

Ecological and biogeochemical studies of the Bureya Reservoir in the area of a giant landslide

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N.*, Andreeva D.V.

Institute of the Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk Federal Research Center, 56, Dikopoltsev Str., Khabarovsk, 680000 Russia

ABSTRACT. For the first time in the Russian Far East, a temperature of, a giant landslide with a volume of 24.5 million m³ occurred in December 2018 at 32 °C. The landslide was accompanied by a massive rock movements that collapsed directly into the Bureya Reservoir. It completely blocked the access of water to the Bureya Hydroelectric Power Station and provoked a tsunami. According to geomorphologists' research, the Bureya landslide is one of the largest in the world in terms of tsunami wave height and is a unique natural phenomenon in an ice-covered reservoir. To assess the ecological and biogeochemical state of the Bureya Reservoir in winter and summer (2019-2022), comprehensive studies of water composition in the landslide influence zone, using gas chromatography, spectrography and microbiology, were carried out. The obtained results support the idea on complex biogeochemical processes during cyclic thawing-freezing of rocks and explosive emission of methane accumulated in the pore space.

Keywords: landslide, reservoir, microbial complexes, volatile compounds, transformation of humic substances

For citation: Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N., Andreeva D.V. Ecological and biogeochemical studies of the Bureya Reservoir in the area of a giant landslide // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 428-436. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-428

1. Introduction

Climate changes have large-scale effects on our planet that can be associated with biogeochemical activity at the microscopic level (Zona, 2016). It is assumed that under climate warming, carbon stocks in permafrost will be subject to microbial decomposition, causing further temperature rise (Schoor et al., 2021). In recent years permafrost thawing has been accompanied by dangerous geological phenomena (landslides, sinkholes, floods, etc.), which pose a threat to the infrastructure of many regions in the world (Andres and Badoux, 2019; Patton et al., 2019) and are an important prerequisite for changes in the quality of surface and groundwater. Behavior of frozen soils on steep slopes is considered a risk factor in the construction of roads, dams and operation of reservoirs (Zheng et al., 2019). It is known that the occurrence and development of landslides are facilitated by significant fluctuations in water levels in reservoirs (20-40 m), which lead to powerful groundwater outflows and destruction of coastal shoals. Landslide processes can be accelerated by sudden freezing of water in cracks and pore space of

rocks (Buldovicz et al., 2018).

According to the calculations (Makhinov et al., 2019), after the Bureya landslide and tsunami, the area of destroyed soil cover was 120 hectares. In total, about 6,000 tons of undecomposed organogenic-turf and peat-organogenic substances and even more finely dispersed organic material were washed away. Changes in the composition of water during winter in the Bureya reservoir were studied immediately after the landslide and blasting operations to restore the hydrological regime in front of the hydroelectric dam (Kondratyeva et al., 2020).

The slope base destruction and rock input in some reservoirs are associated with biogeochemical processes accompanying repeated thawing and freezing of pore water in rocks (Margesin and Collins, 2019). It has been established that these processes result in the formation of volatile organic compounds (VOC), many of which are products of microbial metabolism, formed as a result of methanogenesis and methanotrophy (Yu et al., 2017). The intensity of methane production in the presence of humic substances (HS) under oxygen depletion is positively related to temperature (Tan et

*Corresponding author.

E-mail address: zoyana2003@mail.ru (Z.N. Litvinenko)

Received: June 07, 2025; **Accepted:** July 27, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



al., 2018). The authors associate this with the activity of enzymes involved in methanogenesis, which have a lower temperature sensitivity than enzymes involved in microbial HS reduction. Therefore, the methanogenesis is less sensitive to temperature compared to microbial HS reduction (Miller et al., 2015). It is assumed that the final products of organic matter (OM) fermentation can be used by complex communities, consisting of methanogens and microorganisms involved in HS transformation.

2. Materials and methods

Water samples from the Bureya Reservoir (BR) were taken in the winter of 2018–2019 above and below the landslide body near the left and right banks. In the summer of 2020, water samples were collected above and below the landslide body and near the bays filled with wood. In summer 2022, a comparative analysis of changes in the OM content and the abundance of ecological and physiological groups of microorganisms in the surface and bottom layers of water was carried out. The OM content in the water of the landslide area was determined spectrophotometrically (Shimadzu UV-3600). The spectral characteristics of water-soluble OM fractions were determined at $\lambda = 254$ nm and $\lambda = 275$ nm. Volatile organic matter was analyzed by gas chromatography with the HP-FFAP column (50 m; 0.320 mm; 0.50 μ m) in the temperature range of 50–230°C. The microbiological parameters were the numbers of the main ecological and physiological groups of bacterioplankton: CGB – cultivated heterotrophic bacteria; AMB – ammonifying bacteria; NB – nitrifying bacteria; FRB – phenol-resistant bacteria; SRB – sulfate-reducing bacteria. Agar nutrient media were used for cultivation; the abundance was expressed as colony-forming units (CFU/mL).

3. Results and discussion

Water quality studies in the Bureya Reservoir around the landslide with use of spectral and chromatographic methods showed that before blasting operations above the landslide body, the portion of aromatic compounds was higher near the left bank. Below the landslide body, the content of aliphatic and aromatic compounds was notably higher near both banks. The diversity of VOC near the right bank, especially methylated benzene derivatives, was significant (Table 1). In winter, restoration of the hydrological regime was carried out with use of explosives (trinitrotoluene, hexogen), which had a profound effect on the composition of water when it interacted with the crushed rocks. Toxic volatile compounds (benzene, methanol, toluene and xylenes) were recorded in the water around the landslide; they can be attributed to trinitrotoluene derivatives and/or transformation products of methane accumulated in the pore space of frozen rocks.

In summer 2020, the composition of water around the landslide was affected by woody debris and soil OM that entered the reservoir with surface runoff after the tsunami. An important factor in the water quality formation was microbiological transformation of OM with various genesis. This is confirmed by high abundance of various physiological groups of bacteria in water samples (Table 2). Complex microbial consortia (MC), capable of utilizing easily accessible and hardly-mineralized OM (peptone, sodium humate, aromatic compounds), were formed in stagnant zones above the landslide body. Ammonifying and nitrifying bacteria involved in the nitrogen cycle made a significant contribution to the MC structure.

High abundance of humate-transforming bacteria (HTB) confirms higher level of humification of natural waters above the landslide body. A decrease in the

Table 1. The content of organic matter in the Bureya Reservoir around the landslide in the winter-spring period of 2019

Sampling location		Content of OM		
		OM ₂₅₄	OM ₂₇₅	Composition of VOC
Before blasting, January 25, 2019				
Above the landslide	LB	0.324	0.282	Acetaldehyde, acetone, methanol, benzene, toluene
	RB	0.303	0.196	Acetaldehyde, acetone, methanol, toluene, <i>m</i> -xylene, isopropylbenzene
Below the landslide	LB	0.524	0.312	Acetone, methanol, benzene, toluene, butyl acetate, ethylbenzene, xylenes, isopropylbenzene
	RB	0.587	0.324	Hexane, acetone, methanol, benzene, toluene, butyl acetate, <i>o</i> -, <i>m</i> -xylenes, butanol, isopropylbenzene
After blasting				
Water samples from the canal (February 14, 2019)		0.682	0.494	Acetaldehyde, acetone, methanol, toluene, <i>o</i> -xylene, isopropylbenzene
		0.521	0.321	Acetaldehyde, acetone, toluene, <i>o</i> -, <i>m</i> -xylenes
		0.753	0.545	Hexane, acetaldehyde, acetone, ethyl acetate, methanol, toluene, <i>o</i> -, <i>m</i> -xylenes, isopropylbenzene
		0.724	0.514	Hexane, acetaldehyde, acetone, methanol, toluene, <i>m</i> -xylene, isopropylbenzene
Water samples from the canal (March 1, 2019)		0.385	0.211	Hexane, acetaldehyde, acetone, ethyl acetate, methanol, toluene, <i>o</i> -xylene, isopropylbenzene

Table 2. The abundance of different physiological groups of microorganisms (CFU/mL) in the water area of the Bureya Reservoir in the zone of landslide influence (July, 2020)

№	Sampling location	CHB	AMB	NB	HTB	PRB	SRB
1	Above the landslide body	301 ± 9	256 ± 31	277 ± 45	273 ± 66	9 ± 4	50 ± 3
2	Below the landslide body	82 ± 37	98 ± 56	9 ± 2	37 ± 9	0	107 ± 11
3	Pervyi Bay*	584 ± 36	814 ± 1	680 ± 18	497 ± 14	13 ± 4	191 ± 15
4	Sredniy Sandar Bay*	710 ± 42	1600 ± 61	693 ± 12	1717 ± 109	550 ± 6	510 ± 22

Note: * – among floating wood; CHB – cultivated heterotrophic bacteria, AMB – ammonifying bacteria, NB – nitrifying bacteria, HTB – humate transforming bacteria, PRB – phenol-resistant bacteria, SRB – sulfate-reducing bacteria.

abundance of the main groups of microorganisms was observed below the landslide body due to the increased speed of water passing through the artificial channel. The structure of MC in the water samples, taken in Pervyi and Sredniy Sandar bays among floating wood, was examined. The maximum abundance of HTB and phenol-resistant bacteria (PRB), indicators of phenolic pollution, was recorded in Sredniy Sandar Bay. It is indicative of active biogeochemical processes of plant residues transformations with accumulation of phenolic compounds. The maximum abundance of sulfate-reducing bacteria (SRB), which characterized the formation of anaerobic zones and probable hydrogen sulfide release, was also observed.

It is known that wood is a multilayer porous material containing specific polar hydroxyl and carboxyl groups (Mi et al., 2020). Wood cellulose and hemicellulose contain a large number of polar reactive groups that readily adsorb ions of many metals (Sun et al., 2021). In fact, conditions for active leaching of metal ions from rocks can be formed in bays among the flooded wood. The presence of SRB is a prerequisite for increasing the solubility of many elements, including iron and mercury ions.

In summer 2022, significant changes of the total OM content occurred in the landslide area, especially in Pervyi and Sredniy Sandar bays, due to the water level rise. This led to a decrease in the total OM content and its aromatic component in the surface water layers above and below the landslide body (Table 3). However, higher OM concentrations were found in the bottom water layers above the landslide body at

a depth of 65 m due to the sedimentation of incoming suspensions. Below the landslide body, after intensive mixing of water passing through an artificial channel, the OM content equalized in the surface and bottom layers (35 m) of water.

The total OM content decrease in natural waters was accompanied by a lower abundance of most ecological and physiological groups. In the bottom water layers above the landslide body, the abundance of all groups of microorganisms was quite low despite the higher content of aliphatic and aromatic OM compared to other water samples. This is probably due to the presence of persistent organic matter and slow metabolism of MC. However, there was still an increased abundance of some physiological groups of microorganisms in the waters of the bays. Sulfate-reducing bacteria (SRB) dominated the microbial complexes. The shallow waters of Pervyi Bay were characterized by high abundance of bacteria growing on a nutrient medium containing sodium humate as a carbon source. In Sredniy Sandar Bay, the abundance of HTB was comparable to other water sampling sites around the landslide body, including the bottom layers of water.

Microorganisms (62 strains) were isolated from the water samples from different sections of the Bureya Reservoir in the zone of landslide influence. All strains were resistant to mercury salt $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ at a concentration of 10 mg/L. Among them, about 50% of the strains grew on agar medium in the presence of 100 mg/L of this salt. The maximum number of mercury-resistant strains was isolated from the bottom water layers above the landslide body at a depth of 65 m. Strains isolated

Table 3. The content of organic matter and number of various physiological groups of microorganisms in the Bureya Reservoir in the landslide area (August, 2022)

Sampling location	Content of OM		Abundance of ecological and physiological groups of microorganisms, CFU/mL				
	OM ₂₅₄	OM ₂₇₅	CHB	AMB	NB	SRB	HTB
Pervyi Bay	0.206	0.207	141 ± 2	82 ± 4	60 ± 1	140 ± 4	< 500
Sredniy Sandar Bay	0.163	0.130	151 ± 12	82 ± 4	82 ± 3	282 ± 4	49 ± 3
ALB, SW	0.274	0.219	63 ± 14	40 ± 6	22 ± 1	34 ± 2	47 ± 2
ALB, BW-65	0.415	0.337	75 ± 4	36 ± 1	28 ± 1	80 ± 3	42 ± 3
BLB, SW	0.343	0.277	99 ± 11	25 ± 2	13 ± 0,2	74 ± 2	31 ± 3
BLB, BW-35	0.297	0.239	85 ± 3	28 ± 1	29 ± 0,2	66 ± 3	25 ± 2

Note: ALB - above the landslide body; BLB - below the landslide body; SW - surface water layer (0.5 m) and BW - bottom water layers at a depth of 65 m (ALB) and 35 m (BLB).

from the water of Pervyy and Sredniy Sandar bays, which contained submerged wood, were resistant to high concentrations of mercury salt.

It is known that methylmercury is the most toxic form of mercurated, which tends to accumulate in the fatty tissue of aquatic organisms and its effect is amplified across the food chain with increasing trophic levels (Zhao et al., 2018). As a result of experimental studies of mercury pollution of the Three Gorges Reservoir (China), it was found that sulfate-reducing bacteria play an important role in mercury methylation (Cao et al., 2021).

The conducted studies on the Bureya Reservoir showed that the limits of MC resistance to mercury pollution depend on their habitat. Areas with active sedimentation of suspended material in bottom waters, bays filled with plant materials and coastal areas with surface runoff of destroyed soil cover are important. Sulfate-reducing bacteria from the bays showed maximum resistance to mercury salt. Growing abundance of sulfate-reducing bacteria in the natural waters of the Bureya Reservoir in the landslide influence zone poses a threat to the environment by the formation of toxic methylated mercury.

4. Conclusions

Our studies showed that a biogeochemical barrier with a special structure of microbial complexes capable of using stable organic substances as food sources was formed in the landslide area of the surface waters in the Bureya Reservoir when it received an influx of crushed rocks and plant remains. In winter, natural and anthropogenic OM entered the water body after blasting operations. Among the OM of natural genesis, there were organic compounds from the pore space of crushed rocks and terrigenous material. Winter environmental risks for the Bureya Reservoir were associated with a large volume of detonation products and water-soluble methyl-containing aromatic compounds, including methanol.

Organic matter related to transformation of plant substrates, including humic substances, were of great importance. The source of natural OM were bays filled with crushed wood. Decomposition of plant residues was accompanied by an increase in the color of water due to its humification with the contribution of various groups of heterotrophic microorganisms. Biogeochemical transformation of OM of plant origin is the reason for an increase in the content of soluble methylated derivatives of benzene, capable of causing long-term toxicological effects in aquatic organisms around the landslide. In addition, microbial complexes involved in mercury methylation are formed in the influence zone of of a large landslide on the Bureya Reservoir. Sulfate-reducing bacteria can play a dominant role in this process.

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest.

References

- Andres N., Badoux A. 2019. The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends. *Journal of Flood Risk Management* 12: e12510. DOI: [10.1111/jfr3.12510](https://doi.org/10.1111/jfr3.12510)
- Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y. et al. 2018. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific reports* 8: e13534. DOI: [10.1038/s41598-018-31858-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9)
- Cao D., Chen W., Xiang Y. et al. 2021. The efficiencies of inorganic mercury bio-methylation by aerobic bacteria under different oxygen concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207: e111538. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.111538](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111538)
- Kondratyeva L.M., Makhinov A.N., Andreeva D.V. et al. 2020. Changes in water quality in the Bureiskoe reservoir caused by a large landslide. *Water Resources* 47(2): 257–268. DOI: [10.1134/S0097807820020086](https://doi.org/10.1134/S0097807820020086)
- Makhinov A.N., Kim V.I., Ostroukhov A.V. et al. 2019. Large landslide in the valley of the Bureya River and tsunami in the reservoir of the Bureya hydroelectric power station. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences* 2: 35–44.
- Margesin R., Collins T. 2019. Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Appl. microbiology and biotechnology* 103: 1–13. DOI: [10.1007/s00253-018-9435-1](https://doi.org/10.1007/s00253-018-9435-1)
- Mi R., Chen C., Keplinger T. et al. 2020. Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. *Nature Communications* 11: e3836. DOI: [10.1038/s41467-020-17513-w](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w)
- Miller K.E., Lai C.T., Friedman E.S. et al. 2015. Methane suppression by iron and humic acids in soils of the arctic coastal plain. *Soil Biology and Biochemistry* 83: 176–183. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.01.022](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.022)
- Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M. 2019. Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology* 340: 116–128. DOI: [10.1016/j.geomorph.2019.04.029](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029)
- Schuur E.A.G., Bracho R., Celis G. et al. 2021. Tundra underlain by thawing permafrost persistently emits carbon to the atmosphere over 15 years of measurements. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(6): e6044. DOI: [10.1029/2020JG006044](https://doi.org/10.1029/2020JG006044)
- Sun S.C., Sun D., Wang H.M. et al. 2021. Effect of integrated treatment on improving the enzymatic digestibility of poplar and the structural features of isolated hemicelluloses. *Carbohydr. Polymer* 252: e117164. DOI: [10.1016/j.carbpol.2020.117164](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117164)
- Tan W., Jia Y., Huang C. et al. 2018. Increased suppression of methane production by humic substances in response to warming in anoxic environments. *Journal of Environmental Management* 206: 602–606. DOI: [10.1016/j.jenvman.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.012)
- Yu Z., Beck D.A., Chistoserdova L. 2017. Natural Selection in Synthetic Communities Highlights the Roles of Methylococcaceae and Methylophilaceae and Suggests Differential Roles for Alternative Methanol Dehydrogenases in Methane Consumption. *Front. Microbiology* 5(8): e2392. DOI: [10.3389/fmicb.2017.02392](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02392)
- Zhao G., Sheng Y., Wang C. et al. 2018. In situ microbial remediation of crude oil-soaked marine sediments using zeolite carrier with a polymer coating. *Marine Pollution Bulletin* 129 (1): 172–178. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2018.02.030](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.030)
- Zheng Q., Shen S.-L., Zhou A.-N. et al. 2019. Investigation of Landslides that Occurred in August on the Chengdu–Kunming Railway, Sichuan, China. *Geosciences* 9(12): e497. DOI: [10.3390/geosciences9120497](https://doi.org/10.3390/geosciences9120497)
- Zona D. 2016. Long-term effects of permafrost thaw. *Nature* 537 (7622): 625–626. DOI: [10.1038/537625a](https://doi.org/10.1038/537625a)

Экологические и биогеохимические исследования в Бурейском водохранилище в зоне гигантского оползня

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Кондратьева Л.М., Литвиненко З.Н.* , Андреева Д.В.

Институт водных и экологических проблем, Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровского федерального исследовательского центра, Дикопольцева, 56, г. Хабаровск, 680000 Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые на Дальнем Востоке России в декабре 2018 г. при температуре -32°C произошел гигантский оползень объемом 24,5 млн м^3 . Оползень сопровождался перемещением большого объема горных пород и обрушился непосредственно в Бурейское водохранилище. Он полностью перекрыл доступ воды к Бурейской ГЭС и спровоцировал цунами. Согласно исследованиям геоморфологов Бурейский оползень по высоте волны цунами является одним из крупнейших в мире и представляет собой уникальное природное явление в водоеме, покрытом льдом. Для эколого-биогеохимической оценки состояния Бурейского водохранилища в зимний и летний периоды (2019-2022 гг.) были проведены комплексные исследования состава воды в зоне влияния оползня газохроматографическими, спектральными и микробиологическими методами. Полученные результаты исследований, подтверждают гипотезу о происходящих сложных биогеохимических процессах при периодическом оттаивании/ заморозании горных пород и взрывной эмиссии метана, накопившегося в поровом пространстве.

Ключевые слова: оползень, водохранилище, микробные комплексы, летучие соединения, трансформация гуминовых веществ

Для цитирования: Кондратьева Л.М., Литвиненко З.Н., Андреева Д.В. Экологические и биогеохимические исследования в Бурейском водохранилище в зоне гигантского оползня // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 428-436. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-428

1. Введение

В условиях изменения климата крупномасштабные последствия на нашей планете могут быть связаны с биогеохимической активностью на микроскопическом уровне (Zona, 2016). Предполагают, что при потеплении климата запасы углерода в многолетней мерзлоте будут подвергаться микробному разложению, генерируя дальнейший рост температуры (Schuur et al., 2021). Таяние многолетней мерзлоты в последние годы сопровождается опасными геологическими явлениями (оползнями, провалами, наводнениями и др.), которые представляют угрозу для инфраструктуры многих регионов в мире (Andres and Badoux, 2019; Patton et al., 2019) и являются важной предпосылкой для изменения качества поверхностных и подземных вод. Поведение мерзлых грунтов на крутых склонах, считают фактором риска при строительстве дорог, дамб и эксплуатации водохранилищ (Zheng et al., 2019). Известно, что возникновению и развитию

оползней способствуют значительные колебания уровней воды в водохранилищах (20-40 м), которые приводят к мощным выходам подземных вод и разрушению береговых отелей. Ускорять оползневые процессы может резкое замерзание воды в трещинах и поровом пространстве горных пород (Buldovicz et al., 2018).

Согласно проведенным расчетам (Makhinov et al., 2019), под влиянием Бурейского оползня и цунами площадь разрушенного почвенного покрова составила 120 га. Всего с нее было смыто около 6000 т неразложившихся органоматериалов и торфянисто-органогенных веществ и еще больше тонкодисперсного органического материала. Изменение состава воды в зимний период в Бурейском водохранилище было исследовано непосредственно после схода оползня и проведения взрывных работ для восстановления гидрологического режима перед плотинной ГЭС (Konratyeva et al., 2020).

Процесс разрушения основания склона и поступления горных пород в некоторых водохра-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: zoyana2003@mail.ru (З.Н. Литвиненко)

Поступила: 07 июня 2025; Принята: 27 июля 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025



нилищах связывают с биогеохимическими процессами, происходящими при периодическом оттаивании/замерзании горных пород, насыщенных водой (Margesin and Collins, 2019). Установлено, что в результате этих процессов образуются летучие органические вещества (ОВ), многие из них относятся к продуктам микробного метаболизма и образуются в результате метаногенеза и метанотрофии (Yu et al., 2017). Интенсивность образования метана в присутствии гуминовых веществ (ГВ) при отсутствии кислорода положительно связана с температурой (Tan et al., 2018). Авторы это связывают с активностью ферментов, участвующих в метаногенезе, которые имеют более низкую температурную чувствительность, чем ферменты, участвующие в микробном восстановлении ГВ. Поэтому, процесс метаногенеза менее восприимчив к температурному режиму по сравнению с процессом микробного восстановления ГВ (Miller et al., 2015). Предполагают, что конечные продукты ферментации ОВ могут использоваться сложными сообществами, состоящими из метаногенов и микроорганизмов, участвующих в трансформации ГВ.

2. Материалы и методы

Пробы воды из Бурейского водохранилища (БВХ) были отобраны в зимний период 2018-2019 г. выше и ниже тела оползня у левого и правого берегов. В летний период 2020 г. пробы воды отбирали выше, ниже тела оползня и из рядом расположенных заливов, заполненных древесиной. Летом 2022 г. проведен сравнительный анализ изменения содержания ОВ и численности эколого-физиологических групп микроорганизмов в поверхностных и придонных слоях воды. Содержание ОВ в воде в районе оползня определяли спектрофотометрическим методом (Shimadzu UV-3600). Спектральные характеристики водорастворимых фракций

ОВ определяли при $\lambda = 254$ нм и $\lambda = 275$ нм. Летучие ОВ определяли методом газовой хроматографии с использованием колонки HP-FFAP (50 м; 0.320мм; 0.50 мкм) при интервале температур 50–230 °С. В качестве микробиологических показателей использовали численность основных эколого-физиологических групп бактериопланктона: КГБ – культивируемые гетеротрофные бактерии; АМБ – аммонифицирующие бактерии; НБ – нитрифицирующие бактерии; ФРБ – фенолрезистентные бактерии; СРБ – сульфатредуцирующие бактерии. Для культивирования использовали агаризованные питательные среды, численность выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ/мл).

3. Результаты и обсуждение

Исследования качества воды в Бурейском водохранилище (БВХ) вокруг оползня с использованием спектральных и хроматографических методов показали, что до взрывных работ выше тела оползня доля ароматических соединений была выше у левого берега. Ниже тела оползня содержание алифатических и ароматических соединений оказалось существенно выше у обоих берегов. Показательным является увеличение разнообразия летучих ОВ у правого берега, особенно метилированных производных бензола (Таблица 1). В зимний период для восстановления гидрологического режима были проведены работы с применением взрывчатых веществ (тринитротолуол, гексоген), которые оказали существенное влияние на состав воды при ее взаимодействии с размельченными горными породами. В воде вокруг оползня были определены токсичные летучие соединения (бензол, метанол, толуол и ксилолы), которые можно отнести к производным тринитротолуола и/или продуктам трансформации метана, накопившегося в поровом пространстве мерзлых пород.

Таблица 1. Содержание ОВ в Бурейском водохранилище вокруг оползня в зимне-весенний период 2019 г.

Место отбора проб		Содержание ОВ		
		ОВ ₂₅₄	ОВ ₂₇₅	Состав летучих ОВ
До взрывных работ, 25.01.2019				
Выше оползня	ЛБ	0,324	0,282	Ацетальдегид, ацетон, метанол, бензол, толуол
	ПБ	0,303	0,196	Ацетальдегид, ацетон, метанол, толуол, <i>m</i> -ксилол, изопропилбензол
Ниже оползня	ЛБ	0,524	0,312	Ацетон, метанол, бензол, толуол, бутилацетат, этилбензол, ксилолы, изопропилбензол
	ПБ	0,587	0,324	Гексан, ацетон, метанол, бензол, толуол, бутилацетат, <i>o</i> -, <i>m</i> -ксилолы, бутанол, изопропилбензол
После взрывных работ				
Пробы воды из канала (14.02.2019)		0,682	0,494	Ацетальдегид, ацетон, метанол, толуол, <i>o</i> -ксилол, изопропилбензол
		0,521	0,321	Ацетальдегид, ацетон, толуол, <i>o</i> -, <i>m</i> -ксилолы
		0,753	0,545	Гексан, ацетальдегид, ацетон, этилацетат, метанол, толуол, <i>o</i> -, <i>m</i> -ксилолы, изопропилбензол
		0,724	0,514	Гексан, ацетальдегид, ацетон, метанол, толуол, <i>m</i> -ксилол, изопропилбензол
Пробы воды из канала (01.03.2019)		0,385	0,211	Гексан, ацетальдегид, ацетон, этилацетат, метанол, толуол, <i>o</i> -ксилол, изопропилбензол

В летний период 2020 г. на изменение состава воды вокруг оползня оказали влияние древесные остатки и ОВ почв, поступивших с поверхностным стоком в водохранилище после цунами. Важным фактором формирования качества воды выступали микробиологические процессы трансформации ОВ различного генезиса. Это подтверждается высокой численностью различных физиологических групп бактерий в пробах воды (Таблица 2). Выше тела оползня в застойных зонах формировались сложные микробные комплексы (МК), способные утилизировать легкодоступные и трудно минерализуемые ОВ (пептон, гумат натрия, ароматические соединения). Существенный вклад в структуру МК вносили аммонифицирующие и нитрифицирующие бактерии, участвующие в цикле азота.

Повышенный уровень гумификации природных вод выше тела оползня подтверждается высокой численностью гуматтрансформирующих бактерий (ГТБ). Ниже тела оползня за счет повышенной скорости воды, проходящей через искусственный канал, наблюдали снижение численности основных групп микроорганизмов. Показательной является структура МК в пробах воды, отобранных в заливах Первый и Средний Сандар среди плавающей древесины. Максимальная численность ГТБ и фенолрезистентных бактерий (ФРБ), индикаторов фенольного загрязнения, была зарегистрирована в заливе Средний Сандар. Это свидетельствует об активных биогеохимических процессах трансформации растительных остатков с накоплением фенольных соединений. Здесь же установлена максимальная численность сульфатредуцирующих бактерий (СРБ), характеризующая формирование анаэробных зон и вероятность выделения сероводорода.

Известно, что древесина представляет собой многослойный пористый материал, содержащий специфические полярные группы атомов, такие как гидроксильные и карбоксильные группы (Mi et al., 2020). Входящие в состав древесины целлюлоза и гемицеллюлоза содержат большое количество полярных реакционноспособных групп, которые хорошо адсорбируют ионы многих металлов (Sun et al., 2021). Фактически в заливах среди затопленной древесины могут формироваться условия для активного выщелачивания ионов металлов из горных пород. Присутствие СРБ является предпосылкой к повышению растворимости многих элементов, включая ионы железа и ртути.

Таблица 2. Численность различных физиологических групп микроорганизмов (КОЕ/мл) в акватории Бурейского водохранилища в зоне влияния оползня (июль, 2020 г.)

№ п/п	Место отбора	КТБ	АМБ	НБ	ГТБ	ФРБ	СРБ
1	Выше тела оползня	301 ± 9	256 ± 31	277 ± 45	273 ± 66	9 ± 4	50 ± 3
2	Ниже тела оползня	82 ± 37	98 ± 56	9 ± 2	37 ± 9	0	107 ± 11
3	Залив Первый*	584 ± 36	814 ± 1	680 ± 18	497 ± 14	13 ± 4	191 ± 15
4	Залив Средний Сандар*	710 ± 42	1600 ± 61	693 ± 12	1717 ± 109	550 ± 6	510 ± 22

Примечание: * – среди плавающей древесины; КТБ – культивируемые гетеротрофные бактерии, АМБ – аммонифицирующие бактерии, НБ – нитрифицирующие бактерии, ГТБ – гумат трансформирующие бактерии, ФРБ – фенолрезистентные бактерии, СРБ – сульфатредуцирующие бактерии.

В летний период 2022 г. произошли существенные изменения в общем содержании ОВ в районе оползня, особенно в заливах Первый и Средний Сандар, за счет повышения в них уровня воды. Это привело к снижению общего содержания ОВ и его ароматической составляющей в поверхностных слоях воды выше и ниже тела оползня (Таблица 3). Однако были установлены повышенные концентрации ОВ в придонных слоях воды выше тела оползня на глубине 65 м за счет седиментации поступающих взвесей. Ниже тела оползня после интенсивного перемешивания воды, проходящей через искусственный канал, содержание ОВ выравнивалось в поверхностных и придонных слоях (35 м) воды.

Снижение общего содержания ОВ в природных водах сопровождалось снижением численности большинства эколого-физиологических групп. В придонных слоях воды выше тела оползня, несмотря на повышенное содержание алифатических и ароматических ОВ, численность всех групп микроорганизмов оказалась довольно низкой. Вероятно, это связано с присутствием стойких органических веществ и медленным метаболизмом МК. Однако в водах заливов по-прежнему была повышенная численность некоторых физиологических групп микроорганизмов. Доминирующее положение в структуре микробного комплекса занимали сульфатредуцирующие бактерии (СРБ). Особенностью мелководного залива Первый была высокая численность бактерий, растущих на питательной среде, содержащей в качестве источника углерода гумат натрия. В заливе Средний Сандар численность ГТБ была сопоставимой с другими местами отбора проб воды вокруг тела оползня, включая придонные слои воды.

Из проб воды с разных участков БВХ в зоне влияния оползня выделено 62 штамма микроорганизмов. Все штаммы оказались устойчивыми к соли ртути $Hg(NO_3)_2$ в концентрации 10 мг/л. Среди них около 50% штаммов росли на агаризованных средах в присутствии 100 мг/л этой соли. Максимальное количество ртутьрезистентных штаммов выделено из придонных слоев воды выше тела оползня на глубине 65 м. Отличались устойчивостью к высоким концентрациям соли ртути штаммы, выделенные из воды заливов Первый и Средний Сандар, в которых присутствовала затопленная древесина.

Известно, что наиболее высокой токсичностью характеризуется метилированная форма ртути, которая имеет тенденцию накапливаться

Таблица 3. Содержание ОБ и численность различных физиологических групп микроорганизмов в Бурейском водохранилище в районе оползня (август, 2022 г.)

Место отбора проб	Содержание ОБ		Численность эколого-физиологических групп микроорганизмов, КОЕ/мл				
	ОБ ₂₅₄	ОБ ₂₇₅	КГБ	АМБ	НБ	СРБ	ГТБ
Залив Первый	0,206	0,207	141 ± 2	82 ± 4	60 ± 1	140 ± 4	< 500
Залив Ср. Сандар	0,163	0,130	151 ± 12	82 ± 4	82 ± 3	282 ± 4	49 ± 3
ВТО, ПВ	0,274	0,219	63 ± 14	40 ± 6	22 ± 1	34 ± 2	47 ± 2
ВТО, ДВ-65	0,415	0,337	75 ± 4	36 ± 1	28 ± 1	80 ± 3	42 ± 3
НТО, ПВ	0,343	0,277	99 ± 11	25 ± 2	13 ± 0,2	74 ± 2	31 ± 3
НТО, ДВ-35	0,297	0,239	85 ± 3	28 ± 1	29 ± 0,2	66 ± 3	25 ± 2

Примечание: ВТО - выше тела оползня; НТО – ниже тела оползня; ПВ – поверхностный слой воды (0,5 м) и ДВ – придонные слои воды на глубине 65 м (ВТО) и 35 м (НТО).

в жировой ткани водных организмов, и эффект ее воздействия усиливается по пищевой цепи до более высоких трофических уровней (Zhao et al., 2018). В результате экспериментальных исследований ртутного загрязнения водохранилища «Три ущелья» (КНР) установлено, что важную роль в метилировании ртути играют сульфатредуцирующие бактерии (Cao et al., 2021).

Проведенные исследования на Бурейском водохранилище показали, что пределы устойчивости МК к ртутному загрязнению зависят от их местообитания. Важную роль играют участки с активной седиментацией взвешенного материала в придонных водах, заливы, заполненные растительными материалами и прибрежные участки с поверхностным стоком разрушенного почвенного покрова. Максимальной резистентностью к соли ртути отличались сульфатредуцирующие бактерии из заливов. Согласно росту численности сульфатредуцирующих бактерий, в природных водах Бурейского водохранилища в зоне влияния оползня существует экологический риск образования токсичной метилированной ртути.

4. Выводы

Проведенные исследования показали, что в акватории оползня в поверхностных водах БВХ при поступлении размельченных горных пород и растительных остатков произошло формирование биогеохимического барьера с особой структурой микробных комплексов, способных использовать в качестве источников питания стойкие органические вещества. В зимний период после проведения взрывных работ в воду поступили природные и антропогенные ОБ. Среди ОБ природного генезиса присутствовали органические соединения из порохового пространства размельченных горных пород и терригенный материал. В зимний период экологические риски изменения состава воды в БВХ были связаны с поступлением большого объема продуктов детонации взрывчатых веществ и водорастворимых метилсодержащих ароматических соединений микробного метаболизма, включая метанол.

Важное место в летний период занимали ОБ, относящиеся к продуктам трансформации растительных субстратов, включая гуминовые вещества. Источником поступления природных ОБ выступали заливы, заполненные раздробленной древесиной. Разложение растительных остатков сопровождалось увеличением цветности воды за счет ее гумификации при участии различных групп гетеротрофных микроорганизмов. Биогеохимическая трансформация ОБ растительного происхождения является причиной увеличения содержания растворимых метилированных производных бензола, способных вызывать продолжительные токсикологические эффекты у гидробионтов вокруг оползня. Кроме того, в зоне влияния крупного оползня на Бурейском водохранилище формируются микробные комплексы, способные участвовать в метилировании ртути. Доминирующую роль в этом процессе могут играть сульфатредуцирующие бактерии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Andres N., Badoux A. 2019. The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends. *Journal of Flood Risk Management* 12: e12510. DOI: [10.1111/jfr3.12510](https://doi.org/10.1111/jfr3.12510)
- Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y. et al. 2018. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific reports* 8: e13534. DOI: [10.1038/s41598-018-31858-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9)
- Cao D., Chen W., Xiang Y. et al. 2021. The efficiencies of inorganic mercury bio-methylation by aerobic bacteria under different oxygen concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207: e111538. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.111538](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111538)
- Kondratyeva L.M., Makhinov A.N., Andreeva D.V. et al. 2020. Changes in water quality in the Bureiskoe reservoir caused by a large landslide. *Water Resources* 47(2): 257-268. DOI: [10.1134/S0097807820020086](https://doi.org/10.1134/S0097807820020086)
- Makhinov A.N., Kim V.I., Ostroukhov A.V. et al. 2019. Large landslide in the valley of the Bureya River and tsunami in the reservoir of the Bureya hydroelectric power station.

Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences 2: 35–44.

Margesin R., Collins T. 2019. Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Appl. microbiology and biotechnology* 103: 1-13. DOI: [10.1007/s00253-018-9435-1](https://doi.org/10.1007/s00253-018-9435-1)

Mi R., Chen C., Keplinger T. et al. 2020. Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. *Nature Communications* 11: e3836. DOI: [10.1038/s41467-020-17513-w](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w)

Miller K.E., Lai C.T., Friedman E.S. et al. 2015. Methane suppression by iron and humic acids in soils of the arctic coastal plain. *Soil Biology and Biochemistry* 83: 176-183. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.01.022](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.022)

Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M. 2019. Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology* 340: 116–128. DOI: [10.1016/j.geomorph.2019.04.029](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029)

Schuur E.A.G., Bracho R., Celis G. et al. 2021. Tundra underlain by thawing permafrost persistently emits carbon to the atmosphere over 15 years of measurements. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(6): e6044. DOI: [10.1029/2020JG006044](https://doi.org/10.1029/2020JG006044)

Sun S.C., Sun D., Wang H.M. et al. 2021. Effect of integrated treatment on improving the enzymatic

digestibility of poplar and the structural features of isolated hemicelluloses. *Carbohydr. Polymer* 252: e117164. DOI: [10.1016/j.carbpol.2020.117164](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117164)

Tan W., Jia Y., Huang C. et al. 2018. Increased suppression of methane production by humic substances in response to warming in anoxic environments. *Journal of Environmental Management* 206: 602-606. DOI: [10.1016/j.jenvman.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.012)

Yu Z., Beck D.A., Chistoserdova L. 2017. Natural Selection in Synthetic Communities Highlights the Roles of Methylococcaceae and Methylophilaceae and Suggests Differential Roles for Alternative Methanol Dehydrogenases in Methane Consumption. *Front. Microbiology* 5(8): e2392. DOI: [10.3389/fmicb.2017.02392](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02392)

Zhao G., Sheng Y., Wang C. et al. 2018. In situ microbial remediation of crude oil-soaked marine sediments using zeolite carrier with a polymer coating. *Marine Pollution Bulletin* 129 (1): 172-178. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2018.02.030](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.030)

Zheng Q., Shen S.-L., Zhou A.-N. et al. 2019. Investigation of Landslides that Occurred in August on the Chengdu–Kunming Railway, Sichuan, China. *Geosciences* 9(12): e497. DOI: [10.3390/geosciences9120497](https://doi.org/10.3390/geosciences9120497)

Zona D. 2016. Long-term effects of permafrost thaw. *Nature* 537 (7622): 625–626. DOI: [10.1038/537625a](https://doi.org/10.1038/537625a)