

## Биогеохимическая оценка изменения состава воды после крупного оползня в зимний период

КОНДРАТЬЕВА Л.М.<sup>1</sup>, ГОЛУБЕВА Е.М.<sup>2,3</sup>, ЛИТВИНЕНКО З.Н.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск

Адрес для переписки: evg8302@yandex.ru

**Аннотация.** Впервые в декабре 2018 г. при температуре  $-32$  °С произошел оползень с крутого берега Бурейского водохранилища (Дальний Восток России), на водосборе которого встречаются островная, прерывистая и сплошная многолетняя мерзлота. Оползень общим объемом 24.5 млн. м<sup>3</sup> полностью перекрыл бывшее русло реки Бурья, создав угрозу работе Бурейской ГЭС и затопления населенных пунктов. Для решения проблемы восстановления проточности были проведены крупномасштабные взрывные работы с использованием тротила, а также кумулятивных зарядов с гексогеном. Взрывные работы повлияли на спектр органических веществ и миграционную способность многих элементов в воде вокруг оползня. Методом газовой хроматографии в воде обнаружены метанол и метилированные производные бензола, их концентрация увеличивалась после дренажа воды сквозь тело оползня. Среди летучих органических веществ значительную долю составляли продукты трансформации высокомолекулярных природных соединений, которые принимают участие в процессах метаногенеза и метанотрофии (метанол, ацетаты, ксиллолы) и толуол, основной продукт деструкции тротила. Исследования элементного состава воды в зоне влияния оползня до и после проведения взрывных работ были проведены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ICP-MS ELAN-9000 (Perkin Elmer). Ниже тела оползня отмечено увеличение содержания Al, Fe, W, Cr и Pb. Наиболее существенные изменения качества воды произошли после проведения взрывных работ. В воде искусственного канала отмечено резкое снижение содержания элементов (Fe, Cu, Zn и Pb) и увеличение концентрации ртути.

**Ключевые слова:** оползень, многолетняя мерзлота, водохранилище, летучие органические вещества, тяжелые металлы.

## Biogeochemical assessment of changes in water composition after a large landslide in winter

KONDRATYEVA L.M.<sup>1</sup>, GOLUBEVA E.M.<sup>2,3</sup>, LITVINENKO Z.N.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Water and Ecology problems, FEB RAS, Khabarovsk

<sup>2</sup>Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk

<sup>3</sup>Federal State Educational Institution "Pacific National University", Khabarovsk

<sup>4</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

Correspondence paper: evg8302@yandex.ru

**Abstract.** For the first time in December 2018, at a temperature of 32°C below zero, on the steep bank of the Bureiskoe Reservoir (Far East, Russia) a landslide occurred. Insular, discontinuous, and continuous permafrost on the

catchment basin of the reservoir is recorded. A landslide with a total volume of 24.5 million m<sup>3</sup> completely blocked the former channel of the Bureya River. It created a threat to the operation of the Bureya Hydro-electric Power Station and flooding of settlements. Blasting operations with use of trinitrotoluene and shaped charges with hexogen were carried out for restoring the flow. Methanol and methylated benzene derivatives were detected in water by gas chromatography; its concentration increased after the water was drained through the landslide body. In the water of the artificial channel, decrease in the lithogenic elements (Fe, Cu, Zn, and Pb) content and an increase in the mercury concentration were recorded. Among the volatile organic substances, a significant portion belonged to the products of transformation of high molecular natural compounds that take part in the processes of methanogenesis and methanotrophy (methanol, acetates, and xylenes) and toluene, the main intermediate of trinitrotoluene. The studies of the elemental composition of water in the zone of influence of the landslide before and after the blasting operations were carried out by inductively coupled plasma mass spectrometry on an ICP-MS ELAN-9000 (Perkin Elmer). Below the landslide body, an increase in the content of Al, Fe, W, Cr and Pb is noted. The most significant changes in water quality occurred after the blasting operations. In the water of the artificial channel, a sharp decrease in the content of elements (Fe, Cu, Zn and Pb) and an increase in the concentration of mercury have been recorded.

**Keywords:** landslide, permafrost zone, reservoir, volatile organic compounds, heavy metals.

## Введение

К числу причин, вызывающих оползни, относят изменение климата, увеличение количества осадков, таяние многолетней мерзлоты [1] и землетрясения [2]. В китайской провинции Сычуань после землетрясения 8 августа 2017 г. были обнаружены 83 оползня [3]. Спустя два года в этой же провинции произошел гигантский оползень объемом 48 тыс. м<sup>3</sup> [4], который был вызван непрерывными ливнями. Криогенные оползни часто происходят на Аляске, севере Канады и Центральном Ямале [5]. Предполагают, что таяние многолетней мерзлоты сопровождается эмиссией метана [6]. Взрывное выделение газов за короткий период связывают с криогенными процессами и называют «криогенным вулканизмом», который также может вызывать оползни. Эффект усиливается за счет резкого замерзания воды в поровом пространстве горных пород [7]. Изучение механизмов разрушения горных пород в результате замерзания–оттаивания имеет важное значение для предотвращения разрушений инфраструктурных сооружений в холодных регионах [8]. Поступающий в водные объекты оползневый материал приводит к изменению качества воды.



**Рис. 1.** Общий вид бурейского оползня с беспилотного летательного аппарата (апрель 2019 г.). Фото А.В. Остроухова

**Fig. 1.** General view of the Bureya landslide from a drone (April 2019). Photo by A.V. Ostroukhov

Впервые на Дальнем Востоке России в декабре 2018 г. при минусовой температуре ( $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) произошел гигантский оползень с крутого берега Бурейского водохранилища (рис. 1). Оползень перекрыл бывшее русло р. Бурей выше плотины Бурейской ГЭС [9]. Возникла угроза режиму работы ГЭС и затопления поселений, расположенных выше по течению. Для решения проблемы восстановления проточности были проведены крупномасштабные взрывные работы. По данным Минобороны России для создания искусственного канала сквозь тело оползня было использовано около 260 т тротила (тринитротолуола) и подорвано около 520 комплектов кумулятивных зарядов, содержащих гексоген.

Предполагалось, что основные последствия в зоне влияния оползня на Бурейском водохранилище связаны с изменением химического состава воды за счет поступления почв, измельченных горных пород, остатков древесины после цунами, продуктов детонации во время взрывных работ и высокомолекулярных органических веществ (ОВ) из порового пространства пород, находящихся длительное время в состоянии регулярного замерзания/оттаивания.

В данной работе приводится сравнительный анализ изменения состава воды в Бурейском водохранилище в районе оползня до и после проведения взрывных работ по таким показателям, как состав летучих органических веществ (ЛОВ), содержание литогенных и токсичных элементов. Обсуждается генезис ЛОВ, образующихся в результате биогеохимических процессов.

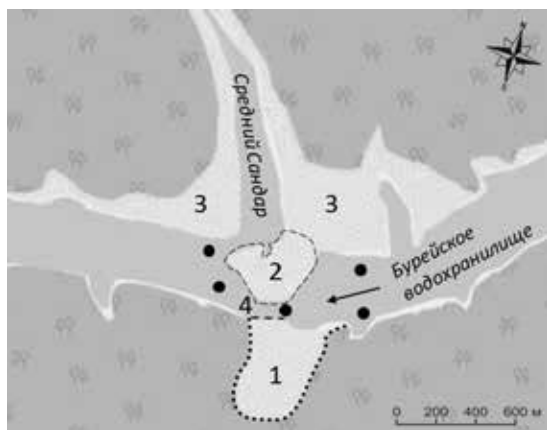
### **Объекты и методы исследования**

Водосборная площадь Бурейского водохранилища расположена на территории с очень сложными мерзлотно-гидрогеологическими условиями, развитой островной, прерывистой и сплошной многолетней мерзлотой [10]. Колебания уровней воды в водохранилище между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляют 20 м. Оползень сошел с левого берега с крутизной  $30\text{--}35^{\circ}$ . Правый берег – пологий, представляет собой террасовидную поверхность эрозионного происхождения шириной более 1 км и высотой до 50 м над современным уровнем воды. Согласно геодезическим измерениям, объем сошедшего оползня составляет 24.5 млн  $\text{м}^3$ . Объем надводной части превышает 4.5 млн  $\text{м}^3$ , основная часть оползня находится под водой. Параметры оползня: длина 800 м, высота над урезом воды от 7.5 до 46 м, глубина водохранилища на месте схода оползня более 70 м. После оползня произошло уникальное событие – образование волны, по своему механизму представляющей небольшое «речное цунами», которая уничтожила лес на обоих берегах [11]. Водный поток ломал стволы деревьев, оставляя раздробленные пни высотой до 1 м. Значительная часть деревьев обратным потоком воды была снесена в водохранилище. Вода перешла на другой берег и по долине притока Средний Сандар поднялась на 3.6 км. Согласно анализу спутниковых данных [12] в районе оползня наблюдали повреждения лесного покрова на протяжении 7 км вверх и 4 км вниз по течению.

С использованием сейсмических записей были выделены три временных интервала активных деформаций склона во время оползня. Был сделан вывод, что уничтожение леса могло произойти на первом этапе не только во время прохождения водной волны, а также в результате воздействия предшествующей «воздушной волны» [13]. Ее происхождение можно связать с выбросом метана из горных пород, образующих основание склона.

В связи с труднодоступностью района схода оползня исследования в акватории водохранилища проводили во время краткосрочных вылетов вертолетов МЧС России. Пробы воды были отобраны 25.01.2019 г. до начала взрывных работ (выше и ниже тела оползня) и после их проведения из образованного канала в феврале, марте, апреле 2019 г.) (рис. 2). Ранее мониторинг качества воды на этом участке водохранилища не проводили.

Определение содержания летучих органических веществ (ЛОВ) в пробах воды проводили в Центре экологического мониторинга при ИВЭП ДВО РАН методом газовой



**Рис. 2.** Схема мест отбора проб воды: 1 – стенка срыва оползня; 2 – оползневое тело; 3 – нарушенный почвенно-растительный покров; 4 – канал после взрывных работ

**Fig. 2.** Water sampling points: 1 – landslide disruption wall; 2 – landslide body; 3 – disturbed soil and vegetation cover; 4 – channel after blasting

хроматографии (МУК 4.1.3171–14) с использованием колонки НР-FFAP (50 м; 0.320 мм; 0.50 мкм) при интервале температур 50–230 °С (Аналитик Г.М. Филиппова).

Для определения элементного состава пробы воды предварительно фильтровали через фильтр (синяя лента, диаметр пор 2–3 мкм); консервировали свежеприготовленной азотной кислотой (1 : 1). В качестве внутреннего стандарта использовали раствор азотно-кислого In (концентрация 20 ppm). Содержание элементов в воде определяли в Инновационном аналитическом центре при ИТИГ ДВО РАН на ICP-MS ELAN-9000 фирмы Perkin Elmer (США) (ГОСТ Р. 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003) (аналитик А.В. Штарева).

## Результаты и их обсуждение

В результате взаимодействия воды с почвами и горными породами существенно изменяется химический состав воды за счет поступления ОБ и различных химических элементов. Согласно проведенным расчетам [11] в результате оползня и последующего цунами с поверхности вокруг оползня было смыто около  $10^5$  т тонкодисперсных органических ОБ и терригенных веществ. После их поступления в воду в результате смены окислительно-восстановительных условий складывались предпосылки для изменения механизмов трансформации ОБ, растворимости элементов и общего характера биогеохимических процессов. Согласно микробиологическим и спектральным исследованиям ниже тела оползня установлено увеличение общего содержания ОБ, включая ароматические соединения [14]. Состав ароматических соединений существенно изменялся в канале сразу после проведения взрывных работ в феврале 2019 г.

Качественный состав ЛОВ в воде водохранилища до начала взрывных работ существенно отличался у разных берегов выше и ниже тела оползня (табл. 1).

Это может быть связано с медленным дренажом воды сквозь тело оползня и поступлением ОБ из слагающих его почв и горных пород. Максимальное количество большинства компонентов было установлено ниже тела оползня у обоих берегов. В воде у левого берега повышенные концентрации были характерны для ацетона, метанола, *m*-ксилола и изопропилбензола; у правого берега, где скопились растительные остатки, было установлено максимальное содержание метанола (233 мкг/дм<sup>3</sup>), здесь же были обнаружены бутанол и гексан. Известно, что метан, этан, пропан и гексан широко распространены в осадочных породах, нефтяных месторождениях и угольных пластах. В результате их микробного окисления и гидролиза образуется широкий спектр метаболитов, включая ацетон, метанол, бутанол и др. [15]. Кроме того, бутанол является одним из продуктов микробной ферментации лигноцеллюлозных материалов при участии *Clostridium beijerinckii*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* и др. [16].

Таблица 1

Состав летучих органических веществ в воде Бурейского водохранилища вокруг оползня (мкг/дм<sup>3</sup>)

Table 1. Composition of volatile organic matter in the water of the Bureya reservoir around the landslide ( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ )

Компонент	Место отбора проб						
	ЛБ, выше т.о.	ЛБ, ниже т.о.	ПБ, выше т.о.	ПБ, ниже т.о.	Искусственный канал		
					14.02.19	1.03.19	17.04.19
Гексан	nd	nd	nd	7.7	58.8	5.4	7.2
Ацетальдегид	8.9	nd	9.3	nd	21.1	6.6	nd
Ацетон	9.6	30.2	141	40.2	33.2	5.2	24.3
Метанол	47.8	92.4	71.6	233	220	37.1	nd
Бензол	0.9	1.2	nd	1.1	nd	nd	nd
Толуол	1.4	0.8	1.3	0.9	428	1.8	1.4
p-ксилол	nd	2.5	nd	nd	nd	nd	nd
m-ксилол	nd	95.2	13.8	1.1	0.9	nd	1.5
o-ксилол	nd	2.5	nd	1.0	nd	1.1	1.8
Бутилацетат	nd	8.3	nd	1.4	nd	nd	nd
i-пропилбензол	nd	46.2	1.3	0.5	0.5	192	nd
Этилбензол	nd	2.5	nd	nd	nd	nd	nd
Бутанол	nd	nd	nd	4.2	nd	nd	nd

Примечание. ЛБ, ПБ – у левого и правого берега; т.о. – тело оползня; nd –  $<0.001$  мкг/дм<sup>3</sup>.

Пробы воды, отобранные из канала сразу после взрывных работ (14.02.2019 г.), отличались высокими концентрациями метанола и толуола. По своему генезису эти компоненты могут иметь природное происхождение, например, толуол часто встречается и в незагрязненных водных экосистемах, где образуется во время анаэробной деградации ароматических аминокислот. Концентрации бензола и этилбензола в донных отложениях регистрируют в диапазоне  $\mu\text{M}$ , в то время как для толуола и ксилолов они были на два порядка ниже [17].

Увеличение концентрации толуола в 400 раз после взрывных работ дает основание считать его антропогенным загрязнителем воды. Спустя две недели (1.03.2019 г.) в пробах воды, отобранных из канала, отмечено снижение концентраций многих компонентов. В середине апреля наблюдали дальнейшее снижение концентрации ЛОВ. Присутствие во многих пробах метанола можно связать с микробной трансформацией растительных остатков и циклом метана. В качестве основных субстратов метаногенных микроорганизмов используют смесь  $\text{H}^2\text{CO}_2$ , формиат, ацетат, метанол, метиламины, метилтиолы [18, 19].

**Элементный состав.** Миграционная способность многих металлов связана с процессами их растворения/осаждения и определяется окислительно-восстановительными условиями окружающей среды. На поведение элементов в поверхностных водах оказывают влияние различные лиганды (ОВ, коллоидные формы железа и алюминия). В твердой фазе взвешенных веществ металлы связываются с поверхностными функциональными группами, гидроксидами, карбонатными, сульфидными минералами (в аморфной или кристаллической форме) или ОВ, а также могут включаться в микробный метаболизм [20].

Ниже тела оползня у обоих берегов наблюдали увеличение концентрации литогенных элементов Fe, Al, Pb, возможно, за счет дренажа слагающих пород, взаимодействия воды с минералами и перехода их в растворенное состояние (табл. 2).

Однако концентрации Ca, Mg, Zn и Cd у обоих берегов снижались, вероятно, за счет их сорбции в поровом пространстве пород. Органические кислоты способствуют адсорбции меди, свинца и цинка на железосодержащем минерале гетите [21]. Поведение Mn и Ni различалось у разных берегов. По сравнению с выше расположенным участком у левого

Таблица 2

Изменение элементного состава воды вокруг тела оползня (январь 2019 г.) и после проведения взрывных работ в искусственном канале (февраль, март, апрель 2019 г.)

Table 2. Changes in the elemental composition of water near the landslide body (January 2019) and after blasting operations in an artificial channel (February, March, April 2019)

Место/дата отбора	Элементы, мкг/л										
	Fe	Mn	Al	Ca	Mg	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
Выше и ниже тела оползня, 25.01. 2019											
ЛБ, выше	208	11.5	164	4102	1468	1.12	5.60	22.4	0.11	0.25	nd
ЛБ, ниже	344	9.9	182	3874	1351	0.75	5.67	17.0	0.03	1.32	nd
ПБ, выше	274	7.7	166	4160	1458	0.72	3.97	14.2	0.19	0.03	nd
ПБ, ниже	338	9.5	185	3908	1376	2.90	5.11	11.3	0.03	1.38	nd
Искусственный канал, после взрывных работ											
14.02.2019 г.	nd	8.7	97.3	2829	1027	5.24	nd	nd	0.16	nd	0.08
01.03.2019 г.	248	4.8	177	2636	1076	0.38	nd	nd	0.02	0.15	0.01
17.04.2019 г.	219	9.2	122	2131	919	0.13	0.71	0.62	nd	0.17	nd

Примечание. nd – <0.001 мкг/дм<sup>3</sup>.

берега ниже тела оползня концентрация Mn снижалась, а у правого берега увеличивалась. Ниже тела оползня у правого берега также увеличивалось содержание Ni, а у левого берега оно снижалось. Концентрация Cu у правого берега выше тела оползня была минимальной, у левого – сопоставимой выше и ниже тела оползня. Известно, что поведение никеля и меди зависит от образования металлоорганических комплексов [22], а трехвалентное железо, вступая в реакцию с гуминовыми кислотами, переходит в растворимое состояние [23]. Увеличение содержания отдельных металлов в воде после схода оползня может быть обусловлено поступлением гуминовых и фульвокислот. Считают, что доля органических форм для катионов Cu<sup>+2</sup>, Hg<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Al<sup>+3</sup> в их общем содержании может достигать 95 % [24].

Наиболее существенные изменения в содержании многих элементов в воде произошли после проведения взрывных работ (см. табл. 2). Они привели к снижению концентраций Mg, Al и Ca в канале по сравнению с их содержанием в воде, отобранной вокруг тела оползня. Особый феномен был связан с резким снижением концентраций таких элементов как Fe, Cu, Zn и Pb. Постепенно содержание этих элементов увеличивалось, но не достигло прежних концентраций. Эффект снижения концентраций этих элементов связан с разнообразными биогеохимическими процессами, с их сорбцией на поверхности тонкодисперсных частиц, размельченных взрывами горных пород и/или образованием органоминеральных коллоидов.

В присутствии высоких концентраций кальция происходят коагуляция и седиментация крупных частиц, представленных металлоорганическими полимерами. В таком случае железо как сильный комплексообразователь может удаляться из водной среды [25]. По-видимому, после взрывных работ подобные процессы повлияли на удаление железа из воды, отобранной в канале. Снижение концентраций кальция также можно объяснить совместной с ионами железа коагуляцией и седиментацией. Кроме того, окисленные формы железа, обладая высокой плотностью заряда и значительной площадью поверхности частиц, способны сорбировать ряд тяжелых металлов в присутствии органических соединений. Наибольшим сродством к оксидным формам железа обладают свинец, медь и цинк. Вышесказанное позволяет объяснить одновременное снижение концентраций железа, свинца, меди и цинка.

Взрывные работы вызвали резкое увеличение содержания токсичной ртути. Риск ртутного загрязнения зависит от многих факторов, в том числе от формы нахождения этого металла в окружающей среде. Самая токсичная форма ртути метилртуть (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>) об-

разуется в присутствии метилрадикалов в окружающей среде [26]. Канадскими учеными доказано, что оттаивание многолетней мерзлоты в арктических зонах сопровождалось увеличением концентрации ОВ и метилртути. Ими были установлены корреляционные связи между содержанием ОВ, Fe, Hg и микробной активностью, включая метаногенез [27]. Кроме того, известно, что эмиссия ртути из оголенных почв превышает в 2 раза такую из почвы, покрытой густой растительностью [28].

В нашем случае на подвижность ртути могли повлиять как природные метилсодержащие ЛОВ (метанол, толуол и ксилолы), так и продукты трансформации тринитротолуола. Проведенный корреляционный анализ показал, что непосредственно после оползня был установлен факт существования положительной корреляции между Fe, Al, Pb и широким спектром ЛОВ. Например, для железа были установлены положительные связи с метанолом ( $R = 0.70$ ), о-ксилолом ( $R = 0.75$ ) и изопропилбензолом ( $R = 0.82$ ) и достоверная отрицательная связь с ацетальдегидом ( $R = -0.77$ ).

После взрывных работ и поступления продуктов детонации отмечены положительные корреляционные связи между гексаном и токсичными элементами, ртутью и кадмием ( $R = 0.78$  и  $R = 0.93$  соответственно). Содержание ртути коррелировало с метанолом ( $R = 0.59$ ). Это еще раз подчеркивает высокую степень риска присутствия ртути в метилированной токсичной форме. До проведения взрывных работ ртуть в воде водохранилища вокруг оползня отсутствовала ( $<0.001$ ).

**Генезис ЛОВ и цикл метана.** Обнаруженный нами в воде широкий спектр органических соединений можно отнести к продуктам разложения лигноцеллюлозы. Они также могут служить маркерами взаимосвязанных процессов метаногенеза и метанотрофии (рис. 3).

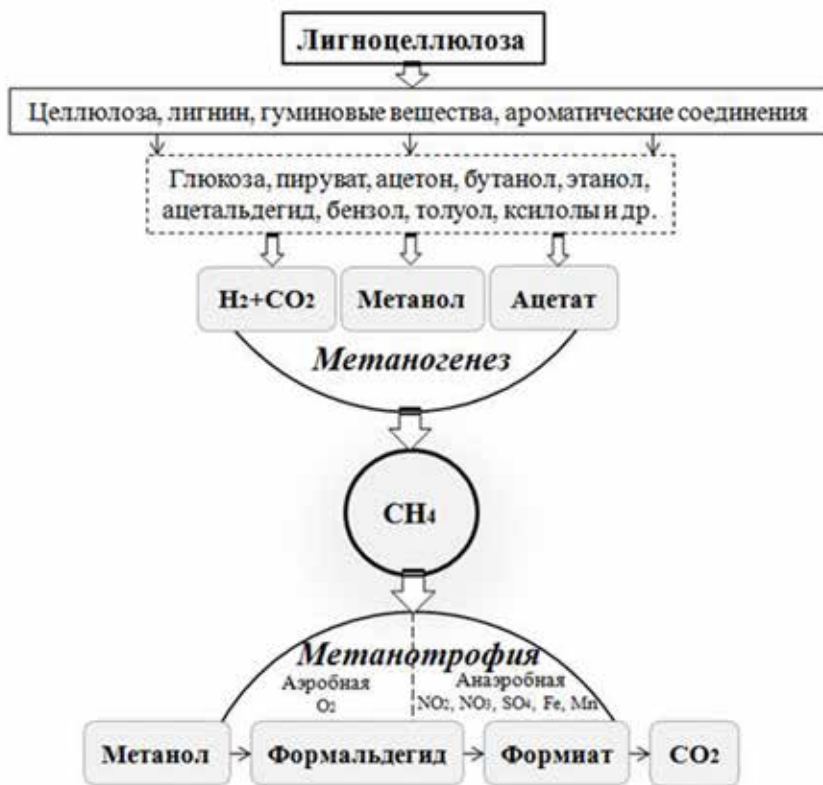


Рис. 3. Основные продукты процессов метаногенеза и метанотрофии  
 Fig. 3. The main products of methanogenesis and methanotrophy

Известны различные виды метаногенеза: гидрогенотрофный, ацетокластический и метилотрофный. Высвобождаемый метан быстро окисляется и утилизируется метанотрофными бактериями [29]. Эмиссия биогенного метана определяется балансом метанообразующих и метаноокисляющих микроорганизмов (30). Накопление метана часто связывают с «литологическими ловушками», блокирующими его выделение или окисление. Метаногенез обеспечивает 30–100 % концентрации метана в периодически оттаивающих горизонтах почв [31].

На участке схода бурейского оползня образование метана могло быть связано с таянием многолетней мерзлоты, его поступлением из угле-газоносных горизонтов подстилающих пород, трансформацией ОВ различного происхождения в поровом пространстве горных пород при участии метанообразующих микроорганизмов. Многие метилированные соединения – продукты метаногенеза и метанотрофии медленно поступали в водную среду в зоне осушки/обводнения берегов и подвергались дальнейшей биотрансформации. Однако основная масса метана продолжала накапливаться в поровом пространстве до критического объема и соответствующего температурного скачка.

Необходимо отметить важный факт: накануне оползня (с 3 по 9 декабря 2018 г.) было зарегистрировано резкое снижение температуры воздуха с  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13]. Именно скачкообразное снижение температуры могло послужить важным фактором для выделения большого объема метана в результате повышения давления при замерзании поровых вод и «морозобойного» эффекта. При поступлении в водную среду горных пород из порового пространства поступали продукты трансформации метана, включая метилированные ароматические соединения.

### **Заключение и выводы**

После оползня на Бурейском водохранилище сформировался биогеохимический барьер, изменивший характер взаимодействия в системе вода–порода и внесший существенный вклад в изменение химического состава воды. Проведенные взрывные работы стали источником поступления антропогенных загрязнений. Эти два фактора (природный и антропогенный) оказали влияние на процессы миграции и трансформации ОВ, изменение состояния многих литогенных и биогенных элементов, участвующих в формировании качества воды.

В результате взаимодействия воды с размельченными почвами и горными породами, древесными остатками после цунами, продуктами детонации взрывчатых веществ произошло увеличение содержания не типичных для зимнего сезона органических веществ в водной среде. Несомненно, произошли коренные изменения в биогеохимических процессах, связанных с взаимодействием ОВ с многими элементами. Прежде всего, это обусловлено снижением содержания железа, участвующего в комплексообразовании и влияющего на поведение других элементов, включая медь, цинк и свинец. Одновременное увеличение концентрации метилсодержащих ОВ привело к росту содержания токсичной ртути, способной аккумулироваться в планктонных и бентосных организмах.

Слабая изученность процесса взрывной эмиссии метана при низких температурах в регионах с отступающей многолетней мерзлотой может привести к риску увеличения числа опасных геологических событий в зимний период в бассейне р. Бурей, включая такие неординарные события, как оползни на крутых берегах водохранилища в зоне влияния Бурейского гидроузла. Важным последствием оползня и проведения взрывных работ является риск дестабилизации экосистемы водохранилища за счет увеличения количества взвесей, поступления ОВ из почв, мерзлых пород, растительных остатков и фактический возврат к локальным биогеохимическим процессам, которые происходили в первые годы заполнения.



*Авторы выражают благодарность Комитету по гражданской защите Правительства Хабаровского края и ГУ МЧС Хабаровского края и коллегам из лаборатории гидрологии и гидрогеологии ИВЭП ДВО РАН А.Н. Махинову и В.И. Киму за содействие в проведении исследований и отборе проб.*

## Литература

1. Andres N., Badoux A. The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends // *Journal of Flood Risk Management*. 2018. e 12510.
2. Fan X., Xu Q., Scaringi G. Brief communication: Post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18, No. 1. P. 397–403.
3. Hu X., Hu K., Tang J., You Y., Wu C. Assessment of debris-flow potential dangers in the Jiuzhaigou Valley following the August 8, 2017, Jiuzhaigou earthquake, western China // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 256, No. 5. P. 57–66.
4. 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.
5. Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature — deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations // *Geography environment*. 2014. Vol. 7, No. 4. P. 68–80.
6. Shakova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey D., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7, No. 4. P. 68–80.
7. Buldovits S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia) // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. e:13534.
8. Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions // *Geomorphology*. 2019. Vol. 340. P. 116–128.
9. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурья и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // *Вестн. ДВО РАН*. 2019. № 2. С. 35–44.
10. Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Бурья: гидрология, гидрохимия, ихтиология. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2006. 149 с.
11. 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.
12. Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю.А., Бурцев М.А., Крашенинникова Ю.С., Суханова В.В., Шамилова Ю.А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурья 11 декабря 2018 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 7. С. 266–271.
13. Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В., Харитонов М.Е., Фоменко И.К., Барыкина О.С. Бурейский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // *ГеоРиск*. 2019. Т. 13, № 4. С. 18–30.
14. Кондратьева Л.М., Махинов А.Н., Андреева Д.В., Башкурова А.С. Изменение качества воды в Бурейском водохранилище в результате крупного оползня // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 2. С. 170–181.
15. Godwin C.M., McNamara P.J., Markfort C.D. Evening methane emission pulses from a boreal wetland correspond to convective mixing in hollows // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. Vol. 118, No. 3. P. 994–1005.
16. Kumar M., Gayen K. Developments in biobutanol production: New insights // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88, No. 6. P. 1999–2012.
17. Cazzarelli I.M., Bekins B.A., Eganhouse R.P., Warren E., Essaid H.I. In situ measurements of volatile aromatic hydrocarbon biodegradation rates in groundwater // *J. Contam Hydrol*. 2010. Vol. 111, No. 1–4. P. 48–64.
18. Rivkina E., Shcherbakova V., Laurinavichius K., Petrovskaya L., Krivushin K., Kraev G., Pecheritsina S., Gilichinsky D. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in Permafrost // *FEMS Microbiol Ecol*. 2007. Vol. 61. P. 1–15.
19. Meslé M., Dromart G., Oger P. Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal // *Res. Microbiol*. 2013. Vol. 164, No. 9. P. 959–972.
20. Vallero D. Metal and Metalloid Cycles // *Fundamentals of Air Pollution*. 2014. Ch. 23. P. 531–545.
21. Переломов Л. В., Пинский Д. Л., Виоланте А. Влияние органических кислот на адсорбцию меди, свинца и цинка гетитом // *Почвоведение*. 2011. № 1. С. 26–33.
22. Grybos M., Davranche M., Gruau G., Petitjean P. Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxhydroxides reduction? // *J. Colloid Interface Sci*. 2007. Vol. 314, No. 2. P. 490–501.
23. Wan X., Xiang W., Wan N., Yan S., Bao Z., Wang Y. . Complexation and reduction of iron by phenolic substances: Implications for transport of dissolved Fe from peatlands to aquatic ecosystems and global iron cycling // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 498. P. 128–138.

24. Швец В.М. Водорастворенные органические вещества и оценка их влияния на качество питьевых подземных вод // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 1. С. 43–49.
25. Новикова С.П., Гаськова О.Л. Влияние природных фульвокислот на растворимость сульфидных руд (экспериментальное изучение) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 5. С. 665–675.
26. Frohne T., Rinklebe J., Langer U., Du Laing G., Mothes S., Wennrich R. Biogeochemical factors affecting mercury methylation rate in two contaminated floodplain soils // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. P. 493–507.
27. MacMillan G.A., Girard C., Chételat J., Laurion I., Amyot M. High Methylmercury in Arctic and Subarctic Ponds is Related to Nutrient Levels in the Warming Eastern Canadian Arctic // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol. 49. No. 13. P. 7743–7753.
28. Gabriel M. C., Williamson D. Some insight into the influence of urban ground surface properties on the air–surface exchange of total gaseous mercury // Applied Geochemistry. 2008. Vol. 23, No. 4. P. 794–806.
29. Каллистова А.Ю., Меркель А.Ю., Тарновецкий И.Ю., Пименов Н.В. Образование и окисление метана прокариотами // Микробиология. 2017. Т. 86, № 6. С. 661–683.
30. Knief C. Diversity and habitat preferences of cultivated and uncultivated aerobic methanotrophic bacteria evaluated based on pmoA as molecular marker // Front. Microbiol. 2015. Vol. 6. Article 1346.
31. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 173–184.

## Reference

1. Andres, N.; Badoux, A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends. *Journal of Flood Risk Management*. 2018, e 12510.
2. Fan, X.; Xu, Q.; Scaringi, G. Brief communication: Post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018, 18 (1), 397–403.
3. Hu, X.; Hu, K.; Tang, J.; You, Y.; Wu, C. Assessment of debris-flow potential dangers in the Jiuzhaigou Valley following the August 8, 2017, Jiuzhaigou earthquake, western China. *Engineering Geology*. 2019, 256(5), 57–66.
4. 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, 9 (12), e 497.
5. Leibman, M.O.; Kizyakov, A.I.; Plekhanov, A.V.; Streletskaia, I.D. New permafrost feature — deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations. *Geography environment*. 2014, 7 (4), 68–80.
6. Shakova, N.; Semiletov, I.; Leifer, I.; Sergienko, V.; Salyuk, A.; Kosmach, D.; Chernykh, D.; Stubbs, C.; Nicolsky, D.; Tumskey, D.; Gustafsson, Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*. 2014, 7, 64–70.
7. Buldovicz, S.N.; Khilimonyuk, V.Z.; Bychkov, A.Y.; Ospennikov, E.N.; Vorobyev, S.A.; Gunar, A.Y.; Gorshkov, E.I.; Chuvilin, E.M.; Cherbunina, M.Y.; Kotov, P.I.; Lubnina, N.V.; Motenko R.G.; Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific reports*. 2018, 8, e:13534
8. Patton, A.I.; Rathburn, S.L.; Capps, D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*. 2019, 340, 116–128.
9. Makhinov, A.N.; Kim, V.I.; Ostroukhov, A.V.; Matveyenko, D.V. Large landslide in the valley of the Bureya river and tsunami in the reservoir of the Bureya hydroelectric power station. *Vestnik DVO RAN*. 2019, 2, 35–44. (In Russian)
10. Mordovin, A.M.; Shesterkin, V.P.; Antonov, A.L. Bureya River: hydrology, hydrochemistry, and ichthyology. Khabarovsk, Russia, 2006; 149 p. (In Russian)
11. Makhinov, A.N.; Makhinova, A.F.; Levshina, S.I. Estimation of soil cover loss due to water-ice tsunami and water quality in the landslide area in the Bureya reservoir. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 11, 64–73. (In Russian)
12. Kramareva, L.S.; Lupyan, E.A.; Amelchenko, Yu.A.; Burtsev, M.A.; Krashenninnikova, Yu.S.; Sukhanova, B.B.; Shamilova, Yu.A. Observation of the collapse zone of the hill in the area of the Bureya River on December 11, 2018. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018, 15 (7), 266–271. (In Russian)
13. Zerkal, O.V.; Makhinov, A.N.; Kudymov, A.V.; Kharitonov, M.E.; Fomenko, I.K.; Barykina, O.S. Bureya landslide on December 11, 2018. Conditions of formation and features of the development mechanism. *GeoRisk*. 2019, XIII(4), 18–30. (In Russian)
14. Kondratyeva, L.M.; Makhinov, A.N.; Andreeva, D.V.; Bashkurova, A.S. Changes in water quality in the Bureiskoe reservoir caused by a large landslide. *Water Resources*. 2020, 47 (2), 170–181. (In Russian)
15. Godwin, C.M.; McNamara, P.J.; Markfort, C.D. Evening methane emission pulses from a boreal wetland correspond to convective mixing in hollows. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013, 118 (3), 994–1005.
16. Kumar, M.; Gayen, K. Developments in biobutanol production: New insights. *Applied Energy*. 2011, 88 (6), 1999–2012.
17. Cozzarelli, I.M.; Bekins, B.A.; Eganhouse, R.P.; Warren, E.; Essaid, H.I. In situ measurements of volatile aromatic hydrocarbon biodegradation rates in groundwater. *J. Contam Hydrol*. 2010, 111 (1–4), 48–64.

18. Rivkina, E.; Shcherbakova, V.; Laurinavichius, K.; Petrovskaya, L.; Krivushin, K.; Kraev, G.; Pecheritsina, S.; Gilichinsky, D. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in Permafrost. *FEMS Microbiol Ecol.* 2007, 61, 1–15.
19. Meslé, M.; Dromart, G.; Oger, P. Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal. *Res. Microbiol.* 2013, 164 (9), 959–972.
20. Vallerio, D. Metal and Metalloid Cycles. *Fundamentals of Air Pollution.* 2014, 23, 531–545.
21. Perelomov, L.V.; Pinsky, D.L.; Violante, A. Influence of organic acids on the adsorption of copper, lead and zinc by goethite. *Eurasian Soil Science.* 2011, 1, 26–33. (In Russian)
22. Grybos, M.; Davranche, M.; Gruau, G.; Petitjean, P. Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxyhydroxides reduction? *J. Colloid Interface Sci.* 2007, 314 (2), 490–501.
23. Wan, X.; Xiang, W.; Wan, N.; Yan, S.; Bao, Z.; Wang, Y. Complexation and reduction of iron by phenolic substances: Implications for transport of dissolved Fe from peatlands to aquatic ecosystems and global iron cycling. *Chemical Geology.* 2018, 498, 128–138.
24. Shvets, V.M. Water-dissolved organic substances and assessment of their impact on the quality of drinking groundwater. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya.* 2016, 1, 43–49. (In Russian)
25. Novikova, S.P.; Gas'kova, O.L. Influence of natural fulvic acids on the solubility of sulfide ores (experimental study). *Geology and geophysics.* 2013, 54 (5), 665–675 (In Russian)
26. Frohne, T.; Rinklebe, J.; Langer, U.; Du Laing, G.; Mothes, S.; Wennrich, R. Biogeochemical factors affecting mercury methylation rate in two contaminated floodplain soils. *Biogeosciences.* 2012, 9, 493–507.
27. MacMillan, G.A.; Girard, C.; Chételat, J.; Laurion, I.; Amyot, M. High methylmercury in arctic and subarctic ponds is related to nutrient levels in the warming Eastern Canadian arctic. *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49 (13), 7743–7753.
28. Gabriel, M. C.; Williamson, D. Some insight into the influence of urban ground surface properties on the air–surface exchange of total gaseous mercury. *Applied Geochemistry.* 2008, 23 (4), 794–806.
29. Callistova, A.Yu.; Merkel, A.Yu.; Tarnovetskiy, I.Yu.; Pimenov, N.V. Formation and oxidation of methane by prokaryotes. *Microbiology.* 2017, 86 (6), 661–683. (In Russian)
30. Knief, C. Diversity and habitat preferences of cultivated and uncultivated aerobic methanotrophic bacteria evaluated based on pmoA as molecular marker. *Front. Microbiol.* 2015, 6, Article 1346.
31. Kraev, G.N.; Rivkina, E.M. Accumulation of methane in permafrost-affected soils of cryolithozone. *Arctic Environmental Research.* 2017, 17 (3), 173–184. (In Russian)