

Features of sulfate reduction by groundwater microbial complexes

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Andreeva D.V.*, Kondratyeva L.M.

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

ABSTRACT. Sulfate reduction is an important biogeochemical process in underground aquifers. The presence of hydrogen sulfide in the environment is a marker of the destruction of organic matter in anoxic conditions and the activation of microbiological processes. Research into the nature of interaction between surface and groundwater is relevant for assessing the sanitary and hygienic indicators of drinking water. The paper describes the results of determining the content of organic matter, hydrogen sulfide and the abundance of sulfate-reducing bacteria in groundwater of the riverbank filtration zone. It has been established that the activity of sulfate reduction processes in groundwater varies significantly in space and time. The maximum number of sulfate-reducing bacteria was accompanied by active formation of hydrogen sulfide in the aquifer after spring snowmelt at a depth of 45 m in wells located at a distance of 1500 m from the riverbank. At a distance of 50 m from the riverbank, the quality of groundwater changes significantly in the upper aquifer in the summer-autumn period, especially after floods.

Keywords: sulfate reduction, organic matter, groundwater, riverbank filtration

For citation: Andreeva D.V., Kondratyeva L.M. Features of sulfate reduction by groundwater microbial complexes // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 794-803. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-794

1. Introduction

In connection with global pollution of the hydrosphere and the prevention of environmental risks, there is a tendency throughout the world to reorient drinking water supply of the population from surface sources to groundwater. Particular attention in optimizing water resource management is paid to their protection, the transport of pollutants and the response of groundwater to stress. (Bakx et al., 2023). Therefore, research on calculating the time of spread of pollutants when underground aquifers mix with surface waters is becoming relevant. (Lee et al., 2015). It is generally accepted that high-velocity groundwater flows are often located near the discharge zone of river basins. (Singh et al., 2010). In the zone of interaction of river and groundwater, a biogeochemical barrier is formed with special physical and chemical conditions that depend on the hydrological regime and the activity of biogeochemical processes. Groundwater pollution is a major problem when used at riverine water intakes.

A significant deterioration in the quality of groundwater is observed during floods on large rivers

(Kondratyeva and Andreeva, 2018). The formation of water quality in the riverbank filtration zone (RBF) is determined by many factors: hydrological, geological, hydrochemical and hydrobiological. When pollutants are transformed in the aquatic environment, a significant portion of organic impurities may be products of microbial origin (Kondratyeva and Litvinenko, 2015). Groundwater microorganisms exist in complexly structured consortia (Flemming and Wuertz, 2019). The following biogeochemical processes occur in interconnected manner in groundwater: aerobic oxidation of organic matter (OM), denitrification, reduction of manganese (IV) and iron (III), sulfate reduction (Miao et al., 2012) and methanogenesis. Sulfate-reducing bacteria (SRB) and methanogens, occupying the same ecological niches, often use the same nutrient substrates, in particular acetate, formate and molecular hydrogen. Therefore, a competitive struggle arises between them for the possession of these substrates, the advantage in which belongs to sulfate-reducing bacteria (Garkusha et al., 2023). The important ecological significance of SRB is associated with their participation in the process

*Corresponding author.

E-mail address: freckles2008@yandex.ru (D.V. Andreeva)

Received: June 27, 2025; **Accepted:** August 15, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



of destruction of OM and the production of a chemically active substance - hydrogen sulfide.

In our studies, the number of SRB and the content of hydrogen sulfide (H_2S), the accumulation of which leads to a significant change in the organoleptic properties of groundwater, were used as an indicator of sulfate reduction activity. Hydrogen sulfide dissolved in water is the total content of undissociated molecules of gaseous H_2S , hydrosulfide ions HS^- and, very rarely, sulfides S^{2-} (at $pH > 10$). The ratio is determined mainly by the pH value of the water, and to a lesser extent by temperature and mineralization. It has been previously shown that the concentration of hydrogen sulfide in groundwater depends on the content and composition of OM (Kondratyeva and Andreeva, 2018), as well as on the presence of specialized ecological and physiological groups of microorganisms, including SRB. The number of SRB characterizes the oxidation-reduction situation, the presence of sulfates and oxygen deficiency in the aquatic environment. It is known that SRB act as a key microbiological methylator of mercury in many aquatic systems, which are capable of oxidizing various carbon sources at a temperature of $0^\circ C$ (Zhang et al., 2022). Sulfate-reducing and iron-reducing bacteria are the main microorganisms involved in mercury methylation in rice paddy soils, sediments, oceans, lakes, and glaciers. (Lin et al., 2021; Zhang et al., 2020).

The aim of our research was to assess the role of the sulfate reduction process in the formation of groundwater quality in the riverbank filtration zone under different hydrological regimes.

2. Materials and methods

The territory of the Amur-Tunguska interfluvium is part of the province of iron-containing, manganese-containing and silicon-containing fresh groundwater with low concentrations of fluorine. The features of the chemical composition formation of groundwater in the Amur-Tunguska interfluvium depend on the reducing environment in the cover of the Middle Amur artesian basin (Kulakov and Andreeva, 2016). The Middle Amur artesian basin, located in the middle reaches of the Amur River on the territory of Russia, is part of the single Sanjiang-Middle Amur artesian (sedimentary) basin, the southwestern part of which is located in China (Fig. 1).

Three well clusters located at different distances (clusters 1 - 50, cluster 2 - 500, cluster 3 - 1500 m) from the left bank of the Pemsenskaya channel were selected for the study (Fig. 1). The tiered clusters consist of three compactly located wells equipped with 2 m long filters at different depths of the aquifer (Table 1). Water was sampled with use of a GRUNDFOS submersible pump after 15 minutes of pumping from different depths of the aquifer. River water was sampled from a depth of 0.5 m from the surface, 50 m from the riverbank. The depth at the place of river water collection is 4.5 m. Samples were collected from 2013 to 2024 in spring (March), summer (August) and autumn (November).

The mass concentration of hydrogen sulfide was determined by the photometric method with *N,N*-dimethyl-*n*-phenylenediamine on a SHIMADZU UV-3600 spectrophotometer at $\lambda = 667$ nm (GD 52.24.450-2010). The abundance of cultured heterotrophic bacteria (CHB) in water samples was determined by the limiting dilution method on fish-peptone agar (FPA) diluted 10 times (FPA:10). Ammonifying bacteria (AMB) involved in the process of ammonification of organic matter were grown on FPA. For SRB, Postgate C medium was used (Postgate, 1984). The abundance was expressed in colony-forming units (CFU/mL). The total content of dissolved organic matter was determined at $\lambda = 254$ nm and expressed as the spectral absorption coefficient (SAC_{254} , abs. units) (Kumar, 2006).

3. Results and discussion

Hydrogen sulfide in natural waters is a product of reduction processes occurring during the biochemical decomposition of toxic substances, both of natural origin and those entering with wastewater from the chemical, pulp and paper and food industries, and domestic wastewater. These processes occur most intensively in groundwater and bottom layers of surface water bodies, characterized by weak mixing under conditions of oxygen deficiency.

To assess the role of the sulfate reduction process in groundwater in the RBF zone, in addition to determining the concentration of hydrogen sulfide, studies were conducted on the number of SRBs involved in the biogeochemical cycle of sulfur.

The formation features of the chemical composition of the groundwater of the Tunguska deposit

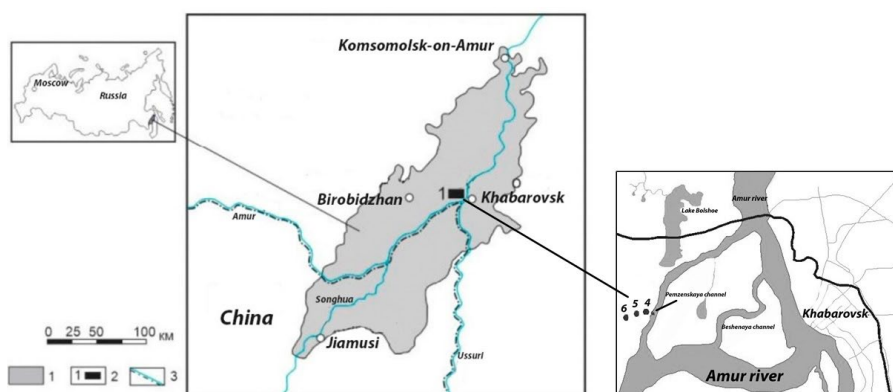


Fig.1. Layout of the research area: 1 – Middle Amur artesian basin; 2 – Amur-Tunguska interfluvium; 3 – state border; 4 – well cluster 1; 5 – well cluster 2; 6 – well cluster 3.

depend on the reducing environment, which leads to the accumulation of increased concentrations of iron and manganese. Groundwater in the studied wells is hydrocarbonate with a mixed cationic composition. The hydrogen index (pH) varies from 6.0 to 6.8. The concentration of sulfates in the upper aquifer varies from 5.5 to 7.8 mg/dm³. There is no dissolved oxygen in groundwater. The oxidation-reduction potential of groundwater is in the range from minus 100 to plus 100 mV. The content of dissolved organic carbon (DOC) varies from 0.2 to 2.1 mg/dm³. However, during the flood period (August–September 2013), the concentration of DOC in the groundwater of the upper aquifer located in the Pemzenskaya channel zone increased to 7.5 mg/dm³.

Hydrogen sulfide and sulfate-reducing bacteria were detected in all studied wells. The accumulation of H₂S in groundwater is prevented not only by the overall low content of sulfate ion, but also by the constant presence of iron oxide in the solution, which binds it. The content of this gas in well water varied over a wide range: from 0.005 to 0.072 mg/dm³ (Fig. 2). Elevated concentrations of H₂S were recorded in the summer-autumn period of 2013 and 2019 in the middle and lower layers of the aquifer in groundwater in the RBF zone. The minimum values of H₂S concentrations in water were determined in the upper layers of the aquifer. It was found that in all wells there is a regular increase in the H₂S concentration with depth.

In September 2013, during the flood on the Amur River, there was a decrease in the concentration of H₂S and an increase in the number of sulfate-reducing bacteria, which is probably due to the flow of surface water into the aquifer, since the floodplain where the wells were located was flooded to a depth of 3 m.

The content of organic matter, hydrogen sulfide and the number of SRB (Table 1) in groundwater in the coastal zone varies both during the seasons and by the location of the wells. The maximum diversity of components (PACs, phenols and low molecular weight alkanes) and high OM content were observed after spring snowmelt and especially after the flood, in wells located close to the riverbank. A high similarity with river water in terms of total OM content, determined spectrophotometrically with use of SAC₂₅₄, was characteristic of groundwater sampled at a distance of 50 m from the riverbank.

In August 2013 and 2019, during the period of high water levels on the Amur River, the maximum abundance of SRB was recorded in all the studied wells and the Pemzenskaya channel. It should be emphasized that the number of SRB in wells 1001-1 and 1003-3 was comparable in high (~ 500 CFU/ml). During this period, the maximum number of sulfate reducers (725 CFU/ml) was observed in the surface layer of the aquifer in well 1002-1, located outside the water intake area near summer cottages.

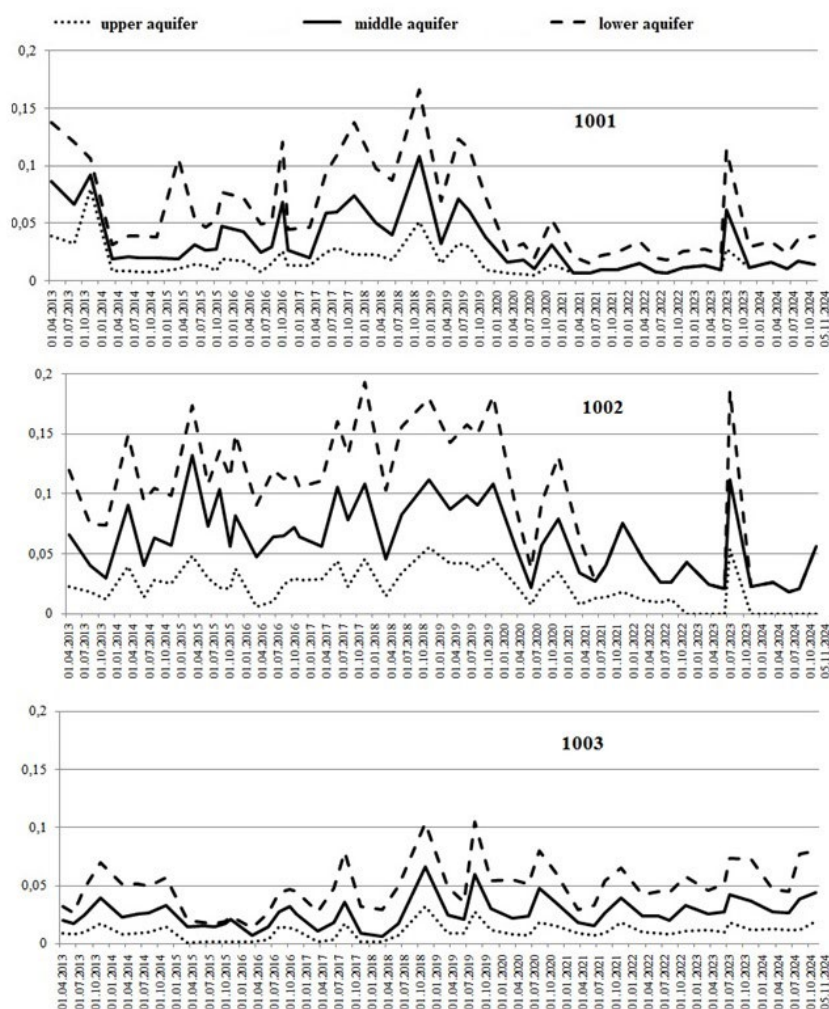


Fig.2. Long-term dynamics of hydrogen sulfide content (mg/dm³) in groundwater.

Table 1. Seasonal dynamics of the abundance of sulfate-reducing bacteria in groundwater and river water (RW), CFU/ml

Water samples	Aquifer. depth. m.	2013			2019			2024		
		March	August	November	March	August	November	March	August	November
RW	4.5	79.6±7.2	435.2±26.5	236.2±22.3	127.6±13.2	456±11	84.3±5.2	63.8±4.4	88.4±7.9	45.4±5.2
1001-1	Upper. 15.7	85.3±8.3	503.5±29.7	123.8±12.1	<10	500	24.0±2.0	72.4±6.1	85.2±7.5	312.7±19.3
1001-2	Middle. 25.7	114.2±10.5	512.7±30.5	257.4±24.3	<10	96±9	78.4±3.1	-	-	-
1001-3	Lower. 35.7	124.7±11.4	534.6±32.8	282.0±26.3	<10	124±10	32.0±2.3	89.1±7.8	73.9±6.6	86.5±8.3
1002-1	Upper. 14.7	97.3±8.9	725.4±43.6	216.2±18.4	115.3±10.4	725±34	56.3±2.8	-	-	-
1002-2	Middle. 27.7	135.2±13.7	446.3±27.2	245.3±23.7	98.2±8.3	56±6	48.6±2.5	62.5±3.8	65.3±6.2	524.3±24.7
1002-3	Lower. 38.7	247.4±24.6	468.7±28.3	278.7±25.2	<10	245±21	26.4±2.2	-	-	-
1003-1	Upper. 20.8	54.6±3.2	427.3±24.4	136.5±14.6	<10	48±4	32.6±2.4	49.7±4.3	32.7±1.8	548.4±25.3
1003-2	Middle. 40.8	82.2±5.8	459.5±27.8	232.7±21.4	<10	235±19	46.4±2.5	75.5±7.2	56.5±5.9	728.2±31.5
1003-3	Lower. 54.8	123.4±11.3	497.8±29.2	293.4±26.8	<10	456±22	98.2±6.5	92.8±7.9	72.6±6.4	473.8±23.5

River water in the late autumn period was characterized by a high number of all groups of heterotrophic microorganisms. This is due to the high content of organic matter of plant origin coming from surface runoff, as well as low water content. In wells located close to the riverbank (50-500 m), the high concentration of hydrogen sulfide (from 0.035 to 0.054 mg/dm³) was recorded in the lower aquifer in August 2013. During the catastrophic flood of 2013 on the Amur River (July, August), there was a decrease in the concentration of hydrogen sulfide and an increase in the abundance of SRB (Kulakov and Andreeva, 2016). In addition, the increase in the number of SRB in surface waters in the Khabarovsk region during the 2013 flood was associated with changes in oxidation-reduction conditions. At low water levels in June 2023, the maximum hydrogen sulfide content (0.062 mg/dm³) was recorded in the lower layer of the aquifer in a well located close to the riverbank, compared to river water (0.021 mg/dm³).

The minimum abundance of sulfate reducers was found in all studied wells in March 2019, despite the sufficient amount of dissolved organic matter and sulfates in groundwater. The autumn period of 2019 characterized by a decrease in the number of SRB in all studied wells to 98 CFU/mL against the background of a high concentration of sulfates (from 10.0 to 27.0 mg/dm³). In November 2019, the number of SRB in the Pemzenskaya channel decreased by approximately 5 times compared to the summer period.

4. Conclusions

The conducted studies of the seasonal dynamics of the hydrogen sulfide content and organic matter, as well as the number of different groups of microorganisms in groundwater indicate their significant differences depending on the location of the well and the depth of water sampling. Changes in the qualitative

composition of groundwater at natural biogeochemical barriers depend on the activity of sulfate reduction in the layers of the aquifer, microbiological processes of transformation of OM entering with river filtrate, as well as on the hydrological regime of surface waters. According to long-term studies of the composition of groundwater based on chemical and microbiological indicators, it has been established that in order to predict and ensure sustainable quality of drinking water, it is necessary to take into account the multifactorial nature of the interaction of river and groundwater, including seasonal changes in the hydrological regime and the nature of the distribution of OM across the aquifer.

The main biogeochemical factors influencing the dynamics of sulfate reduction in groundwater include: anaerobic conditions, the presence of organic matter, the presence of sulfates and sulfate-reducing bacteria.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to V.V. Kulakov and V.I. Kim (Laboratory of Hydrology and Hydrogeology of the Institute of Water and Ecology problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences) for organizing the expedition work and assistance in collecting water samples.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

References

Gar’kusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G. et al. 2023. Concentration and emission of methane and hydrogen sulfide in lake Baskunchak, Ulan-Blag beam creek and degassing groundwater sources in spring. Bulletin of higher educational

institutions. North Caucasus region. *Natural science* 3: 80–92. DOI: [10.18522/1026-2237-2023-3-80-92](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-80-92) (in Russian)

Kondrat'eva L.M., Andreeva D.V. 2018. Effect of a flood in the Amur River on organic matter dynamics in groundwater. *Water Resources* 45(6): 887–896. DOI: [10.1134/S009780781806009X](https://doi.org/10.1134/S009780781806009X)

Kulakov V.V., Andreeva D.V. 2016. Dissolved gases in groundwater in the Amur-Tunguska interfluve. *Russian journal of pacific geology* 35(2): 83–93. (in Russian)

Postgate J.R. 1984. *The Sulphate Reducing Bacteria*. 2nd Edition. Cambridge : Cambridge University Press.

Bakx W., Bense V.F., Karaoulis M. et al. 2023. Measuring groundwater flow velocities near drinking water extraction wells in unconsolidated sediments. *Water* 15: e2167. DOI: [10.3390/w15122167](https://doi.org/10.3390/w15122167)

Flemming H.-C., Wuertz S. 2019. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nat. Rev. Microbiology* 17(4): 247–260. DOI: [10.1038/s41579-019-0158-9](https://doi.org/10.1038/s41579-019-0158-9)

Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N. 2015. Biofilm formation by groundwater microbial complexes in vitro. *Appl. Biochemistry and Microbiology* 51(9): 48–55. DOI: [10.1134/S0003683815090057](https://doi.org/10.1134/S0003683815090057)

Kumar S. 2006. *Organic chemistry. Spectroscopy of organic compounds*. Guru Nanak Dev University.

Lee B.M., Seo Y.S., Hur J. 2015. Investigation of adsorptive fractionation of humic acid on graphene oxide using fluorescence EEM-PARAFAC. *Water Research* 73: 242–252. DOI: [10.1016/j.watres.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.01.020)

Lin H., Ascher D.B., Myung Y. et al. 2021. Mercury methylation by metabolically versatile and cosmopolitan marine bacteria. *ISME J* 15(6): 1810–1825. DOI: [10.1038/s41396-020-00889-4](https://doi.org/10.1038/s41396-020-00889-4)

Miao Z., Brusseau M.L., Carroll K.C. et al. 2012. Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environmental Geochemistry and Health* 34: 539–550. DOI: [10.1007/s10653-011-9423-1](https://doi.org/10.1007/s10653-011-9423-1)

Singh P., Kumar P., Mehrotra I. et al. 2010. Impact of riverbank filtration on treatment of polluted river water. *J. of Environ. Management* 91(5): 1055–1062. DOI: [10.1016/j.jenvman.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.11.013)

Zhang B., Chen T., Guo J. et al. 2020. Microbial mercury methylation profile in terminus of a high-elevation glacier on the northern boundary of the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment* 708: 135226. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135226](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135226)

Zhang Zh., Zhang Ch., Yang Y. et al. 2022. A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production* 376: 134109. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134109](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134109)

Особенности сульфатредукции микробными комплексами подземных вод



Андреева Д.В.*, Кондратьева Л.М.

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, д.56, г. Хабаровск, 680000, Россия

АННОТАЦИЯ. Сульфатредукция является важным биогеохимическим процессом в подземных водоносных горизонтах. Присутствие сероводорода в среде является маркером разрушения органических веществ в бескислородных условиях и активизации микробиологических процессов. Исследования характера взаимодействия поверхностных и подземных вод являются актуальными для оценки санитарно-гигиенических показателей питьевой воды. В работе рассматриваются результаты определения содержания органических веществ, сероводорода и численности сульфатредуцирующих бактерий в подземных водах в зоне речной береговой фильтрации. Установлено, что активность процессов сульфатредукции в подземных водах существенно изменяется в пространстве и во времени. Максимальная численность сульфатредуцирующих бактерий сопровождалась активным образованием сероводорода в водоносном горизонте после весеннего снеготаяния на глубине 45 м в скважинах, расположенных на расстоянии 1500 м от берега. На расстоянии 50 м от берега качество подземных вод существенно изменяется в верхнем водоносном горизонте в летне-осенний период, особенно после наводнений.

Ключевые слова: сульфатредукция, органические вещества, подземные воды, речная береговая фильтрация

Для цитирования: Андреева Д.В., Кондратьева Л.М. Особенности сульфатредукции микробными комплексами подземных вод // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 794-803. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-794

1. Введение

В связи с глобальным загрязнением гидросферы и предотвращением экологических рисков во всем мире прослеживается тенденция переориентации питьевого водоснабжения населения с поверхностных источников на подземные воды. Особое внимание при оптимизации управления водными ресурсами уделяют их защищенности, переносу загрязняющих веществ и реакции подземных вод на стресс (Bakx et al., 2023). Поэтому актуальность приобретают исследования по расчету времени распространения загрязняющих веществ при смешивании подземных водоносных горизонтов с поверхностными водами (Lee et al., 2015). Принято считать, что высокоскоростные потоки подземных вод часто расположены вблизи зоны разгрузки бассейнов рек (Singh et al., 2010). В зоне взаимодействия речных и подземных вод формируется биогеохимический барьер с особыми физико-химическими условиями, которые зависят от гидрологического режима и активности биогеохимических процессов. Загрязнение подземных вод является важной

проблемой при их использовании на приречных водозаборах.

Значительное ухудшение качества подземных вод наблюдается во время наводнений на крупных реках (Кондратьева и Андреева, 2018). Формирование качества воды в зоне речной береговой фильтрации (РБФ) определяется многими факторами: гидрологическими, геологическими, гидрохимическими и гидробиологическими. При трансформации загрязняющих веществ в водной среде значительную долю органических примесей могут составлять продукты микробного происхождения (Kondratyeva and Litvinenko, 2015). Микроорганизмы подземных вод существуют в виде сложно-структурированных консорциумов (Flemming and Wuertz, 2019). В подземных водах взаимосвязано происходят следующие биогеохимические процессы: аэробное окисление органических веществ (ОВ), денитрификация, восстановление марганца (IV) и железа (III), сульфатредукция (Miao et al., 2012) и метаногенез. Сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) и метаногены, занимая одни и те же экологические ниши, нередко используют одина-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: freckles2008@yandex.ru (Д.В. Андреева)

Поступила: 27 июня 2025; Принята: 15 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ковые питательные субстраты, в частности ацетат, формиат и молекулярный водород. Поэтому между ними за обладание этими субстратами возникает конкурентная борьба, преимущество в которой принадлежит сульфатредуцирующим бактериям (Гарькуша и др., 2023). Важное экологическое значение СРБ связано с их участием в процессе деструкции ОВ и продуцировании химически активного вещества – сероводорода.

В наших исследованиях в качестве показателя активности сульфатредукции были использованы численность СРБ и содержание сероводорода (H_2S), накопление которого приводит к существенному изменению органолептических свойств подземных вод. Растворенный в воде сероводород – это суммарное содержание недиссоциированных молекул газообразного H_2S , ионов гидросульфида HS^- и, весьма редко, сульфидов S^{2-} (при $pH > 10$). Соотношение определяется главным образом величиной pH воды, в меньшей степени влияют температура и минерализация. Ранее было показано, что концентрация сероводорода в подземных водах зависит от содержания и состава ОВ (Кондратьева и Андреева, 2018), а также от присутствия специализированных эколого-физиологических групп микроорганизмов, включая СРБ. Численность СРБ характеризует окислительно-восстановительную обстановку, наличие сульфатов и дефицит кислорода в водной среде. Известно, что в качестве ключевого микробиологического метильатора ртути во многих водных системах выступают СРБ, которые способны окислять разные источники углерода при температуре $0^\circ C$ (Zhang et al., 2022). Сульфатредуцирующие и железоредуцирующие бактерии являются основными микроорганизмами, которые участвуют в метилировании ртути в рисовых почвах, донных отложениях, океанах, озерах, ледниках (Lin et al., 2021; Zhang et al., 2020).

Цель наших исследований состояла в оценке роли процесса сульфатредукции в формировании качества подземных вод в зоне речной береговой фильтрации в условиях различного гидрологического режима.

2. Материалы и методы

Территория Амуро-Тунгусского междуречья входит в провинцию железосодержащих, марга-

нецсодержащих и кремнийсодержащих пресных подземных вод с низкими концентрациями фтора. Особенности формирования химического состава подземных вод Амуро-Тунгусского междуречья зависят от восстановительной обстановки в чехле Среднеамурского артезианского бассейна (Кулаков и Андреева, 2016). Среднеамурский артезианский бассейн, расположенный в среднем течении р. Амур на территории России, входит в состав единого Саньцзян-Среднеамурского (осадочного) бассейна, юго-западная часть которого расположена в Китае (Рис. 1).

Для исследования были выбраны три куста скважин, расположенных на разном удалении (куст 1 – 50, куст 2 – 500, куст 3 – 1500 м) от левого берега Пемзенской протоки (Рис. 1). Ярусные кусты состоят из 3-х компактно расположенных скважин, оборудованных фильтрами длиной 2 м на разной глубине водоносного горизонта (Таблица 1). Воду отбирали с разной глубины водоносного горизонта с помощью погружного насоса GRUNDFOS после 15 минутной прокачки. Речную воду отбирали с глубины 0.5 м от поверхности в 50 м от берега. Глубина в месте отбора речной воды составляет 4,5 м. Пробы отбирали в период с 2013 по 2024 гг. весной (март), летом (август) и осенью (ноябрь).

Массовую концентрацию сероводорода определяли фотометрическим методом с N,N-диметил-p-фенилендиамином на спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 при $\lambda = 667$ нм (РД 52.24.450-2010). Численность культивируемых гетеротрофных бактерий в пробах воды определяли методом предельных разведений на рыбо-пептонном агаре (РПА), разбавленном в 10 раз (РПА:10). Аммонифицирующих бактерий (АМБ), участвующих в процессе аммонификации ОВ, выращивали на РПА. Для СРБ использовали среду Постгейта С (Postgate, 1984). Численность выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ/мл). Суммарное содержание растворенных ОВ определяли при $\lambda = 254$ нм и выражали в виде спектрального коэффициента абсорбции (SAC_{254} , ед. абс.) (Kumar, 2006).

3. Результаты и обсуждение

Сероводород в природных водах является продуктом восстановительных процессов, протекающих при биохимическом разложении ОВ, как



Рис.1. Схема расположения участка исследований: 1 – Среднеамурский артезианский бассейн; 2 – Амуро-Тунгусское междуречье; 3 – государственная граница; 4 – куст 1; 5 – куст 2; 6 – куст 3.

естественного происхождения, так и поступающих со сточными водами химической, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, хозяйственно-бытовыми стоками. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в подземных водах и придонных слоях поверхностных водных объектов, характеризующихся слабым перемешиванием в условиях дефицита кислорода.

Для оценки роли процесса сульфатредукции в подземных водах в зоне РБФ, кроме определения концентрации сероводорода, были проведены исследования численности СРБ, участвующих в биогеохимическом цикле серы.

Особенности формирования химического состава подземных вод Тунгусского месторождения зависят от восстановительной обстановки, что приводит к накоплению повышенных концентраций железа и марганца. Подземные воды в исследуемых скважинах гидрокарбонатные со смешанным катионным составом. Водородный показатель (рН) изменяется в пределах от 6,0 до 6,8. Концентрация сульфатов в верхнем водоносном горизонте изменяется от 5,5 до 7,8 мг/дм³. Растворенный кислород в подземных водах отсутствует. Окислительно-восстановительный потенциал подземных вод находится в пределах от минус 100 до плюс 100 мВ. Содержание растворенного органического углерода (C_р) изменяется от 0,2 до 2,1 мг/дм³. Однако,

в период прохождения паводка (август–сентябрь 2013) концентрация C_р в подземных водах верхнего водоносного горизонта, расположенного в зоне Пемзенской протоки, увеличивалась до 7,5 мг/дм³.

Во всех исследуемых скважинах был обнаружен сероводород и сульфатредуцирующие бактерии. Накоплению H₂S в подземных водах препятствует не только общее низкое содержание сульфатного иона, но и постоянное присутствие в растворе закиси железа, которая связывает его. Содержание этого газа в воде скважин изменялось в широком диапазоне: от 0,005 до 0,072 мг/дм³ (Рис. 2). Повышенные концентрации H₂S зафиксированы в летне-осенний период 2013 и 2019 г. в среднем и нижнем слоях водоносного горизонта в подземных водах в зоне РБФ. Минимальные значения концентраций H₂S в воде определяли в верхних слоях водоносного горизонта. Установлено, что во всех скважинах происходит закономерное увеличение концентрации H₂S с глубиной.

В сентябре 2013 года во время паводка на р. Амур происходило снижение концентрации H₂S и рост численности сульфатредуцирующих бактерий, что, вероятно, связано с поступлением поверхностных вод в водоносный горизонт, так как пойма с местом расположения скважин была затоплена на глубину 3 м.

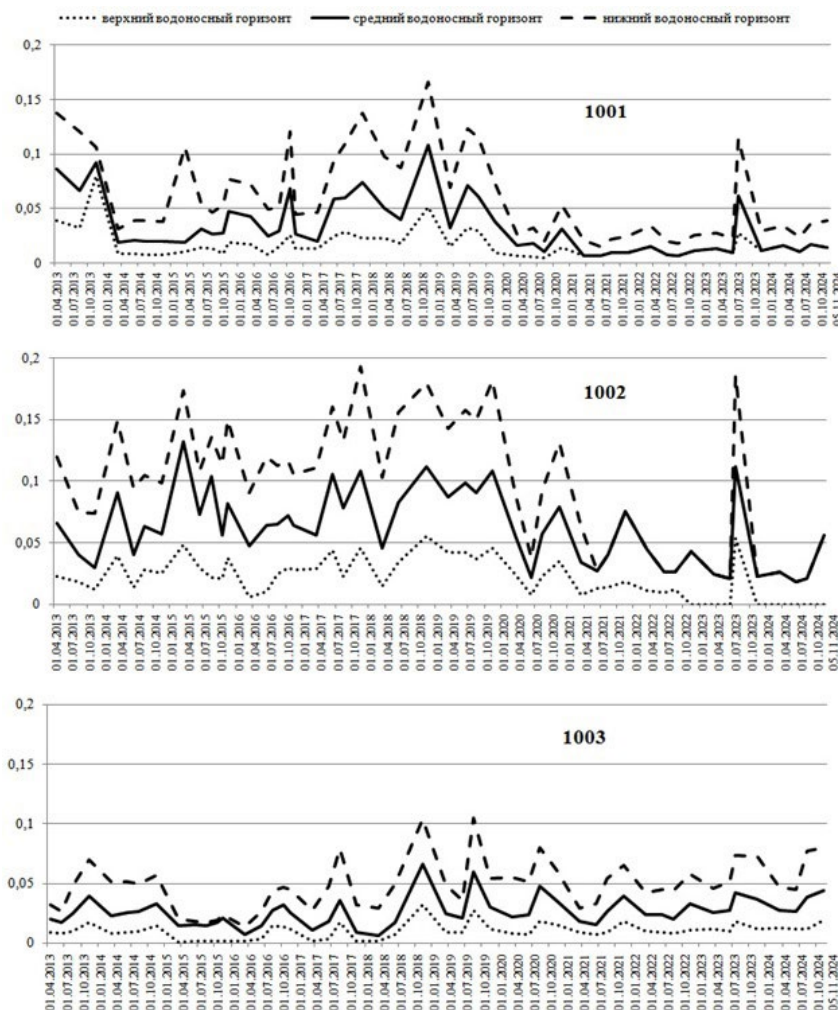


Рис.2. Многолетняя динамика содержания сероводорода (мг/дм³) в подземных водах.

Таблица 1. Сезонная динамика численности сульфатредуцирующих бактерий в подземных водах и речной воде (РВ), КОЕ/мл.

Пробы воды	Водоносный горизонт, глубина, м.	2013			2019			2024		
		март	август	ноябрь	март	август	ноябрь	март	август	ноябрь
РВ	4,5	79,6 ± 7,2	435,2 ± 26,5	236,2 ± 22,3	127,6 ± 13,2	456 ± 11	84,3 ± 5,2	63,8 ± 4,4	88,4 ± 7,9	45,4 ± 5,2
1001-1	Верхний, 15,7	85,3 ± 8,3	503,5 ± 29,7	123,8 ± 12,1	< 10	500	24,0 ± 2,0	72,4 ± 6,1	85,2 ± 7,5	312,7 ± 19,3
1001-2	Средний, 25,7	114,2 ± 10,5	512,7 ± 30,5	257,4 ± 24,3	< 10	96 ± 9	78,4 ± 3,1	-	-	-
1001-3	Нижний, 35,7	124,7 ± 11,4	534,6 ± 32,8	282,0 ± 26,3	< 10	124 ± 10	32,0 ± 2,3	89,1 ± 7,8	73,9 ± 6,6	86,5 ± 8,3
1002-1	Верхний, 14,7	97,3 ± 8,9	725,4 ± 43,6	216,2 ± 18,4	115,3 ± 10,4	725 ± 34	56,3 ± 2,8	-	-	-
1002-2	Средний, 27,7	135,2 ± 13,7	446,3 ± 27,2	245,3 ± 23,7	98,2 ± 8,3	56 ± 6	48,6 ± 2,5	62,5 ± 3,8	65,3 ± 6,2	524,3 ± 24,7
1002-3	Нижний, 38,7	247,4 ± 24,6	468,7 ± 28,3	278,7 ± 25,2	< 10	245 ± 21	26,4 ± 2,2	-	-	-
1003-1	Верхний, 20,8	54,6 ± 3,2	427,3 ± 24,4	136,5 ± 14,6	< 10	48 ± 4	32,6 ± 2,4	49,7 ± 4,3	32,7 ± 1,8	548,4 ± 25,3
1003-2	Средний, 40,8	82,2 ± 5,8	459,5 ± 27,8	232,7 ± 21,4	< 10	235 ± 19	46,4 ± 2,5	75,5 ± 7,2	56,5 ± 5,9	728,2 ± 31,5
1003-3	Нижний, 54,8	123,4 ± 11,3	497,8 ± 29,2	293,4 ± 26,8	< 10	456 ± 22	98,2 ± 6,5	92,8 ± 7,9	72,6 ± 6,4	473,8 ± 23,5

Содержание ОВ, сероводорода и численность СРБ (Таблица 1) в подземных водах в прибрежной зоне изменяется как в течение сезонов, так и по местоположению скважин. Максимальное разнообразие компонентов (ПАУ, фенолы и низкомолекулярные алканы) и высокое содержание ОВ наблюдали после весеннего снеготаяния и особенно после паводка, в скважинах, расположенных близко к берегу. Большое сходство с речной водой по общему содержанию ОВ, определяемому спектрофотометрически по SAC_{254} было характерно для подземных вод, отобранных на расстоянии 50 м от берега.

В августе 2013 и 2019 года, в период повышенной водности на р. Амур, зарегистрирована максимальная численность СРБ во всех исследуемых скважинах и Пемзенской протоке (Таблица 1). Следует подчеркнуть, что численность СРБ в скважинах 1001-1 и 1003-3 была сопоставимо-высокой (~ 500 КОЕ/мл). В этот период максимальную численность сульфатредукторов (725 КОЕ/мл) наблюдали в поверхностном слое водоносного горизонта в скважине 1002-1, расположенной за территорией водозабора у дачных участков.

Речная вода в позднесенний период характеризовалась высокой численностью всех групп гетеротрофных микроорганизмов. Это обусловлено высоким содержанием ОВ растительного происхождения, поступающих с поверхностным стоком, а также низкой водностью. В скважинах близко расположенных к берегу (50-500 м) высокая концентрация сероводорода (от 0,035 до 0,054 мг/дм³) зарегистрирована в нижних слоях водоносного горизонта в августе 2013 года. Во время катастрофического наводнения 2013 г. на р. Амур (июль, август) происходило снижение концентрации сероводорода и рост численности СРБ (Кулаков и Андреева, 2016). Увеличение численности СРБ в поверхностных

водах в районе г. Хабаровска в период наводнения 2013 г. было связано с изменением окислительно-восстановительных условий. При низком уровне воды в июне 2023 г. максимальное содержание сероводорода (0,062 мг/дм³) зарегистрировано в нижнем слое водоносного горизонта в скважине, расположенной близко к берегу, по сравнению с речной водой (0,021 мг/дм³).

Минимальная численность сульфатредукторов обнаружена во всех исследуемых скважинах в марте 2019 года, не смотря на достаточное количество растворенных ОВ и сульфатов в подземных водах. Для осеннего периода 2019 года характерно снижение численности СРБ во всех исследуемых скважинах до 98 КОЕ/мл на фоне высокой концентрации сульфатов (от 10,0 до 27,0 мг/дм³). В ноябре 2019 года в Пемзенской протоке произошло снижение численности СРБ примерно в 5 раз по сравнению с летним периодом.

4. Выводы

Проведенные исследования сезонной динамики содержания сероводорода и ОВ, а также численности различных групп микроорганизмов в подземных водах свидетельствуют об их существенном различии в зависимости от места расположения скважины и глубины водоносного горизонта. Изменения качественного состава подземных вод на естественных биогеохимических барьерах зависят от активности сульфатредукции по слоям водоносного горизонта, микробиологических процессов трансформации ОВ, поступающих с речным фильтратом, а также от гидрологического режима поверхностных вод. Согласно многолетним исследованиям состава подземных вод по химическим и микробиологическим показателям установлено,

что для прогнозирования и устойчивого качества питьевых вод необходимо учитывать многофакторность взаимодействия речных и подземных вод, включая сезонное изменение гидрологического режима и характер распределения ОВ по водоносному горизонту.

К основным биогеохимическим факторам, влияющим на динамику сульфатредукции в подземных водах, относятся: анаэробные условия, наличие органических веществ, присутствие сульфатов и сульфатредуцирующих бактерий.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.В. Кулакову и В.И. Киму (лаборатория гидрологии и гидрогеологии ИВЭП ДВО РАН) за организацию экспедиционных работ и помощь при отборе проб воды.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Трубник Р.Г. и др. 2023. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье Балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период. Известия вузов. Северокавказский регион. Естественные науки 3: 80–92. DOI: [10.18522/1026-2237-2023-3-80-92](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-80-92)

Кондратьева Л.М., Андреева Д.В. 2018. Влияние наводнения на реке Амур на динамику органических веществ в подземных водах. Водные ресурсы 45(6): 634–644.

Кулаков В.В., Андреева Д.В. 2016. Растворенные газы подземных вод Амуро-Тунгусского междуречья. Тихоокеанская геология 35(2): 83–93.

Postgate J.R. 1984. The Sulphate Reducing Bacteria. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press.

Bakx W., Bense V.F., Karaoulis M. et al. 2023. Measuring groundwater flow velocities near drinking water extraction wells in unconsolidated sediments. Water 15: e2167. DOI: [10.3390/w15122167](https://doi.org/10.3390/w15122167)

Flemming H.-C., Wuertz S. 2019. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. Nat. Rev. Microbiology 17(4): 247–260. DOI: [10.1038/s41579-019-0158-9](https://doi.org/10.1038/s41579-019-0158-9)

Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N. 2015. Biofilm formation by groundwater microbial complexes in vitro. Appl. Biochemistry and Microbiology 51(9): 48–55. DOI: [10.1134/S0003683815090057](https://doi.org/10.1134/S0003683815090057)

Kumar S. 2006. Organic chemistry. Spectroscopy of organic compounds. Guru Nanak Dev University.

Lee B.M., Seo Y.S., Hur J. 2015. Investigation of adsorptive fractionation of humic acid on graphene oxide using fluorescence EEM-PARAFAC. Water Research 73: 242–252. DOI: [10.1016/j.watres.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.01.020)

Lin H., Ascher D.B., Myung Y. et al. 2021. Mercury methylation by metabolically versatile and cosmopolitan marine bacteria. ISME J 15(6): 1810–1825. DOI: [10.1038/s41396-020-00889-4](https://doi.org/10.1038/s41396-020-00889-4)

Miao Z., Brusseau M.L., Carroll K.C. et al. 2012. Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. Environmental Geochemistry and Health 34: 539–550. DOI: [10.1007/s10653-011-9423-1](https://doi.org/10.1007/s10653-011-9423-1)

Singh P., Kumar P., Mehrotra I. et al. 2010. Impact of riverbank filtration on treatment of polluted river water. J. of Environ. Management 91(5): 1055–1062. DOI: [10.1016/j.jenvman.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.11.013)

Zhang B., Chen T., Guo J. et al. 2020. Microbial mercury methylation profile in terminus of a high-elevation glacier on the northern boundary of the Tibetan Plateau. Science of the Total Environment 708: 135226. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135226](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135226)

Zhang Zh., Zhang Ch., Yang Y. et al. 2022. A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment. Journal of Cleaner Production 376: 134109. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134109](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134109)