ-изображениях (рис. 4)

были обнаружены сформированные микроколонины бактерий, а при 23°C на силикатной матрице разнообразные биогенные микроструктуры с повышенным содержанием С. Можно предположить, что при повышении температуры происходили более существенные преобразования поверхности образцов ОМ бактериальными биопленками. Об этом свидетельствуют снижение доли кремния и повышение содержания железа в биогенных микроструктурах на минеральной поверхности.

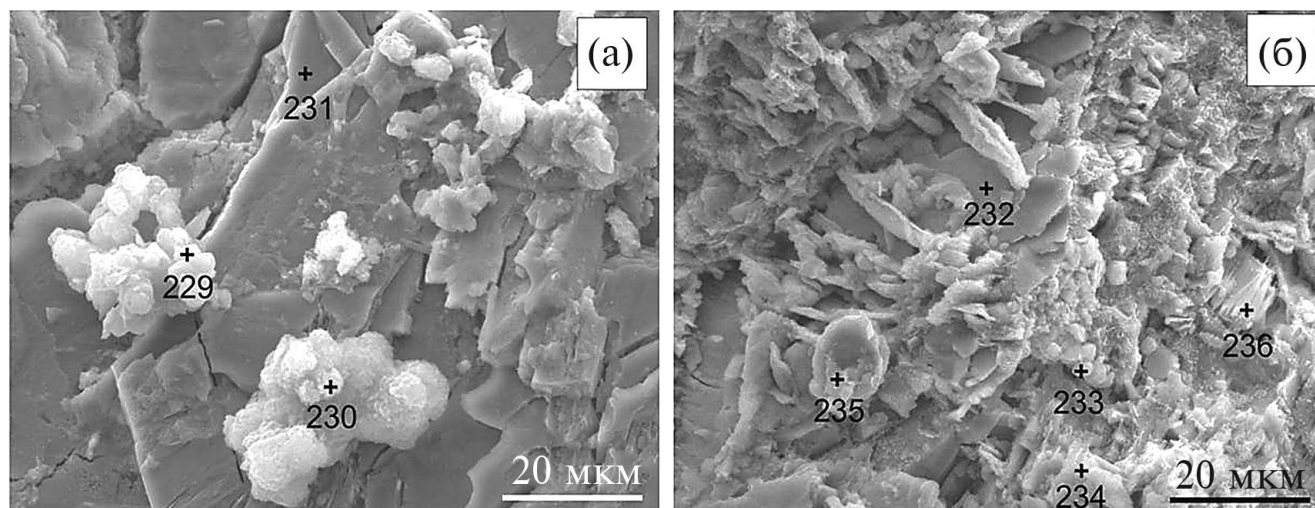
В результате проведенных нами исследований отмечены существенные различия в биовыщелачивании элементов из кремнийсодержащих минералов, присутствующих в образцах ОМ оползня в варианте с азотсодержащими ОВ и при температуре быстрого оттаивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В водных объектах циркумполярных регионов, особенно в зонах, дренирующих оттаивающие почвы, не вызывает сомнения аллохтонный генезис органических веществ [33, 24]. Значительный эффект от поступления ОВ с поверхностным стоком наблюдали в водоемах при оттаивании ММП и обнажении горных пород [43]. Однако риски загрязнения природных вод водохранилища от поступающих с поверхностным стоком ОВ и различных элементов возрастают не только вследствие таяния ММП в зоне влияния Бурейской ГЭС. “Горячей точкой” на неопределенный период времени будет выступать место локализации зимнего оползня. Ухудшение экологического благополучия на БВДХ связано с несколькими причинами: это значительный объем горных пород тела оползня, погруженных в воду; большое количество затопленной древесины после прохождения волны цунами и снос верхнего слоя почвы с берегов, включая терригенные органические вещества.

Проведенные исследования трансформации кремнийсодержащих минералов *in vitro* при разном сочетании абиотических условий свидетельствуют о важной роли микробиологического фактора. Даже в период ледостава при взаимодействии горных пород с водой может происходить разрушение кристаллической решетки минералов, и в воду вокруг оползня будут поступать различные литогенные элементы. Для БВДХ этот процесс может существенно меняться при сезонных переходах температурного режима.

Экспериментально показано, что в результате циклического заморзания/оттаивания в зависимости от температуры оттаивания и присутствия ОВ метаболизм микроорганизмов-деструкторов может существенно изменяться. Установлено, что микробный автохтонный пул, присутствующий на ОМ тела оползня, способен проявлять активность даже в отсутствии легкодоступных ОВ. Так



Элементы/ спектры	229 МБ	230 МБ	231 фон	232 Фон	233 СФ	234 КА	235 ЧМ	236 СП
C	22.8	26.3	-	-	17.8	13.2	14.4	13.7
Si	5.6	4.9	22.7	19.5	6.9	14.2	11.9	13.1
Al	5.3	2.8	10.3	16.9	4.4	7.6	7.7	2.9
Fe	0.9	0.4	0.2	2.9	3.4	4.9	7.1	3.4
Ca	6.4	5.5	1.7	-	19.9	0.6	-	6.1
P	4.1	3.6	-	-	7.8	-	-	-
O	53.1	53.4	57.3	60.1	35.2	54.3	48.5	55.1

Рис. 4. СЭМ-изображение и элементный состав отдельных локусов поверхности частицы ОМ в водном растворе с пептоном после циклического заморозания (-18°C) и оттаивании при температуре: а – 4°C (спектры 229–231); б – 23°C (спектры 232–236). МБ – микроколонины бактерий, СФ – сфероиды; КА – коллоидные агломераты; ЧМ – чешуйчатая микроструктура; СП – стопка из пластинок.

при взаимодействии образцов ОМ тела оползня с деионизированной водой в условиях циклического заморозания/оттаивания с помощью сканирующей электронной микроскопии получены доказательства изменения микроструктуры их поверхности под влиянием образующихся биопленок литотрофных бактерий.

Максимальный эффект трансформации поверхности образцов при заморозании/оттаивании наблюдали в присутствии легкодоступного источника углерода и азота, представленного низкомолекулярными пептидами. При этих условиях в водную среду из минеральной матрицы в значительном количестве поступали Al, Mg, Mn, As и Hg. Яркое выраженное различие в поведении ионов Fe оказывали такие факторы, как деионизированная вода и низкомолекулярные биодоступные ОВ. В результате выветривания горных пород водные экосистемы в зависимости от динамики биогеохимических процессов могут быть лимитированы ионами железа, которые как известно играют важную роль в биопродуктивности водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушакова А.М., Лысак Л.В., Качалкин А.В. и др. Трансформация микробных комплексов в компонентах почвенных конструкций разного генезиса (почва, торф, песок) при процессах замораживания–оттаивания // Микробиология. 2021. Т. 90. № 2. С. 166–178.
2. Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В. и др. Бурейский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // ГеоРиск. 2019. Т. XIII. № 4. С. 18–30.
3. Коковкин А.А. Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования // Отечественная геология. 2020. № 4–5. С. 48–63.
4. Кондратьева Л.М., Литвиненко З.Н., Филиппова Г.М. Экологический риск образования летучих органических веществ после крупного оползня // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. 2020. № 3. С. 167–174.
5. Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. 2019. № 3. С. 12–20.
6. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурей и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестник

- Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 2. С. 35–44.
7. Махинов А.Н., Махинова А.Ф., Левшина С.И. Оценка смыва водно-ледяным цунами почвенного покрова и качество воды в районе оползня на Бурейском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 64–73.
 8. Andres N., Badoux A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends // Journal of Flood Risk Management. 2018. e12510 (12 pp.).
 9. Christidis G. Industrial clays // EMU Notes in Mineralogy. 2011. Chapter 9. P. 341–414.
 10. Dreischmeier K., Budke C., Wiehemeier L. et al. Boreal pollen contain ice-nucleating as well as ice-binding “antifreeze” polysaccharides // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 1–13.
 11. Fesharaki O., Garcia-Romero E., Cuevas-Gonzalez J., Lopez-Martinez N. Clay mineral genesis and chemical evolution in the Miocene sediments of Samosaguas, Madrid Basin, Spain // Clay Minerals. 2007. V. 42. P. 187–201.
 12. Gao M., Li T., Zhu J., Yin H., Yang Y. An Analysis of Relationship between the Microfracture Features and Mineral Morphology of Granite // Advances in Civil Engineering. 2021. Article ID4765731. <https://doi.org/10.1155/2021/4765731>
 13. Garcia B., Lemelle L., Rose-Koga E. et al. An experimental model approach of biologically-assisted silicate dissolution with olivine and *Escherichia coli* – Impact on chemical weathering of mafic rocks and atmospheric CO₂ drawdown // Appl. Geochem. 2013. V. 31. P. 216–227.
 14. Guenet H., Davranche M., Vantelon D. et al. Evidence of organic matter control on As oxidation by iron oxides in riparian wetlands // Chemical Geology. 2016. V. 439. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.023>
 15. Gudbrandsson S., Wolff-Boenisch D., Gislason S.R., Oelkers E.H. An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 ≤ pH ≤ 11 and temperatures from 5 to 75°C // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 5496–5509.
 16. Hou N., Wen L., Cao H., Liu K., An X., Li D., Wang H., Du X., Li Ch. Role of psychotrophic bacteria in organic domestic waste composting in cold regions of China // Bioresour Technol. 2017. V. 236. P. 20–28.
 17. Keuschnig C., Larose C., Rudner M. et al. Reduced methane emissions in former permafrost soils driven by vegetation and microbial changes following drainage // Global Change Biology. 2022. V. 28 (10). P. 3411–3425.
 18. Kong L. W., Zeng Z. X., Bai W., Wang M. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslids occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. V. 77. N. 4. P. 1491–1503.
 19. Lee J.-U. and Fein J.B. Experimental study of the effects of *Bacillus subtilis* on gibbsite dissolution rates under near-neutral pH and nutrient-poor conditions // Chem. Geol. 2000. V. 166. P. 193–202.
 20. Li T., Kong L., Liu B. The California Bearing Ratio and Pore Structure Characteristics of Weakly Expansive Soil in Frozen Areas // Appl. Sci. 2020. V. 10. e 7576.
 21. Lim A.G., Sonke J.E., Krickov I.V. et al. Enhanced particulate Hg export at the permafrost boundary, western Siberia // Environmental Pollution. 2019. V. 254. e 113083.
 22. Luo J., Tang L., Ling X., Geng L. Experimental and analytical investigation on frost heave characteristics of an unsaturated moderately expansive clay // Cold Reg. Sci. Technol. 2018. V. 155. P. 343–353.
 23. Manyapu V., Lepcha A., Sharma S.K., Kumar R. Role of psychotrophic bacteria and cold-active enzymes in composting methods adopted in cold regions. Chapter One // Advances in Appl. Microbiology. 2022. V. 121. P. 1–26.
 24. Muster S., Roth K., Langer M. et al. PerL: A circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // Earth Syst. Sci. Data. 2017. V. 9. P. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
 25. O'Donnell J.A., Aiken G.R., Walvoord M.A. et al. Using dissolved organic matter age and composition to detect permafrost thaw in boreal watersheds of interior Alaska // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2014. V. 119. P. 2155–2170. <https://doi.org/10.1002/2014JG002695>
 26. Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions // Geomorphology. 2019. V. 340. P. 116–128.
 27. Payandi-Rolland D., Shirokova L.S., Labonne F. et al. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands // Chemosphere. 2021. V. 279. e 130510.
 28. Puente M.E., Rodriguez-Jaramillo M.C., Li C.Y., Bashan Y. Image analysis for quantification of bacterial rock weathering // J. Microbiol. Methods. 2006. V. 64. P. 275–286.
 29. Santi L.P., Goenadi D.H. Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate solubilizing bacteria // Menara Perkebunan. 2017. V. 85 (2). P. 95–104
 30. Schwidetzky R., Lukas M., YazdanYar A., Kunert A.T., et al. Specific Ion–Protein Interactions Influence Bacterial Ice Nucleation // Chem. Eur. J. 2021. V. 27. P. 7402–7407.
 31. Sekerci F., Balci N. Microbial Acid Sulfate Weathering of Basaltic Rocks: Implication for Enzymatic Reactions // Aquat. Geochem. 2022. V. 28. P. 155–184.
 32. Shirokova L.S., Bénézeth P., Pokrovsky O.S. et al. Effect of the heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* on olivine dissolution kinetics and implications for CO₂ storage in basalts // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 80. P. 30–50.
 33. Solomon C.T., Jones S.E., Weidel B.C. et al. Ecosystem Consequences of Changing Inputs of Terrestrial Dissolved Organic Matter to Lakes: Current Knowledge and Future Challenges // Ecosystems. 2015. V. 18. P. 376–389.
 34. Song W., Ogawa N., Oguchi C.T., Hatta T., Matsukura Y. Effect of *Bacillus subtilis* on granite weathering: a laboratory experiment // Catena. 2007. V. 70. P. 275–281.
 35. Stockmann G.J., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. et al. Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* affect basaltic glass dissolution rates? // Chem. Geol. 2011. V. 296–297. P. 1–18.
 36. Struvay C., Feller G. Optimization to Low Temperature Activity in Psychrophilic Enzymes // Int. Journal of Molecular Sciences. 2012. V. 13(9). P. 11643–11665.
 37. Štyriaková I., Štyriak I., Oberhänsli H. Rock weathering by indigenous heterotrophic bacteria of *Bacillus spp.* at different temperature: a laboratory experiment // Mineralogy and Petrology. 2012. V. 105 (3–4). P. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0201-2>
 38. Tribelli P.M., López N.I. Reporting Key Features in Cold-Adapted Bacteria // Life. 2018. V. 8. № 8. <https://doi.org/10.3390/life8010008>
 39. Uroz S., Calvaruso C., Turpault M.-P., Frey-Klett P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms // Trends Microbiol. 2009. V. 17. P. 378–387.
 40. Vincent W.F., Lemay M., Allard M. Arctic permafrost landscapes in transition: Towards an integrated Earth system approach // Arct. Sci. 2017. V. 3. P. 39–64. [doi:10.1139/as-2016-0027](https://doi.org/10.1139/as-2016-0027)

41. Wang Y., Li C.H., Liu H., Han J.Q. Fracture failure analysis of freeze–thawed granite containing natural fracture under uniaxial multi-level cyclic loads // *Theoretical and Appl. Fracture Mechanics*. 2020. V. 110. e 102782. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102782>
42. Wang Y., Yi X., Gao S., Liu H. Laboratory Investigation on the Effects of Natural Fracture on Fracture Evolution of Granite Exposed to Freeze-Thaw-Cyclic (FTC) Loads // *Geofluids*. 2021. Article ID6650616. 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6650616>
43. Wauthy M., Rautio M., Christoffersen K.S., Forsstrom L. et al. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw // *Limnology and Oceanography Letters*. 2018. N. 3. P. 186–198.
44. Wilson M.J., Wilson L., Patey I. The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights // *Clay Minerals*. 2014. V. 49. P. 147–164.
45. Yang Z., Jianhang Lv., Shi W., Zhang Q. et al. Model test study on stability factors of expansive soil slopes with different initial slope ratios under freeze–thaw conditions // *Appl. Sci*. 2021. V. 11. e 8480. <https://doi.org/10.3390/app11188480>.
46. Yang Y., Zhang N., Wang J. Study on the Effect of Negative Temperature Change on the Fracture Morphology of Granite under Impact // *Geofluids*. 2022. Article ID4918680. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/4918680>
47. Zhang D., Chen A.Q., Xiong D.H., Liu G.C. Effect of moisture and temperature conditions on the decay rate of purple mudstone in south-western China // *Geomorphology*. 2013. V. 182. P. 125–132.
48. Zheng Q., Shen S-L., Zhou A-N., Cai H. Investigation of Landslides that Occurred in August on the Chengdu–Kunming Railway, Sichuan, China // *Geosciences*. 2019. V. 9. № 12. e 497.

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL STUDIES OF CLASTIC MATERIAL FROM THE BUREYA LANDSLIDE AFTER CYCLIC FREEZING/THAWING IN VITRO

L. M. Kondratyeva^{a, #}, E. M. Golubeva^{b, c, ##}, N. S. Konovalova^{b, ###}

^a*Institute of Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Dikopol'tseva 56, Khabarovsk, 680000 Russia*

^b*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Kim Yu Chen 65, Khabarovsk, 680000 Russia*

^c*Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya 136, Khabarovsk, 680035 Russia*

[#]*E-mail: kondratevalm@gmail.com*

^{##}*E-mail: evg8302@yandex.ru*

^{###}*E-mail: turtle_83@rambler.ru*

The paper presents the results of experimental study (*in vitro*) of the transformation of clastic material (CM) sampled from a landslide body at the Bureya water reservoir. CM samples are considered as a model for assessing the influence of abiogenic and biogenic factors on the transformation (destruction, dissolution) of Si-containing minerals under various conditions of cyclic freezing/thawing, i.e., the dry sample; the samples placed in deionized water and in the presence of a solution of low molecular weight peptides. Freezing was carried out at a temperature of –18 °C, and thawing at a different temperature range (+4 °C and +23 °C). The elemental composition of aqueous solutions was determined by ICP-MS, and the microstructure of the CM surface was determined using scanning electron microscopy. As a result of 5 cycles after 7 days of freezing/thawing of CM samples in deionized water, the content of water-soluble forms of chemical elements (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi, As) was below the detection limits of the device (< 0.001 µg/l). However, in the presence of a nutrient medium with peptone and a natural microbial consortium that retained its viability, the concentrations of a number of elements (Al, Ca, Mg, Fe, Mn, As, Hg) in the aquatic environment increased significantly. According to SEM images, a significant change in the microstructure of the surface of the samples CM occurred regardless of the thawing temperature when microorganisms were activated by low-molecular peptides. The formation of biofilms on the surface of CM grains was accompanied by the formation of various isomorphic microaggregates.

Keywords: *landslide, freeze/thaw, Si-containing minerals, elemental composition, SEM images*

REFERENCES

- Glushakova, A.M., Lysak, L.V., Kachalkin, A.V., et al. [Transformation of microbial complexes in the component of soil constructions of various genesis (soil, peat, sand) upon freezing/thawing]. *Mikrobiologiya*, 2021, vol. 90, no. 2, pp. 166–178. (in Russian)
- Zerkal', O.V., Makhinov, A.N., Kudymov, A.V., et al. [Bureya landslide on December 11, 2018. Formation conditions and development mechanism specifics]. *GeoRisk*, 2019, vol. XIII, no. 4, pp. 18–30. (in Russian)
- Kokovkin, A.A. [Bureya landslide phenomenon: field investigation results and formation model]. *Otechestvennaya geologiya*, 2020, nos. 4–5, pp. 48–63. (in Russian)
- Kondratyeva, L.M., Litvinenko, Z.N., Filippova, G.M. [Ecological risk of formation of volatile organic substances after a large landslide]. *Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 167–174. (in Russian)
- Kulakov, V.V., Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroykhov, A.V. [Catastrophic landslide and tsunami in the Bureya HPP reservoir (the Amur river basin)]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 12–20 (in Russian)
- Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroykhov, A.V., Matveenko, D.V. [A major landslide in the Bureya River valley and tsunami in the Bureya HPP reservoir]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAS*, 2019, no. 2, pp. 35–44. (in Russian)
- Makhinov, A.N., Makhinova, A.F., Levshina, S.I. [Assessment of soil cover wash-off by water-ice tsunami and water quality in the area of landslide at the Bureya water reservoir]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2020, no. 11, pp. 64–73. (in Russian)
- Andres, N., Badoux, A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends. *Journal of Flood Risk Management*, 2018, e12510 (12 pp.).
- Christidis, G. Industrial clays. *EMU Notes in Mineralogy*, 2011. Chapter 9, pp. 341–414.
- Dreischmeier, K., Budke, C., Wiehemeier, L., et al. Boreal pollen contain ice-nucleating as well as ice-binding “antifreeze” polysaccharides. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, pp. 1–13.
- Fesharaki, O., Garcia-Romero, E., Cuevas-Gonzalez, J., Lopez-Martinez, N. Clay mineral genesis and chemical evolution in the Miocene sediments of Samosaguas, Madrid Basin, Spain. *Clay minerals*, 2007, vol. 42, pp. 187–201.
- Gao, M., Li, T., Zhu, J., Yin, H., Yang, Y. An analysis of relationship between the microfracture features and mineral morphology of granite. *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article ID4765731. <https://doi.org/10.1155/2021/4765731>
- Garcia, B., Lemelle, L., Rose-Kog, a E., et al. An experimental model approach of biologically-assisted silicate dissolution with olivine and *Escherichia coli* – Impact on chemical weathering of mafic rocks and atmospheric CO₂ drawdown. *Appl. Geochem.*, 2013, vol. 31, pp. 216–227.
- Guenet, H., Davranche, M., Vantelon, D., et al. Evidence of organic matter control on As oxidation by iron oxides in riparian wetlands. *Chemical Geology*, 2016, vol. 439. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.023>
- Gudbrandsson, S., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., Oelkers, E.H. An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 ≤ pH ≤ 11 and temperatures from 5 to 75°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, vol. 75, pp. 5496–5509.
- Hou, N., Wen, L., Cao, H., Liu, K., et al. Role of psychrotrophic bacteria in organic domestic waste composting in cold regions of China. *Bioresour. Technol.*, 2017, vol. 236, pp. 20–28.
- Keuschnig, C., Larose, C., Rudner, M., et al. Reduced methane emissions in former permafrost soils driven by vegetation and microbial changes following drainage. *Global Change Biology*, 2022, vol. 28 (10), pp. 3411–3425.
- Kong, L.W., Zeng, Z.X., Bai, W., Wang, M. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslides occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, vol. 77, no. 4, pp. 1491–1503.
- Lee, J.-U., Fein, J.B. Experimental study of the effects of *Bacillus subtilis* on gibbsite dissolution rates under near-neutral pH and nutrient-poor conditions. *Chem. Geol.*, 2000, vol. 166, pp. 193–202.
- Li, T., Kong, L., Liu, B. The California bearing ratio and pore structure characteristics of weakly expansive soil in frozen areas. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, e 7576.
- Lim, A.G., Sonke, J.E., Krickov, I.V., et al. Enhanced particulate Hg export at the permafrost boundary, western Siberia. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, e 113083.
- Luo, J., Tang, L., Ling, X., Geng, L. Experimental and analytical investigation on frost heave characteristics of an unsaturated moderately expansive clay. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2018, vol. 155, pp. 343–353.
- Manyapu, V., Lepcha, A., Sharma, S.K., Kumar, R. Role of psychrotrophic bacteria and cold-active enzymes in composting methods adopted in cold regions. Chapter One. *Advances in Appl. Microbiology*, 2022, vol. 121, pp. 1–26.
- Muster, S., Roth, K., Langer, M. et al. PeRL: A circum-Arctic permafrost region pond and lake database. *Earth Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
- O'Donnell, J.A., Aiken, G.R., Walvoord, M.A., et al. Using dissolved organic matter age and composition to detect permafrost thaw in boreal watersheds of interior Alaska. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, pp. 2155–2170. <https://doi.org/10.1002/2014JG002695>
- Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 2019, vol. 340, pp. 116–128.
- Payandi-Rolland, D., Shirokova, L.S., Labonne, F., et al. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands. *Chemosphere*, 2021, vol. 279, e 130510.
- Puente, M.E., Rodriguez-Jaramillo, M.C., Li, C.Y., Bashan, Y. Image analysis for quantification of bacterial rock weathering. *J. Microbiol. Methods*, 2006, vol. 64, pp. 275–286.
- Santi, L.P., Goenadi, D.H. Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate solubilizing bacteria. *Menara Perkebunan*, 2017, vol. 85 (2), pp. 95–104.
- Schwidetzky, R., Lukas, M., Yazdan, Y.A., Kunert, A.T., et al. Specific ion–protein interactions influence bacterial ice nucleation. *Chem. Eur. J.*, 2021, vol. 27, pp. 7402–7407.
- Sekerci, F., Balci, N. Microbial acid sulfate weathering of basaltic rocks: implication for enzymatic reactions. *Aquat. Geochem.*, 2022, vol. 28, pp. 155–184.
- Shirokova, L.S., Bénézet, P., Pokrovsky, O.S., et al. Effect of the heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* on olivine dissolution kinetics and implications for CO₂ storage in basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2012, vol. 80, pp. 30–50.
- Solomon, C.T., Jones, S.E., Weidel, B.C., et al. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges. *Ecosystems*, 2015, vol. 18, pp. 376–389.
- Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C.T., Hattai, T., Matsukura, Y. Effect of *Bacillus subtilis* on granite weathering: a laboratory experiment. *Catena*, 2007, vol. 70, pp. 275–281.

35. Stockmann, G.J., Shirokova, L.S., Pokrovsky, O.S., et al. Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas* reactans affect basaltic glass dissolution rates? *Chem. Geol.*, 2011, vol. 296–297, pp. 1–18.
36. Struvay, C., Feller, G. Optimization to low temperature activity in psychrophilic enzymes. *Int. Journal of Molecular Sciences*, 2012, vol. 13(9), pp. 11643–11665.
37. Štyriaková, I., Štyriak, I., Oberhänsli, H. Rock weathering by indigenous heterotrophic bacteria of *Bacillus* spp. at different temperature: a laboratory experiment. *Mineralogy and Petrology*, 2012, vol. 105 (3–4), pp. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0201-2>
38. Tribelli, P.M., López, N.I. Reporting key features in cold-adapted bacteria. *Life*, 2018, vol. 8, no. 8. <https://doi.org/10.3390/life8010008>
39. Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M.-P., Frey-Klett, P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends Microbiol.*, 2009, vol. 17, pp. 378–387.
40. Vincent, W.F., Lemay, M., Allard, M. Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach. *Arct. Sci.*, 2017, vol. 3, pp. 39–64. doi:10.1139/as-2016-0027
41. Wang, Y., Li, C.H., Liu, H., Han, J.Q. Fracture failure analysis of freeze–thawed granite containing natural fracture under uniaxial multi-level cyclic loads. *Theoretical and Appl. Fracture Mechanics*, 2020, vol. 110. e 102782. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102782>
42. Wang, Y., Yi, X., Gao, S., Liu, H. Laboratory investigation on the effects of natural fracture on fracture evolution of granite exposed to freeze-thaw-cyclic (FTC) loads. *Geofluids*, 2021. Article ID6650616. 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6650616>
43. Wauthy, M., Rautio, M., Christoffersen, K.S., Forsstrom, L. et al. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, no. 3, pp. 186–198.
44. Wilson, M.J., Wilson, L., Patey, I. The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights. *Clay Minerals*, 2014, vol. 49, pp. 147–164.
45. Yang, Z., Jianhang, Lv., Shi, W., Zhang, Q., et al. Model test study on stability factors of expansive soil slopes with different initial slope ratios under freeze–thaw conditions. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11. e 8480. <https://doi.org/10.3390/app11188480>.
46. Yang, Y., Zhang, N., Wang, J. Study on the effect of negative temperature change on the fracture morphology of granite under impact. *Geofluids*, 2022. Article ID4918680. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/4918680>
47. Zhang, D., Chen, A.Q., Xiong, D.H., Liu, G.C. Effect of moisture and temperature conditions on the decay rate of purple mudstone in south-western China. *Geomorphology*, 2013, vol. 182, pp. 125–132.
48. Zheng, Q., Shen, S-L., Zhou, A-N., Cai, H. Investigation of landslides that occurred in August on the Chengdu–Kunming railway, Sichuan, China. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no.12. e 497.