

Л.М. КОНДРАТЬЕВА, А.Н. МАХИНОВ, В.И. КИМ

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия,
kondratevalm@gmail.com, amakhinov@mail.ru, kim@ivep.as.khb.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КРУПНОГО ОПОЛЗНЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БУРЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Исследованы экологические последствия крупного оползня, впервые произошедшего в зимний период (декабрь 2018 г.) на Бурейском водохранилище и крупнейшего в России за последнее десятилетие. Обсуждаются результаты исследования токсичных органических веществ в воде и наледи в зоне влияния сошедшего оползня и после прорыва плотины из горных пород. Проведен сравнительный анализ изменения качественного состава ароматических соединений методом газовой хроматографии в воде вокруг тела оползня до и после взрывов, в созданном искусственном канале. Среди доминирующих компонентов в воде обнаружен ряд токсичных веществ, включая метанол и метилированные производные бензола, концентрация которых увеличивалась после дренажа воды сквозь тело оползня. Выявлено, что многие из летучих органических веществ имели природное происхождение и могли содержаться в поровом пространстве горных пород. После взрывных работ отмечено увеличение содержания гексана и изопропилбензола в воде искусственного канала. Установлено, что на состав летучих органических веществ в большей степени повлияло измельчение горных пород как после непосредственного схода оползня, так и после проведения взрывных работ. Экологический риск для экосистемы водохранилища связан с образованием ароматических соединений в результате различных биогеохимических процессов, происходящих в поровом пространстве при обводнении горных пород, при их оттаивании/замерзании, трансформации растительных остатков и продуктов детонации взрывчатых веществ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, экологический риск, наледи, метанол, производные бензола, горные породы.

L.M. KONDRATYEVA, A.N. MAKHINOV, V.I. KIM

Institute of Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, ul. Dikopol'tseva, 56, Russia,
kondratevalm@gmail.com, amakhinov@mail.ru, kim@ivep.as.khb.ru

ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF A LARGE LANDSLIDE ON THE SHORES OF THE BUREYA RESERVOIR

For the first time in the winter period (December 2018), a landslide occurred on the Bureya reservoir, the largest in Russia in the last decade. This phenomenon is not typical for Khabarovsk krai. Results from investigating toxic organic matter in the water and aufeis in the zone of influence of the landslide and after the collapse of the dam composed of rocks are discussed. A comparative analysis of aromatic compounds by gas chromatography in the water around the landslide body before and after explosions in the resulting artificial canal has been carried out. Among dominant components in the water, a number of toxic substances were detected, including methanol and methylated benzene derivatives, the concentration of which increased after drainage of water through the landslide body. It was found that a large number of volatile organic substances had a natural origin and could be contained in the pore space of rocks. After explosive blasting, an increase in the content of hexane and isopropyl benzene was observed in the water of the artificial canal. It has been established that the composition of volatile organic substances has been influenced to a greater extent by rock grinding both immediately after the landslide and after the explosive blasting. Ecological risks for the reservoir ecosystem are associated with the formation of aromatic compounds as a result of various biogeochemical processes occurring in the pore space during watering of rocks, during their thawing/freezing, the transformation of vegetal debris and detonation products of explosives.

Keywords: explosives, ecological risk, aufeis, methanol, benzene derivatives, rocks.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно последним данным, наиболее распространенные опасные природные процессы, ведущие к человеческим жертвам, — это снежные лавины (37 %), молнии (16 %), наводнения (12 %), ураганы

(10 %), камнепады (8 %), оползни (7 %) и др. (9 %). Анализ информации о природных опасностях за длительный период (1946–2015 гг.) свидетельствует, что кроме основного глобального фактора — изменения климата — существенная доля разнообразных стихийных бедствий связана с антропогенным изменением геосистем, влиянием на русловые процессы рек, интенсивным преобразованием подземного пространства [1]. Опасные экологические последствия связывают с проявлением и антропогенной активизацией экзогенных процессов: водной эрозии, подтопления, карста, эоловых процессов, оползнеобразования и др. [2].

В связи с изменением климата в регионах с широким диапазоном колебаний температур все более актуальными становятся исследования поведения мерзлых грунтов, касающиеся работ на различных объектах, включая строительство скоростных магистралей и эксплуатацию водохранилищ [3]. Чаще всего оползни происходят после дождей и увлажнения почв на склонах гор. Изменение климата, сопровождаемое увеличением количества осадков, таянием мерзлых пород и ледников, считают главным фактором происходящих оползней и камнепадов [4].

Наиболее известные крупные оползни, произошедшие за последние пять лет, наблюдались в провинции Бадахшан, Афганистан (май, 2014 г.); штате Вашингтон, США (2014 г.); г. Мехико, Мексика (октябрь, 2015 г.); каньоне Кук-Стрейт, Новая Зеландия (октябрь, 2015 г.); провинции Западная Ява, Индонезия (март, 2016 г.); на юге Чили (декабрь, 2017 г.); в Гренландии (июнь, 2017 г.); префектуре Оита, Япония, (апрель, 2018 г.); на востоке плато Тибет в провинции Сычуань, Китай (июнь, 2018 г.); в Одесской области, Украина (июль, 2018 г.). В России оползни чаще всего происходят на Северном Кавказе, Урале, в Поволжье, Восточной Сибири, Приморье, на берегах Дона, Кубани, о. Сахалин, Кольском и Камчатском полуостровах. Многие из известных оползней произошли в результате проливных дождей. Учитывая глубинную природу сил, действующих на горные породы, оползни могут происходить в любое время года.

В последние годы уделяется большое внимание изучению механизмов разрушения горных пород в результате замерзания-оттаивания. Это имеет большое теоретическое и практическое значение для анализа последствий и предотвращения разрушений инфраструктурных сооружений в холодных регионах [5]. Прочность мерзлых почвогрунтов с различным крупнозернистым содержанием может периодически уменьшаться или увеличиваться [6]. Несмотря на имеющуюся информацию об оползнях, прогнозирование этого явления — трудная задача. Например, спустя три года после заполнения Саяно-Шушенского водохранилища (1990 г.) был обнаружен крупный оползень-сдвиг с расчетным объемом около 30 млн м³. Прогнозировали, что в случае его полного обвала он мог на 2/3 перегородить водохранилище [7]. Дальнейшие исследования, проведенные в 2001 г., показали, что каких-либо подвижек дальше не произошло. Это объясняли крутизной склона (70°), который не соответствовал углу скольжения массива горных пород (как правило, в пределах 35–45°). На примере Красноярского водохранилища было показано, что скорость смещения оползней зависит от степени дезинтеграции горных пород в основании оползневых блоков и наличия глинистого материала, способного к пластическим деформациям [8].

Хотя были известны прогнозы о возможности активизации экзогенных геологических процессов (ЭГП) в зоне влияния будущего Бурейского водохранилища, сход гигантского оползня в декабре 2018 г. стал большой неожиданностью. На рассматриваемой территории предполагалось проявление комплекса ЭГП, включающего в себя оползни, обвалы, осыпи, эрозию русел рек, курумы, термоэрозию и другие явления. В полосе переувлажнения грунтов прогнозировали развитие процессов наледообразования, формирования бугров пучения, морозобойного растрескивания грунтов, особенно у подножий относительно крутых склонов [9].

Уникальность события, связанного с бурейским оползнем, заключается в том, что это произошло в зимний период. Сложились условия для социально-экономического риска: угроза режиму работы Бурейской ГЭС и затопление поселений, расположенных выше по течению. В России впервые предпринята борьба с последствиями оползня путем организации крупномасштабных взрывных работ. Однако наряду с социальным существует пролонгированный экологический риск. Его распознавание и, тем более, предотвращение предусматривают более глубокое изучение природных процессов. Кроме самого оползня, обусловившего поступление в водную среду большого объема размельченных горных пород и раздробленной древесины, дополнительным источником риска выступали взрывчатые вещества — тротил (тринитротолуол) и гексоген, продукты их детонации, которые послужили источниками загрязнения почвы, пород и водной среды. Качество воды — это основной фактор изменения структуры и разнообразия сообществ гидробионтов водохранилища, динамики сукцессионных процессов и основ стабильного функционирования водных экосистем, входящих в единый Бурей-Амурский комплекс.

В данной работе рассматривается изменение качества воды в результате биогеохимических процессов, которые обусловлены не только самим сходом оползня, но и проведением взрывных работ для обеспечения нормального функционирования Бурейской ГЭС. Представлены первые результаты по оценке загрязнения водной среды летучими органическими веществами различного генезиса рядом с оползнем в период ледостава.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Долина р. Буреи в районе оползня имеет широтное направление. Она глубоко врезана — в ширину составляет 1–1,5 км при относительных превышениях близ расположенных вершин над днищем 400–500 м. Ширина затопленного русла составляет 500–550 м при глубине 60–80 м. Поперечный профиль долины асимметричный — левый берег высотой около 400 м, крутой с уклоном 30–35°. Русло реки до затопления прижималось к левому берегу и подрезало основание склона, постоянно увеличивая крутизну и снижая его устойчивость. Правый склон долины представляет собой пологонаклонную террасовидную поверхность эрозионного происхождения шириной более 1 км и высотой в своей тыловой части до 50 м над современным уровнем воды. Устьевые участки притоков также затоплены и образуют узкие и глубокие заливы протяженностью 1,5–3 км. Колебания уровней воды в водохранилище между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляют 20 м.

Коренные породы, слагающие крутой левый склон долины, представлены протерозойскими магматическими породами. В зонах разломов отмечена повышенная трещиноватость пород, которая существенно ослабила устойчивость склона, подготовив смещение огромных масс горных пород. Значительную роль в подготовке условий для смещения оползня сыграло заполнение водохранилища, в результате которого подземные воды проникли под основание склона, увеличив обводненность трещиноватых пород в нижней его части и снизив устойчивость горных пород [10].

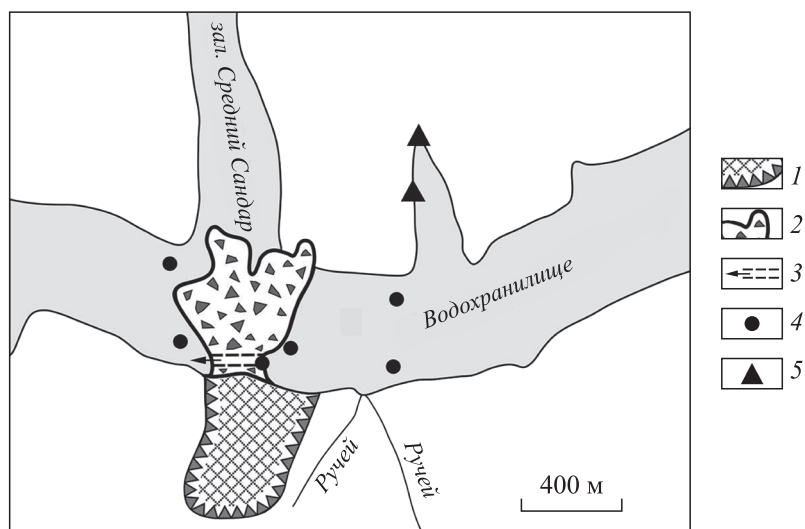
Согласно детальным геодезическим измерениям, объем сошедшего оползня составляет 24,5 млн м³ (более 55 млн т). Объем его надводной части превышает 4,5 млн м³, основная часть находится под водой. Глубина водохранилища на месте схода оползня составляет более 70 м. Параметры оползня: длина — 800 м от края до края, высота над урезом водохранилища — от 7,5 до 46 м (рис. 1). В связи с труднодоступностью района схода оползня на Бурейском водохранилище исследования в его акватории проводили во время краткосрочных вылетов вертолетов МЧС России. Пробы воды и наледей



Рис. 1. Общий вид оползня на Бурейском водохранилище (фото В.И. Ким, 15.01.2019 г.).

Рис. 2. Границы оползня и места отбора проб воды и льда.

1 — стенка срыва оползня; 2 — оползневое тело; 3 — канал после взрывных работ из верхней части водохранилища в нижнюю; 4 — точки отбора проб воды; 5 — точки отбора проб льда из береговых наледей.



были отобраны до начала взрывных работ (выше и ниже тела оползня, напротив пос. Чекунда). После проведения взрывов пробы воды отбирали из образованного канала у левого берега (рис. 2).

Определение содержания летучих органических веществ (ОВ) в пробах воды и расплавах льда проводили методом газовой хроматографии с использованием колонки НР-FFAP (50 м; 0,320 мм; 0,50 мкм) при интервале температур 45–230 °C¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сошедшего оползня произошли существенные изменения ландшафта. Кроме оползня, вызвавшего разрушение береговой линии, произошло уникальное событие — образовалась волна, по своему механизму представляющая небольшое цунами, уничтожившее лес на обоих берегах на площади 300 га. Волна обрушилась на противоположный пологий склон долины, заросший довольно густым лиственнично-березовым лесом, продвинулась вверх по склону на 1 км, достигнув высоты около 56 м над урезом воды в водохранилище. Водный поток ломал стволы деревьев, оставляя раздробленные пни высотой до одного метра. На представленном снимке видны последствия речного цунами, вызванного оползнем (рис. 3).



Рис. 3. Лес, уничтоженный в результате цунами, вызванного оползнем (фото А.Н. Махинова, 15.01.2019 г.).

¹ Анализы выполнены в Центре коллективного пользования ИВЭП ДВО РАН Г.М. Филипповой.

Вдоль границы с сохранившимся древостоем образовались скопления принесенных водой преимущественно целых деревьев в виде невысокого вала. Значительная часть стволов обратным потоком воды была снесена в водохранилище, где они впоследствии вмерзли в лед. В результате многократных соударений они были разбиты на многочисленные фрагменты. Вода перешла на другой берег и по долине р. Средний Сандар (приток Буреи) поднялась на 3,6 км. Максимальная высота, которой достиг заплеск цунами в долине Среднего Сандара, составила около 60 м.

Летучие органические вещества в воде. Совокупность всех процессов (сход оползня, цунами, разрушение берегов, снос почвенного покрова, уничтожение леса на берегах) оказала существенное влияние на качество воды в Бурейском водохранилище. Ее качественный состав 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 органических веществ (ОВ) из слагающих его почв и горных пород. Максимальное количество компонентов (10) было установлено ниже тела оползня. В основную группу компонентов в воде у левого берега, где произошел оползень, входили бензол и его различные производные. Высокие концентрации были характерны для метанола, *m*-ксилола и изопропилбензола. Доминирующим компонентом во всех пробах воды выступал метанол. Однако его максимальное содержание было установлено в воде, отобранной у правого берега, ниже тела оползня. Только здесь в воде были обнаружены бутанол и гексан.

Известно, что алканы (метан, этан, пропан, бутан, гексан) широко распространены в осадочных породах, нефтяных месторождениях, угольных пластах и болотах [11]. В результате окисления и гидролиза алканов образуется широкий спектр метаболитов, включая ацетон, метанол, бутанол и др. В пробах воды, отобранных недалеко от берега напротив пос. Чекунда, расположенного в 70 км от оползня, также присутствовали различные летучие ОВ.

Летучие органические вещества в наледях. Возникновению и развитию оползней способствуют колебания уровня воды в водохранилище (20–40 м), обеспечивающие мощные выходы подземных вод, которые принимают участие в формировании наледей. Состав ОВ в природных льдах, включая наледи, формируется под влиянием крио- и биогеохимических процессов. В составе наледей были обнаружены предельные и непредельные углеводороды, метан, оксиды углерода, аммиак, сероводород [12]. Присутствие спиртов в расплавах наледей может быть показателем биогеохимической активности, связанной с бактериальной утилизацией низкомолекулярных углеводородов [13].

Выходы подземных вод на правом берегу Бурейского водохранилища были зарегистрированы в виде наледей, которые сформировались еще до начала взрывных работ. Расплавы трех проб наледей

Таблица 1

Состав органических веществ в воде Бурейского водохранилища после оползня 2018 г., мкг/см³

Компоненты	Выше тела оползня		Ниже тела оползня		пос. Чекунда
	1 (ЛБ)	2 (ПБ)	3 (ЛБ)	4 (ПБ)	5 (ЛБ)
Гексан	—	—	—	0,0077	—
Ацетальдегид	0,0089	0,0093	—	—	0,0113
Ацетон	0,0096	0,1406	0,0302	0,0402	0,0179
Метилацетат	—	—	—	—	0,0089
Метанол	0,0478	0,0716	0,0924	0,2329	0,1364
Пропанол	—	—	—	—	0,0232
Бензол	0,0009	—	0,0012	0,0011	—
Толуол	0,0014	0,0008	0,0013	0,0009	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	0,0006
<i>o</i> -Ксилол	—	—	0,0025	0,0010	0,0009
Бутанол	—	—	—	0,0042	—
Изопропилбензол	—	0,0013	0,0462	0,0005	0,0004
Всего...	5	6	10	10	9

Примечание. ЛБ — у левого берега, ПБ — у правого берега. Здесь и в табл. 2, 3: прочерк — компонент отсутствует.

Таблица 2

Состав органических веществ в береговых наледях, мкг/см³

Компоненты	Расплав светлый, прозрачный	Расплав светлый, слабая опалесценция	Расплав бурого цвета
Гексан	0,4167	0,6610	2,7292
Ацетальдегид	0,0124	—	0,1292
Ацетон	0,0339	0,0504	0,1032
Метилацетат	—	—	0,0044
Этилацетат	0,1612	0,0078	0,0080
Метанол	0,1833	0,4923	0,3948
Пропанол	—	—	0,0618
Бензол	—	—	0,0051
Толуол	0,0044	0,0538	0,0057
Бутилацетат	0,4929	0,0195	0,0218
Изобутанол	0,0123	1,0388	—
Этилбензол	0,0023	0,0068	0,0138
<i>p</i> -Ксилол	—	—	0,0038
<i>m</i> -Ксилол	0,0036	0,0136	0,1608
<i>o</i> -Ксилол	0,0013	0,0020	0,0050
Бутанол	0,5694	0,0959	—
Изопропилбензол	0,0173	7,5369	0,0755

существенно различались по цветности. Это нашло отражение в их составе летучих ОВ (табл. 2). По спектру органических компонентов в наледях можно выявить вклад подземных вод, взаимодействующих с горными породами, почвами или дренирующих заболоченные участки (торфяники). Состав ОВ в наледях в районе оползня зависел от общей характеристики их расплава. Так, светлый и прозрачный расплав льда отличался от образца со слабой опалесценцией повышенными концентрациями этил-, бутилацетата и бутанола. В расплаве с опалесценцией отмечены более высокие концентрации метанола и толуола, а также максимальные концентрации изобутанола и изопропилбензола. Самый богатый состав ОВ был характерен для наледи, имеющей бурую окраску. Он формировался под влиянием дренажа почв и взаимодействия воды с древесными остатками. Только для этого образца было характерно присутствие бензола и его четырех метилированных изомеров (*p*-, *m*-, *o*-ксилолы и толуол). В нем отмечена самая высокая концентрация гексана, происхождение которого может быть связано с выносом подземными водами низкомолекулярных летучих ОВ из трещиноватых пород и с заболоченных участков. Так как образцы наледей были отобраны до начала взрывных работ, присутствие гексана не связано с продуктами детонации взрывчатых веществ.

Особого внимания заслуживает присутствие токсичного метанола, который может быть метаболитом микробной трансформации газообразного метана [14], присутствующего в подземных водах. Известно, что природные воды, имеющие сток с заболоченных участков и торфяников, перенасыщены CO₂ и CH₄. Ведущими факторами, контролирующими эмиссию метана с болот, являются уровень грунтовых вод и температурный режим [15]. Вовлечением метана в биогеохимические процессы можно объяснить присутствие в расплавах наледей комплекса ацетатов (метил-, этил- и бутилацетаты). Эти соединения могут образовываться при утилизации метана и метанола специализированными бактериями. В анаэробных условиях окисление метана возможно за счет редукции нитратов, постоянно присутствующих в различных водных экосистемах [16].

Летучие органические вещества в воде после взрывных работ. Чтобы исключить подтопление населенных пунктов и объектов инфраструктуры во время весеннего половодья, принято решение сделать канал для возобновления проточности в водохранилище путем проведения буровзрывных работ. Часто они осуществляются в конце ледостава для борьбы с ледяными заторами. В случае с оползнем эти работы велись для раздробления горных пород в пределах акватории водохранилища. С точки зрения экологических последствий чрезвычайно важным было поступление в экосистемы водохранилища, Буреи и Амура большого объема взвешенных веществ, их вовлечение в биогеохимические процессы с учетом миграции и седиментации. Кроме того, среди размельченных скальных пород присутствовали микрочастицы взрывчатых веществ и продукты их детонации.

Пробы воды, отобранные 14 февраля 2019 г. из канала, образованного после взрывных работ, отличались по составу органических веществ (табл. 3). Максимальное количество компонентов (15) было установлено в пробе № 3 с высоким содержанием гексана, ацетальдегида, этилацетата, *m*-ксилола и *o*-ксилола. Это может быть связано с присутствием тонкодисперсных горных пород, поступивших в воду после взрывов, и экстракцией ОВ из порового пространства. Спустя две недели (1 марта 2019 г.) качественный состав воды существенно изменился, установлено снижение концентрации многих компонентов, за исключением изопропилбензола. Содержание этого компонента было в 7,5 раза выше, чем в пробе № 3 в начале взрывных работ. Изопропилбензол также присутствовал в газовой фазе над размельченными после взрывов горными породами. Накануне ледохода в апреле 2019 г. в воде, отобранной в канале, по-прежнему содержались метилированные производные бензола (толуол и ксилолы), гексан, ацетон и этилацетат.

Особый риск представляет использование в пределах водных экосистем тринитротолуола, который плохо растворяется в воде (0,15 % при 100 °С), хорошо — в органических растворителях (пиридин, ацетон, толуол, хлороформ). На потенциальную опасность взрывчатых веществ в окружающей среде влияет ряд физических, химических и биологических процессов [17]. Известно, что некоторые взрывчатые вещества, включая 2,4,6-тринитротолуол (тротил) и гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазин (гексоген), подвергаются биоразложению в аэробных и анаэробных условиях. Этот процесс зависит от комплекса геохимических условий, включая степень увлажнения почвы, присутствие дополнительных ОВ и условия аэрации. Незначительные различия в свойствах почвы приводят к существенным изменениям их окислительно-восстановительного потенциала при разложении тротила [18]. В анаэробных условиях преобразование тротила и гексогена ограничено ковалентным связыванием продуктов трансформации с поверхностью почвы [19]. Такие связи образуются со взвешенными частицами, и в результате седиментации взрывчатые вещества могут поступать в донные отложения.

Тротил и гексоген относятся к группе токсичных веществ для гидробионтов и являются канцерогенами для человека. Экспериментально показано, что в гидробионтах накапливаются в основном продукты трансформации взрывчатых веществ [20]. Наиболее опасны водорастворимые продукты, оказывающие токсичное воздействие на рыб и моллюсков непосредственно через водную среду [21]. Толуол часто встречается в незагрязненных водных экосистемах. Для бензола и этилбензола пороговые концентрации при разложении в донных отложениях были зарегистрированы в диапазоне микромолей (µМ), в то время как для толуола и ксилолов они были как минимум на два порядка ниже [22]. Гексан может быть природного и антропогенного происхождения. В первом случае он входит в состав природных углеводородов подземных вод, во втором — выступает в качестве одного из продуктов взрывчатых веществ.

В результате проведенных исследований установлено, что на состав летучих ОВ в значительной степени повлияло измельчение горных пород как после схода оползня, так и после проведения взрывных работ. Ведущим фактором, влияющим на качество воды после гигантского оползня, выступала дезинтеграция горных пород и высвобождение из порового пространства ОВ различного строения. В природных условиях весь набор идентифицированных летучих ОВ может вовлекаться в процессы деструкции, так как большинство этих соединений хорошо растворимы в воде.

Таблица 3

Состав органических веществ в воде из канала после проведения взрывных работ, мкг/см³

Компоненты	Пробы воды, отобранные 14.02.2019				Вода из канала, отобранная	
					01.03.2019	17.04.2019
	1	2	3	4	5	6
Гексан	—	—	1,30	0,0588	0,0054	0,0072
Ацетальдегид	0,0201	0,0172	0,0528	0,0211	0,0066	—
Ацетон	0,0202	0,2512	0,0576	0,0332	0,0052	0,0243
Этилацетат	—	—	0,0606	—	0,0021	0,033
Метанол	0,0666	—	0,07071	0,2205	0,0371	—
Толуол	0,0014	0,0018	0,0097	0,4282	0,0018	0,0014
<i>m</i> -Ксилол	—	0,0185	0,0483	0,0009	—	0,0015
<i>o</i> -Ксилол	0,0030	0,0047	0,0052	—	0,0011	0,0018
Изопропилбензол	0,0007	—	0,0247	0,0005	0,1920	—
Всего...	6	5	15	7	8	6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оценке любых масштабных природных явлений (наводнений, оползней, обвалов, землетрясений, извержений вулканов и др.) и техногенных катастроф поднимаются вопросы безопасности населения. В случае с Бурейским оползнем в первую очередь встал вопрос о социальном риске, связанным с затоплением населенных пунктов и элементов инфраструктуры, например, железнодорожных путей и ЛЭП, а при экстремальных условиях — с угрозой функционированию Бурейской ГЭС.

Однако не менее важным оказался риск, обусловленный изменением качества воды в Бурейском водохранилище, как вследствие схода оползня, так и после проведения восстановительных работ с применением тротила и гексогена. В воде Бурейского водохранилища в акватории, прилегающей к гигантскому оползню, был установлен широкий набор токсичных ароматических соединений природного и антропогенного происхождения. Это может стать причиной снижения самоочищающегося потенциала, особенно в придонных слоях воды и в зонах седиментации взвешенного материала. Ароматические соединения, которые входили в состав продуктов взрыва или содержались в подземных водах, дренирующих горные породы, способны адсорбироваться на размельченных частицах пород. В результате паводков масштабы взаимодействия воды с размельченными горными породами могут провоцировать увеличение концентраций ароматических соединений в воде вокруг оползня. Остатки древесины на берегах и вмержшие в лед могут стать причиной повышения цветности воды и увеличения концентрации высокомолекулярных ОВ, включая токсичные полициклические ароматические углеводороды.

Проведение взрывных работ, сосредоточение огромной массы размельченных горных пород и древесины, размещение временной инфраструктуры Минобороны РФ, вертолетов, бульдозеров на локальном участке водного объекта могут иметь негативное влияние на экосистему водохранилища. Фактически речь идет о поступлении в водную среду большого количества минеральных веществ, растительных остатков, углеводородного топлива и продуктов детонации взрывчатых веществ. По масштабам это может быть сопоставимо с аварийными сбросами после техногенной аварии с трудно прогнозируемыми последствиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, N 12. — P. 2747–2768.
2. Павлейчик В.М. Оценка региональных экологических рисков (на примере Оренбургской области) // *География и природ. ресурсы*. — 2011. — № 4. — С. 118–124.
3. 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. — P. 14–21.
4. Andres N., Badoux A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends // *Journ. of Flood Risk Management*. — 2018. — e12510.
5. 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. — P. 20–28.
6. Zhang D., Liu E., Liu X., Song B. A new strength criterion for frozen soils considering the influence of temperature and coarse-grained contents // *Cold Regions Science and Technology*. — 2017. — Vol. 143. — P. 1–12.
7. Кусковский В.С. Экзогенные геологические процессы на берегах Саяно-Шушенского водохранилища // *Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии: Материалы Всерос. науч. конф.* — Томск: Изд-во НТЛ, 2011. — С. 140–146.
8. Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Хабидов А.Ш., Фёдорова Е.А. Экзогенные геологические процессы в береговой зоне Красноярского водохранилища // *География и природ. ресурсы*. — 2015. — № 2. — С. 83–90.
9. Научные основы экологического мониторинга водохранилищ (Дружининские чтения): Материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Ред. С.Е. Сиротский. — Хабаровск: Изд-во Ин-та водных и экологических проблем ДВО РАН, 2005. — 214 с.
10. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурей и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // *Вестн. ДВО РАН*. — 2019. — № 2. — С. 35–44.
11. Godwin C.M., McNamara P.J., Markfort C.D. Evening methane emission pulses from a boreal wetland correspond to convective mixing in hollows // *Journ. of Geophysical Research: Biogeosciences*. — 2013. — Vol. 118 (3). — P. 994–1005.
12. Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. — Владивосток: Дальнаука, 1998. — 164 с.

13. **Anthony C.** How half a century of research was required to understand bacterial growth on C1 and C2 compounds; the story of the serine cycle and the athylmalonyl-CoA pathway // *Science Progress*. — 2011. — Vol. 94 (2). — P. 109–137.
14. **Hernandez M.E., Beck D.A., Lidstrom M.E., Chistoserdova L.** Oxygen availability is a major factor in determining the composition of microbial communities involved in methane oxidation // *Peer Journ.* — 2015. — Vol. 24 (3): e801.
15. **Dinsmore K.J., Billett M.F., Moore T.R.** Transfer of carbon dioxide and methane through the soil-water-atmosphere system at Mer Bleue peatland, Canada // *Hydrological Processes*. — 2009. — Vol. 23 (2). — P. 330–341.
16. **Guerrero-Cruz S., Cremers G., van Alen T.A., Op den Camp H.J., Jetten M.S., Rasigraf O., Vaksmaa A.** Response of the Anaerobic Methanotroph “*Candidatus Methanoperedens nitroreducens*” to Oxygen Stress // *Appl. Environ. Microbiol.* — 2018. — Vol. 84 (24): e01832–18.
17. **Juhasz A.L., Naidu R.** Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments// *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* — 2007. — Vol. 191. — P. 163–215.
18. **Borden R.C., Won J., Yuncu B.** Natural and enhanced attenuation of explosives on a hand grenade range // *Journ. of Environmental Quality*. — 2017. — Vol. 46. — P. 961–967.
19. **Kalderis D., Juhasz A.L., Boopathy R., Comfort S.** Soils contaminated with explosives: Environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes // *Pure Appl. Chem.* — 2011. — Vol. 83. — P. 1407–1484.
20. **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 *Hyalalella Azteca* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* — 2008. — Vol. 70. — P. 38–46.
21. **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. — P. 438–451.
22. **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 // *Journ. Contam Hydrol.* — 2010. — Vol. 111 (1–4). — P. 48–64.

Поступила в редакцию 03.06.2019

После доработки 22.08.2019

Принята к публикации 24.06.2021
