

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.531.4+282.252.1

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПОСЛЕ КРУПНОГО ОПОЛЗНЯ

© 2020 г. Л. М. Кондратьева<sup>1</sup>, З. Н. Литвиненко<sup>1,2,\*</sup>, Г. М. Филиппова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,  
ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения,  
ул. Серышева, 47, Хабаровск, 680021 Россия

\*E-mail: zoyalitvinenko@gmail.com

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 17.01.2020 г.

Представлены результаты исследования качества воды в Бурейском водохранилище после крупного оползня, произошедшего в декабре 2018 г. Методом газовой хроматографии проведен сравнительный анализ изменения качественного состава летучих органических веществ в воде вокруг тела оползня до/после взрывных работ и в искусственном канале. Среди доминирующих компонентов в воде обнаружены метанол и метилированные производные бензола, их концентрация увеличивалась после дренажа воды сквозь тело оползня. На примере водных вытяжек из горных пород и почвы, показано, что многие соединения имели природное происхождение. Обосновано происхождение некоторых соединений (гексан, ацетон, метанол, ацетаты, ксилолы), которые могут быть интермедиатами трансформации растительных остатков, а также взаимосвязанных процессов метаногенеза и метанотрофии. Среди множества факторов формирования качества воды в Бурейском водохранилище после крупного оползня важную роль играли взаимодействие воды с горными породами, миграция органических веществ из порового пространства пород и их вовлечение в биогеохимические процессы.

**Ключевые слова:** экологический риск, водохранилище, оползень, летучие органические вещества

**DOI:** 10.31857/S0869780920030030

#### ВВЕДЕНИЕ

В связи с изменением климата в регионах с широким диапазоном колебаний температур все более актуальными становятся экологические проблемы, возникающие при строительстве скоростных магистралей и эксплуатации водохранилищ [22]. Изменение климата, сопровождаемое увеличением количества осадков, таянием мерзлых пород и ледников, выступает главным фактором происходящих оползней и камнепадов [7]. Чаще всего оползни происходят после дождей и увлажнения почв на склонах гор [29]. Однако, по мнению Альпийской ассоциации ArgeAlp, к основным причинами оползней относится изменение состояния горных пород в зонах многолетней мерзлоты, которое описывают как “глубинное движение” скальных пород, с одновременным “сдвигом в сторону и вниз” [9]. Так в 2011 г. в Швейцарии произошел мощный катастрофический оползень, вызванный естественными эрозийными процессами и образованием трещин, через которые вода просачивалась в горные породы. Европейские ученые считают, что такой эффект

возрастает при большой амплитуде зимних и летних температур, когда вода то превращается в лед, то вновь тает. Так в Альпах за 3-летний период было установлено смещение части горы объемом в несколько миллионов кубометров на 30 см. Серьезный социально-экономический ущерб был нанесен в 2018 г., когда с 4 по 22 января сочетание осадков и таяние снега привело к интенсивным наводнениям и оползням [7].

Эффект разрушения пород чаще всего связывают с химической эрозией и чередованием циклов замерзания–оттаивания, которые взаимно стимулируют друг друга [23]. Изучение механизмов разрушения горных пород в результате замерзания–оттаивания имеет большое теоретическое и практическое значение для анализа последствий и предотвращения разрушений инфраструктурных сооружений в холодных регионах [19, 28].

Несомненно, неординарное событие произошло в декабре 2018 г. на Дальнем Востоке. Впервые в зимний период произошел сход горных пород с сопки на берегу Бурейского водохранилища



Рис. 1. Уничтоженный лес в результате цунами, вызванного оползнем (фото А.Н. Махинова, 15.01.2019).

(БВДХ). Оползень перекрыл бывшее русло р. Бурея, на которой в 2003 г. запущена в эксплуатацию Бурейская ГЭС. Уникальность бурейского оползня состоит в том, что обычно подобные явления на Дальнем Востоке происходят в летнее время, а не зимой [6].

Возникла угроза режиму работы Бурейской ГЭС и затоплению поселений, расположенных выше по течению. В России впервые на водохранилище для разрушения горных пород были проведены крупномасштабные взрывные работы. Кроме самого оползня, обусловившего поступление в водную среду большого объема размельченных горных пород и раздробленной древесины, дополнительным фактором экологического риска выступали взрывчатые вещества тротил (тринитротолуол), гексоген и продукты их детонации [16, 26], которые послужили источниками загрязнения почвы, пород и водной среды. Известно, что в гидробионтах накапливаются в основном продукты трансформации взрывчатых веществ [8, 24, 25]. Потенциальный риск представляют водорастворимые продукты взрывчатых веществ, оказывающие токсичное воздействие на рыб и моллюсков непосредственно через водную среду [11].

После оползня на Бурейском водохранилище было высказано предположение об изменении химического состава воды за счет поступления измельченных горных пород (увеличение количества взвесей), остатков древесных пород (повышение цветности) и высокомолекулярных органических веществ (ОВ) из порового пространства горных пород, находящихся длительное время в состоянии регулярного замерзания–оттаивания [4].

Поэтому изменение качества воды является основным фактором риска, влияющим на изменение структуры и разнообразия сообществ гидробионтов водохранилища, динамику сукцессионных процессов и стабильность функционирования водных экосистем, входящих в единый Бурей-Амурский комплекс.

В данной работе рассматриваются изменение состава летучих органических веществ (ЛОВ) в воде Бурейского водохранилища в зоне влияния крупного оползня и проведения взрывных работ, обсуждается генезис некоторых токсичных соединений.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Долина р. Буреи в районе оползня имеет широкое направление. Ширина затопленного русла составляет 500–550 м при глубине 60–80 м. Левый берег высотой около 400 м, крутой с уклоном 30°–35°; правый – пологий, представляет собой террасовидную поверхность эрозионного происхождения шириной более 1 км и высотой до 50 м над современным уровнем воды. Колебания уровней воды в водохранилище между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляют 20 м [5, 6].

Согласно геодезическим измерениям, объем сошедшего оползня составил 24.5 млн м<sup>3</sup>. Объем надводной части превысил 4.5 млн м<sup>3</sup>, основная часть оползня находится под водой. Параметры оползня: длина – 800 м, высота над урезом водохранилища – от 7.5 до 46 м. Глубина водохранилища на месте схода оползня – более 70 м. Кроме оползня произошло уникальное событие – образовалась волна, по своему механизму представляющая небольшое цунами и уничтожившая лес на обоих берегах на площади 300 га. Водный поток ломал стволы деревьев, оставляя раздробленные пни высотой до 1 м (рис. 1). Значительная часть деревьев обратным потоком воды была снесена в водохранилище, где они впоследствии вмерзли в лед. Вода перешла на другой берег и по долине притока Средний Сандар поднялась на 3.6 км [6].

В связи с труднодоступностью района схода оползня исследования в акватории БВДХ проводили во время краткосрочных вылетов вертолетов МЧС России. Пробы воды были отобраны до начала взрывных работ (выше и ниже тела оползня) и после их проведения из образованного канала (рис. 2).

Определение содержания ЛОВ в пробах воды из водохранилища и 5-суточных водных вытяжках разных субстратов (размельченные горные породы до и после взрывов, обугленная древесина, почва с вертолетной площадки) проводили методом газовой хроматографии с использованием колонки НР-FFAP (50 м; 0.320 мм; 0.50 мкн) при интервале температур 45–200°C. Вытяжки готовили при 20–23°C в стерильной дистиллированной воде из расчета 1 г субстрата/100 мл.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первые годы формирования Бурейского водохранилища (2003–2004 гг.) предполагалось, что значительный водообмен будет снижать негативное влияние затопленных почв и растительности на качество воды. Однако проведенные исследования показали, что на качество воды существенное влияние оказывали биогеохимические процессы, происходящие в толще воды, контактных зонах вода–берег и вода–дно, особенно при разложении растительных остатков [1].

Подобные процессы могут вновь иметь место в водохранилище в зоне оползня за счет размывания берегов канала, разложения древесных остатков после цунами, поверхностного стока с берегов, седиментации размельченных горных пород, поступления из порового пространства ОВ и их вовлечение во внутриводоемные процессы. Такие предпосылки были выявлены после исследования качественного состава ЛОВ воды в период ледостава вокруг тела оползня.

**Качественный состав ЛОВ** в воде водохранилища до начала взрывных работ существенно отличался выше и ниже тела оползня (табл. 1). Это может быть связано с медленным дренажом воды сквозь тело оползня и поступлением ОВ из слагающих его почв и горных пород. Максимальное количество компонентов было установлено ниже тела оползня.

В основную группу ЛОВ в воде у левого берега входили бензол, метанол, *m*-ксилол и изопропилбензол. В воде у правого берега ниже тела оползня было установлено максимальное содержание ме-

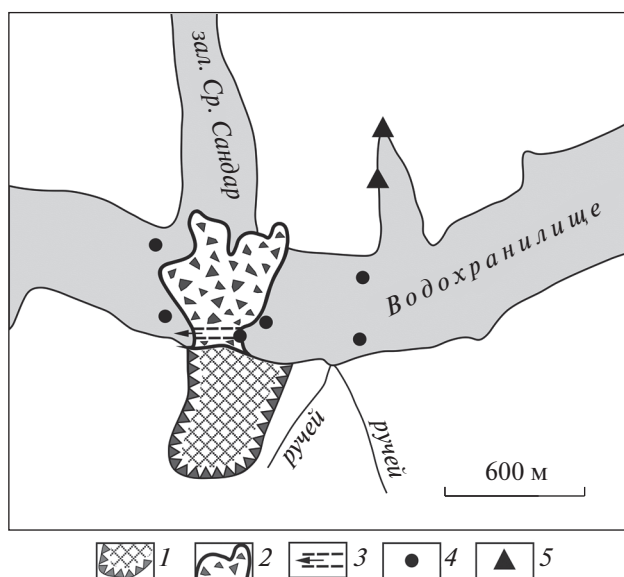


Рис. 2. Схема мест отбора проб воды: 1 – стенка срыва оползня; 2 – оползневое тело; 3 – канал после взрывных работ; 4, 5 – точки отбора проб воды.

таноло, здесь же были обнаружены бутанол и гексан. Известно, что алканы (метан, этан, пропан, гексан) широко распространены в осадочных породах, нефтяных месторождениях, угольных пластах и болотах [14]. В результате окисления и гидролиза алканов образуется широкий спектр метаболитов, включая ацетон, метанол, бутанол и др.

Пробы воды, отобранные из канала, образованного после взрывных работ (19.02.2019 г.), от-

Таблица 1. Состав органических веществ в воде Бурейского водохранилища вокруг оползня

Компоненты, мкг/см <sup>3</sup>	Выше тела оползня		Ниже тела оползня	
	1 (ЛБ)	2 (ПБ)	3 (ЛБ)	4 (ПБ)
гексан	–	–	–	0.0077
ацетальдегид	0.0089	0.0093	–	–
ацетон	0.0096	0.1406	0.0302	0.0402
метанол	0.0478	0.0716	0.0924	0.2329
бензол	0.0009	–	0.0012	0.0011
толуол	0.0014	0.0008	0.0013	0.0009
бутилацетат	–	–	0.0083	0.0014
этилбензол	–	–	0.0025	–
<i>p</i> -ксилол	–	–	0.0025	–
<i>m</i> -ксилол	–	0.0138	0.0952	0.0011
<i>o</i> -ксилол	–	–	0.0025	0.0010
бутанол	–	–	–	0.0042
изопропилбензол	–	0.0013	0.0462	0.0005
всего компонентов	5	6	10	10

Примечание: (–) – отсутствие компонента; ЛБ, ПБ – у левого и правого берега.

**Таблица 2.** Состав ЛОВ в водных вытяжках разных субстратов после проведения взрывных работ в акватории Бурейского водохранилища

Субстрат	Суммарное содержание ЛОВ, мкг/см <sup>3</sup>	Компоненты	Доминирующие компоненты (мкг/см <sup>3</sup> )
обугленная древесина	0.342	ацетон, бензол, метанол, толуол, <i>o</i> -ксилол	метанол (0.274), ацетон (0.065)
скальные породы после взрыва	0.042	ацетальдегид, ацетон, гексан, бензол, толуол, <i>o</i> -ксилол	ацетон (0.016), гексан (0.015)
порода с гарью после взрывов	0.177	ацетон, бутанол, бутилацетат, гексан, метанол, этилацетат, толуол, <i>m</i> - и <i>o</i> -ксилолы	метанол (0.074), гексан (0.061)
почва с вертолетной площадки	0.090	ацетальдегид, ацетон, гексан, метанол, толуол, <i>p</i> -, <i>m</i> -, <i>o</i> -ксилолы	метанол (0.038), гексан (0.031)

личались по составу ЛОВ, среди них обнаружены (мкг/дм<sup>3</sup>): ацетальдегид (0.017–0.052), ацетон (0.020–0.25), метанол (0.060–0.22), толуол (0.001–0.42) и др. Спустя две недели (1.03.2019 г.) в пробах воды из канала отмечено снижение концентраций многих компонентов, за исключением изопропилбензола. Его содержание было в 7.5 раз выше, чем в пробах воды, отобранных ранее.

Для обоснования состава ЛОВ в пробах воды БВДХ после оползня были проведены исследования **водных вытяжек** разных субстратов (табл. 2). В вытяжке обугленной древесины доминировали метанол и ацетон. В вытяжке скальных пород без признаков гари обнаружены гексан, ацетон, примеси бензола и его метилированные производные, а метанол отсутствовал.

В водной вытяжке размельченных горных пород, покрытых гарью, доминировали метанол и гексан. Только в этом образце присутствовали бутанол и бутилацетат. Значительное разнообразие ЛОВ обнаружено в почвенной вытяжке с вертолетной площадки, где осуществляли разгрузку топлива и взрывчатых веществ. Здесь присутствовали метанол и гексан, но их концентрации были в 2 раза ниже, чем в вытяжке пород с гарью.

Многие ароматические соединения, обнаруженные в воде вокруг оползня и в водных вытяжках, включая метилированные производные бензола (толуол и ксилолы), представляют опасность для гидробионтов, вызывая так называемые пролонгированные риски в пространстве и во времени. Однако при определенных экологических условиях при воздействии микроорганизмов-деструкторов они могут подвергаться трансформации и деструкции [15]. Толуол часто встречается в незагрязненных водных экосистемах в довольно низких концентрациях, образуясь во время анаэробной деградации ароматических аминокислот. Для бензола и этилбензола пороговые концентрации при разложении в донных отложениях были зарегистрированы в диапазоне мМ, в то время как

для толуола и ксилолов они были как минимум на два порядка ниже [13].

Генезис присутствующего во многих пробах **метанола** может быть связан с трансформацией природного метана в результате микробиологических процессов [27]. Обнаруженное сочетание ЛОВ позволило высказать гипотезу, что многие из этих соединений тесным образом связаны с циклом метана и разложением растительных остатков. Известно, что метан выделяется в местах с высоким содержанием ОБ, включая нефтяные месторождения, залежи угля и водохранилища [2, 10, 12]. В качестве основных субстратов для метаногенеза микроорганизмы используют смесь  $H_2 + CO_2$ , формиат, ацетат, метанол, метиламины, метилтиолы [20] и сложные ароматические соединения, присутствующие в углях [17, 21].

Известны различные виды метаногенеза (рис. 3): гидрогенотрофный, ацетокластический и метилотрофный. Высвобождаемый метан быстро окисляется и утилизируется метанотрофными бактериями [3, 18]. Продуктом окисления метана часто является метанол, который затем окисляется до альдегидов. Метанол выступает идеальным донором электронов для денитрификации и способствует трофическому взаимодействию между метанотрофными и денитрифицирующими бактериями [10, 17].

В цикле метана участвуют метаногены, метанотрофы и другие микроорганизмы, разлагающие сложные ОБ и поставляющие метаногенам субстраты для синтеза  $CH_4$ . Некоторые группы бактерий могут конкурировать с метаногенами за субстрат. Все это создает чрезвычайно сложную систему трансформации ОБ в почвах и донных осадках, а также в поровом пространстве горных пород при их оводнении.

Анализ публикаций, посвященных циклу метана, позволяет сделать вывод о возможных механизмах образования идентифицированных нами ЛОВ. Присутствие метанола и ацетона в пробах

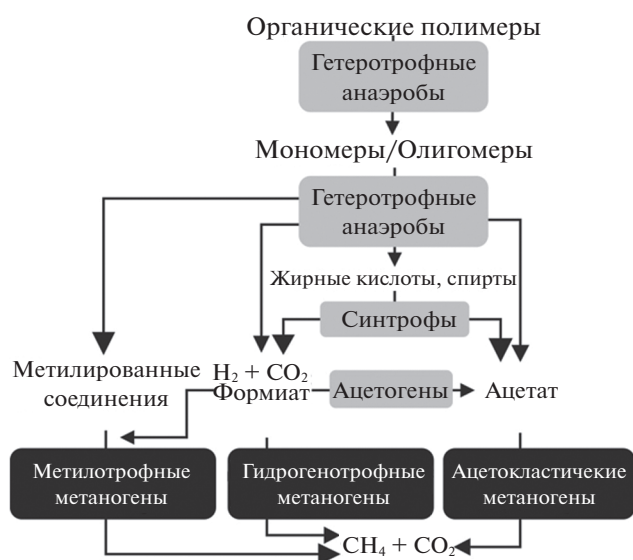


Рис. 3. Разные механизмы метаногенеза из природных органических/растительных полимеров [18].

воды может быть связано с их поступлением из порового пространства горных пород в результате инфильтрации воды сквозь тело оползня и сопряженных процессов трансформации ОВ, метаногенеза и метанотрофии. Ацетон чаще образуется в качестве промежуточного продукта в результате анаэробного разложения растительных остатков. Ацетаты могут использовать ацетокластические метаногены, продуцируя  $\text{CO}_2$  и метан, тем самым замыкая цикл метана. Гексан, наряду с другими алканами, содержится в породах угольных и нефтяных месторождений. Так, на территории Верхнебуреинского района расположены Ургальское месторождение угля и Адниканское месторождение углеводородного сырья. В результате фильтрационных и диффузионных процессов углеводороды различного агрегатного состояния (жидкие и газообразные) могут мигрировать из осадочных пород по порам, трещинам и разрывным нарушениям в подземные и поверхностные воды, изменяя их качество.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное загрязнение окружающей среды в зоне оползня растительными остатками, нефтепродуктами от транспортных средств, большое количество продуктов детонации взрывчатых веществ, размельчение горных пород являются в большей степени вероятности факторами дестабилизации экологической обстановки в акватории водохранилища.

В результате проведенных исследований установлено, что на состав летучих ОВ в воде Бурейского водохранилища в значительной степени повлияли дезинтеграция горных пород и высво-

бождение из порового пространства ОВ различного генезиса. Важным фактором экологического риска выступают метанол и метилированные производные бензола. Они сами являются токсикантами для гидробионтов и могут вступать в реакцию метилирования ртути, изменяя ее биодоступность и усиливая токсичность. В природных условиях весь набор идентифицированных летучих ОВ может образовываться в результате микробиологических процессов из различных низко- и высокомолекулярных предшественников. Изменение качества воды в значительной степени будет зависеть от экологических факторов, влияющих на взаимосвязанные процессы метаногенеза, метанотрофии и трансформации лигноцеллюлозы.

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.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидроэкологический мониторинг зоны влияния Бурейского гидроузла. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2007. 273 с.
2. Дзюбан А.Н. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества // Тр. ИБВВ РАН. 2016. Вып. 74 (77). С. 21–36.
3. 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.  
<https://doi.org/10.7868/s002636561706009x>
4. Кондратьева Л.М. Бурейский оползень и экологические риски // Вестник ДВО РАН. 2019. № 2. С. 45–55.  
<https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.005>
5. Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) // Геоэкология. 2019. № 3. С. 13–21.  
<https://doi.org/10.31857/S0869-78092019312-20>
6. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеевко Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурей и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестник ДВО РАН. 2019. № 2. С. 35–44.  
<https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.004>
7. Andres N., Badoux A. The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends // J. of Flood Risk Management. 2018. e 12510.  
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12510>
8. Borden R.C., Won J., Yuncu B. Natural and Enhanced Attenuation of Explosives on a Hand Grenade Range // J. Environmental Quality. 2017. V. 46. P. 961–967.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0466>
9. Badoux A., Andres N., Techel F., Hegg C. Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015 // Natural

- Hazards and Earth System Science. 2016. V. 16. № 12. P. 2747–2768.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>
10. *Buan N.R.* Methanogens: pushing the boundaries of biology // *Emerging Topics in Life Sciences*. 2018. № 2. P. 629–646.  
<https://doi.org/10.1042/ETLS20180031>
  11. *Chatterjee S., Deb U., Datta S., Walther C., Gupta D.* Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation // *Chemosphere*. 2017. V. 184. P. 438–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>
  12. *Conrad R.* The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // *Environ. Microbiol. Rep.* 2009. № 1. P. 285–292.  
<https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x>
  13. *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. V. 111 (1–4). P. 48–64.  
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.12.001>
  14. *Godwin C.M., McNamara P.J., Markfort C.D.* Evening methane emission pulses from a boreal wetland correspond to convective mixing in hollows // *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. V. 118. № 3. P. 994–1005. DOI: 10.1002/jgrg.20052
  15. *Gopinath M., Dhanasekar R.* Microbial degradation of toluene // *African Journal of Biotechnology*. 2012. V. 11 (96). P. 16210–16219.  
<https://doi.org/10.5897/AJB12.2251>
  16. *Juhasz A.L., Naidu R.* Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments // *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2007. V. 191. P. 163–215.  
[https://doi.org/10.1007/978-0-387-69163-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69163-3_6)
  17. *Kalyuzhnaya M.G., Collins D., Chistoserdova L.* Microbial Cycling of Methane. *Encyclopedia of Microbiology* (Fourth Edition). Reference Module in Life Sciences, Academic Press, 2019. P. 115–124.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.90670-8>
  18. *Liu Y., Whitman W.B.* Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2008. V. 1125. P. 171–189.  
<https://doi.org/10.1196/annals.1419.019>
  19. *Lu Y., Li X., Chan A.* Damage constitutive model of single flaw sandstone under freeze-thaw and load // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. V. 159. P. 20–28.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9867681>
  20. *Meslé M., Dromart G., Oger P.* Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal // *Res. Microbiol.* 2013. V. 164. № 9. P. 959–972.  
<https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.07.004>
  21. *Mayumi D., Mochimaru H., Tamaki H., Yamamoto K., Yoshioka H., Suzuki Y., Kamagata Y., Sakata S.* Methane production from coal by a single methanogen // *Science*. 2016. V. 354. P. 222–225.  
<https://doi.org/10.1126/science.aaf8821>
  22. *Pei W., Zhang M., Li S., Lai Y., Jin L.* Enhancement of convective cooling of the porous crushed-rock layer in cold regions based on experimental investigations // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 87. P. 14–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.06.019>
  23. *Qu D., Dengke L., Li X., Luo Y., Kun X.* Damage evolution mechanism and constitutive model of freeze-thaw yellow sandstone in acidic environment // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. V. 155. P. 174–183.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9867681>
  24. *Sims J.G., Steevens J.A.* The role of metabolism in the toxicity of 2,4,6-trinitrotoluene and its degradation products to the aquatic amphipod *Hyalella Azteca* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2008. V. 70. P. 38–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.08.019>
  25. *Strehse J.S., Appel D., Geist C., Martin H.J., Maser E.* Biomonitoring of 2,4,6-trinitrotoluene and degradation products in the marine environment with transplanted blue mussels (*M. edulis*) // *Toxicology*. 2017. V. 390. P. 117–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.09.004>
  26. *Won J., Borden R.C.* Impact of glycerin and lignosulfonate on biodegradation of high explosives in soil // *J. Contam. Hydrol.* 2016. V. 194. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.08.008>
  27. *Yu Z., Beck D.A., Chistoserdova L.* Natural Selection in Synthetic Communities Highlights the Roles of Methylococaceae and Methylophilaceae and Suggests Differential Roles for Alternative Methanol Dehydrogenases in Methane Consumption // *Front. Microbiol.* 2017. V. 5. № 8: e2392.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02392>
  28. *Yu Q., Fan K., You Y., Guo L., Yuan C.* Comparative analysis of temperature variation characteristics of permafrost roadbeds with different widths // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. V. 117. P. 12–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.05.002>
  29. *Zhang M., McSavaney M.J.* Is air pollution causing landslides in China? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 481. P. 284–289.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.045>

## ECOLOGICAL RISK OF VOLATILE ORGANIC SUBSTANCES FORMATION AFTER GREAT LANDSLIDE

L. M. Kondratieva<sup>a</sup>, Z. N. Litvinenko<sup>a,b,#</sup>, and G. M. Filippova<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> *Far Eastern State Transport University, ul. Serysheva, 47, Khabarovsk, 680021 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: zoyalitvinenko@gmail.com*

The results are presented on water quality study in the Bureya Reservoir after a major landslide in December 2018. The comparative analysis of the changes in the qualitative composition of volatile organic substances in

the water around the landslide body before and after blasting works and in the artificial channel was carried out using the gas chromatography method. In the water samples, among the dominant components, methanol and methylated benzene derivatives were found; their concentration increased after water drainage through the landslide body. By the example of water extracts from rocks and soil, it is shown that many compounds are of natural origin. Some compounds (hexane, acetone, methanol, acetates, and xylenes) can act as intermediates during the transformation of plant residues, as well as the interrelated processes of methanogenesis and methanotrophy. Interaction of water with rocks, the migration of organic substances from the pore space and their involvement in biogeochemical processes are the main factors of the water quality formation in the Bureya reservoir after a great landslide.

**Keywords:** *ecological risk, reservoir, landslide, volatile organic substances*

## REFERENCES

1. *Gidroekologicheskii monitoring zony vliyaniya Bureiskogo gidrouzla* [Hydroecological monitoring of Burea waterworks influence zone]. Khabarovsk, IVEP DVO RAN, 2007, 273 p. (in Russian)
2. Dzyuban, A.N., *Tsykl metana v gruntakh vodokhranilishch Volzhsko-Kamskogo kaskada i ego rol' v destruktivnoy organicheskoy veschestve* [Methane cycle in the soils of reservoirs of the Volga-Kama cascade and its role in the destruction of organic matter]. *Trudy IBVV RAN*, 2016, vol. 74 (77), pp. 21–36. (in Russian)
3. Kallistova, A.Yu., Merkel', A.Yu., Tarnovetskii, I.Yu., Pimenov, N.V. *Obrazovanie i okislenie metana prokaryotami* [The formation and oxidation of methane by prokaryotes]. *Mikrobiologiya*, 2017, vol. 86, no.6, pp. 661–683. (in Russian)
4. Kondrat'eva, L.M. *Bureiskii opolzen' i ekologicheskie riski* [Bureya landslide and environmental risks]. *Vestnik DVO RAN*, 2019, no. 2, pp. 45–55. (in Russian)
5. Kulakov, V.V., Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroukhov, A.V., *Katastroficheskiy opolzen' i tsunami v vodokhranilishche Bureiskoi GES (bassein Amura)* [Catastrophic landslide and tsunami in the reservoir of the Bureyskaya hydroelectric station (Amur basin)]. *Geokologiya*, 2019, no.3, pp. 13–21. (in Russian)
6. Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroukhov, A.V., *Krupnyi opolzen' v doline reki Bureya i tsunami v vodokhranilishche Bureiskoi GES* [A major landslide in the Bureya river valley and the tsunami in the reservoir of the Bureyskaya hydroelectric station]. *Vestnik DVO RAN*, 2019, no. 2, pp. 35–44. (In Russian)
7. Andres, N., Badoux, A. The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends. *Journal of Flood Risk Management*. 2018. e 12510. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12510>
8. Borden, R.C., Won, J., Yuncu, B. Natural and Enhanced Attenuation of Explosives on a Hand Grenade Range. *Journal of Environmental Quality*, 2017, vol. 46, pp. 961–967. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0466>
9. Badoux, A., Andres, N., Techel, F., Hegg, C. Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2016, vol. 16, no. 12, pp. 2747–2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>
10. Buan, N.R. Methanogens: pushing the boundaries of biology. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2018, no. 2, pp. 629–646. <https://doi.org/10.1042/ETLS20180031>
11. Chatterjee S., Deb U., Datta S., Walther C., Gupta D. Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*, 2017, vol. 184, pp. 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>
12. Conrad, R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environ. Microbiol. Rep.*, 2009, no. 1, pp. 285–292. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x>
13. 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, vol. 11, no. 1–4, pp. 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.12.001>
14. 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, pp. 994–1005. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20052>
15. Gopinath, M., Dhanasekar, R. Microbial degradation of toluene. *African Journal of Biotechnology*, 2012, vol. 11 (96), pp. 16210–16219. <https://doi.org/10.5897/AJB12.2251>
16. Juhasz, A.L., Naidu, R. Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 2007, vol. 191, pp. 163–215. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-69163-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69163-3_6)
17. Kalyuzhnaya, M.G., Collins, D., Chistoserdova, L. Microbial Cycling of Methane. *Encyclopedia of Microbiology (Fourth Edition). Reference Module in Life Sciences*, Academic Press, 2019. pp. 115–124. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.90670-8>
18. Liu, Y., Whitman, W.B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 2008, vol. 1125, pp. 171–189. <https://doi.org/10.1196/annals.1419.019>
19. Lu, Y., Li, X., Chan, A. Damage constitutive model of single flaw sandstone under freeze-thaw and load. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, vol. 159, pp. 20–28. <https://doi.org/10.1155/2019/9867681>
20. Meslé, M., Dromart, G., Oger, P. Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal. *Res. Microbiol.*, 2013, vol. 164, № 9, pp. 959–972. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.07.004>
21. Mayumi, D., Mochimaru, H., Tamaki, H., Yamamoto, K., Yoshioka, H., Suzuki, Y., Kamagata, Y., Sakata,

- S. Methane production from coal by a single methanogen. *Science*, 2016, vol. 354, pp. 222–225.  
<https://doi.org/10.1126/science.aaf8821>
22. Pei, W., Zhang, M., Li, S., Lai, Y., Jin, L. Enhancement of convective cooling of the porous crushed-rock layer in cold regions based on experimental investigations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 87, pp. 14–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.06.019>
23. Qu, D., Dengke L., Li, X., Luo, Y., Kun, X. Damage evolution mechanism and constitutive model of freeze-thaw yellow sandstone in acidic environment. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 155, pp. 174–183.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9867681>
24. Sims, J. G., Steevens, J. A. The role of metabolism in the toxicity of 2,4,6-trinitrotoluene and its degradation products to the aquatic amphipod *Hyaella Azteca*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2008, vol. 70, pp. 38–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.08.019>
25. Strehse, J.S., Appel, D., Geist, C., Martin, H.J., Maser, E. Biomonitoring of 2,4,6-trinitrotoluene and degradation products in the marine environment with transplanted blue mussels (*M. edulis*). *Toxicology*, 2017, vol. 390, pp. 117–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.09.004>
26. Won, J., Borden, R.C. Impact of glycerin and lignosulfonate on biodegradation of high explosives in soil. *J. Contam. Hydrol.*, 2016, vol. 194, pp. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.08.008>
27. Yu, Z., Beck, D.A., Chistoserdova, L. Natural selection in synthetic communities highlights the roles of methylcocccaceae and methylphilaceae and suggests differential roles for alternative methanol dehydrogenases in methane consumption. *Front. Microbiol.*, 2017, V. 5, no. 8, e2392.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02392>
28. Yu, Q., Fan, K., You, Y., Guo, L., Yuan, C. Comparative analysis of temperature variation characteristics of permafrost roadbeds with different widths. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, vol. 117, pp. 12–18.  
[10.1016/j.coldregions.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.05.002)
29. Zhang, M., McSavaney, M.J. Is air pollution causing landslides in China? *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, vol. 481, pp. 284–289.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.045>