

ПРОЯВЛЕНИЕ БИОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ОТВАЛАХ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наталья Викторовна Юркевич

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доцент кафедры геофизических систем; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, тел. (383)363-91-94, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией геоэлектрики, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Светлана Борисовна Бортникова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, тел. (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Алексей Викторович Еделев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, тел. (383)330-95-36, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

Ольга Петровна Саева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (383) 363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

В результате исследований отвала сульфидсодержащих отходов в зимнее время установлена тесная взаимосвязь температуры грунта, концентрации диметилсульфида (ДМС) в приповерхностном слое атмосферы и удельного электрического сопротивления среды. Обнаружена локальная аномалия пониженного электросопротивления, которой соответствует грунт с положительной температурой. Установлено, что в приповерхностном слое над этой областью повышена концентрация ДМС, что мы связываем с метилированием сульфидсодержащих соединений автотрофными микроорганизмами.

Ключевые слова: хвостохранилище, сульфидные отходы, электротомография, газовые эманации, метилирование.

THE BIOTIC PROCESSES IN SULFIDEBEARING MINE TAILINGS IN WINTER ACCORDING TO GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Nataliya V. Yurkevich

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20,

Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor, Department of Geophysical Systems; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, phone: (383)363-91-94, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Head of Laboratory of Geoelectric, phone: (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Svetlana B. Bortnikova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383)330-95-36, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Aleksey V. Edelev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)330-95-36, e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

Olga P. Saeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

A close relationship has been established between the concentration of dimethyl sulphide in the near-surface layer of the atmosphere, the soil temperature and the electrical resistivity as a result of studies of sulphide-bearing mine tailings in winter. A local anomaly of the reduced electrical resistivity which corresponds to a soil with a positive temperature is found. The concentration of dimethyl sulphide is increased in the near-surface layer above this area, which we associate with methylation of sulfide-bearing compounds by autorotrophic microorganisms.

Key words: sulfide-bearing mine tailings, electrical resistivity tomography, temperature, emission, methylation.

Сульфидсодержащие отходы обогащения руд являются источником кислых дренажных потоков и газовых эманаций [1]. Особый интерес представляют сезонные вариации строения и состава техногенных систем в зависимости от параметров окружающей среды в районах с континентальным климатом, характеризующимся холодной продолжительной зимой и коротким теплым летом. Грунты в мерзлом состоянии представляют собой сложную многофазную систему, которая в силу непостоянства температуры и давления непрерывно находится в динамике. При отрицательных температурах происходят скачки электрического потенциала на границе пленочный раствор – лед, возрастают скорости некоторых химических реакций [2]. Наиболее интенсивным геохимическим преобразованиям подвергается слой сезонных колебаний температуры, в котором активизируется химическое выщелачивание, связанное с растрескиванием породы под воздействием расширяющейся и замерзающей поровой жидкости. Сульфидсодержащая порода подвергается в таких условиях окислению, формируется кислый дренаж, выщелачиваются металлы и металлоиды [3]. Работа-

ми предыдущих лет с помощью электротомографии и геохимических методов изучено строение и состав некоторых техногенных систем в Сибири и Забайкалье, найдены численные взаимосвязи электрофизических и геохимических параметров среды [4]. Целью настоящей работы стало определение взаимосвязи геоэлектрических и геохимических параметров техногенной среды в зимнее время на примере Урского отвала золоторудного месторождения (Кемеровская область).

Урской отвал, расположенный в пос. Барит Кемеровской области, был образован в 1930-х гг. (рис. 1). Он сложен барит-пиритовой сыпучкой из зоны окисления колчеданного Ново-Урского месторождения после извлечения золота цианированием. Общее содержание железа (в пересчете на Fe_2O_3) составляет 15 %, серы (в пересчете на SO_3) – 10 %. Рядом с его подножьем протекает природный ручей, становясь после отвала кислым сульфатным высокоминерализованным потоком с $\text{pH} = 2,1$, удельной электропроводностью 3,9 мСм/см и высокими концентрациями металлов и металлоидов (рис. 1, б, табл. 1) [5].



Рис. 1. Внешний вид Урского отвала (а) и дренажного ручья в летнее время (б), склон южной экспозиции, февраль (в)

Таблица 1

Максимальные концентрации элементов в растворах дренажного ручья, мг/л [5]

SO_4^{2-}	Fe	Al	Mn	Cu	Zn	Pb
6800	1500	310	18	3,4	21	0,32
Cr	Co	Ni	Cd	Be	As	Se
0,2	0,32	0,33	0,2	0,02	1,7	2,0

Для наблюдений за состоянием отвала в зимний период выбран склон южной экспозиции с перепадом высот 5 м. На момент исследований поверхность отвала в крутой части была покрыта слоем снега толщиной 0–5 см (рис. 1, в), у подножья мощность снегового покрова составляла около 50 см (рис. 2, а).

Для изучения детального строения верхней части разреза на глубину до 3 м на склоне отвала выполнены микрозондирования методом электротомографии (ЭТ) по профилю вдоль склона (рис. 1, в). Измерения проведены аппаратурой Скала-48 (ИНГГ СО РАН, Новосибирск). Шаг измерений по профилю составлял 0,3 м. Последовательность подключения электродов соответствовала дипольно-осевой установке с максимальным разномом центров питающего и приемного диполей 5,25 м. Длина профиля составила 14,1 м. Обработка данных ЭТ проводилась с помощью программы Res2Dinv (автор – М.Н. Loke), для решения обратной задачи применялся робастный способ инверсии [6].

Концентрацию ДМС в атмосферном воздухе над поверхностью отвала определяли газохроматографическим методом при помощи портативного газоанализатора ГАНК-4 (НПО «ГАНК», Москва) по стандартной методике в безветренное солнечное время в период времени с 14.00 до 16.00. Для этого снимали слой снега и пробивали отверстие диаметром 2 см и глубиной 10 см. Трубку газоанализатора погружали на глубину 5 см, записывали по 3 параллельных показания. В этих же точках измерялась температура грунта с помощью термощупа на глубине 0,1 м.

По данным ЭТ, верхняя часть геоэлектрического разреза до глубины 0,65 м характеризуется высоким УЭС (500–10 000 Ом·м), что связано с сезонным промерзанием. На склоне отвала практически отсутствует снег, что способствует относительно глубокому промерзанию. В интервале профиля 9,5–11,5 м выделяется аномалия пониженного до 50 Ом·м УЭС. В этом месте разрез перекрыт слоем снега толщиной 0,5 м, что препятствует промерзанию. В основании разреза, ниже глубины промерзания, отмечены породы с очень низким УЭС, что связано с их талым состоянием и повышенной кислотностью поровых растворов [4].

Сопоставление геоэлектрического разреза с данными о температуре (рис. 2) показывает, что в области локальной аномалии пониженного УЭС на интервале 9,5–11,5 м температура грунта на глубине 0,1 м положительная, до +0,4 °С, в то время как в остальных частях профиля – отрицательная, до –5 °С.

Над этой же аномалией УЭС отмечается повышенная концентрация ДМС в приповерхностном слое (до 0,2 мг/м³) по отношению к ПДК (0,08 мг/м³). В других точках опробования, где верхняя часть разреза отмечается высоким УЭС, концентрация ДМС не превышает 0,04 мг/м³ (рис. 3).

На рис. 3 показаны графики температуры грунта, концентраций ДМС и УЭС на глубине 0,1 м. Анализ графиков показывает, что отмечается тесная взаимосвязь этих параметров. В области положительных температур разреза наблюдаются низкие значения УЭС и высокие концентрации ДМС. Однако в точке 12,3 м высокие электросопротивления связаны с сухим состоянием пород при положительной температуре. Низкая влажность обуславливает слабую ак-

тивность биотических процессов и невысокий (относительно аномального участка) уровень ДМС.

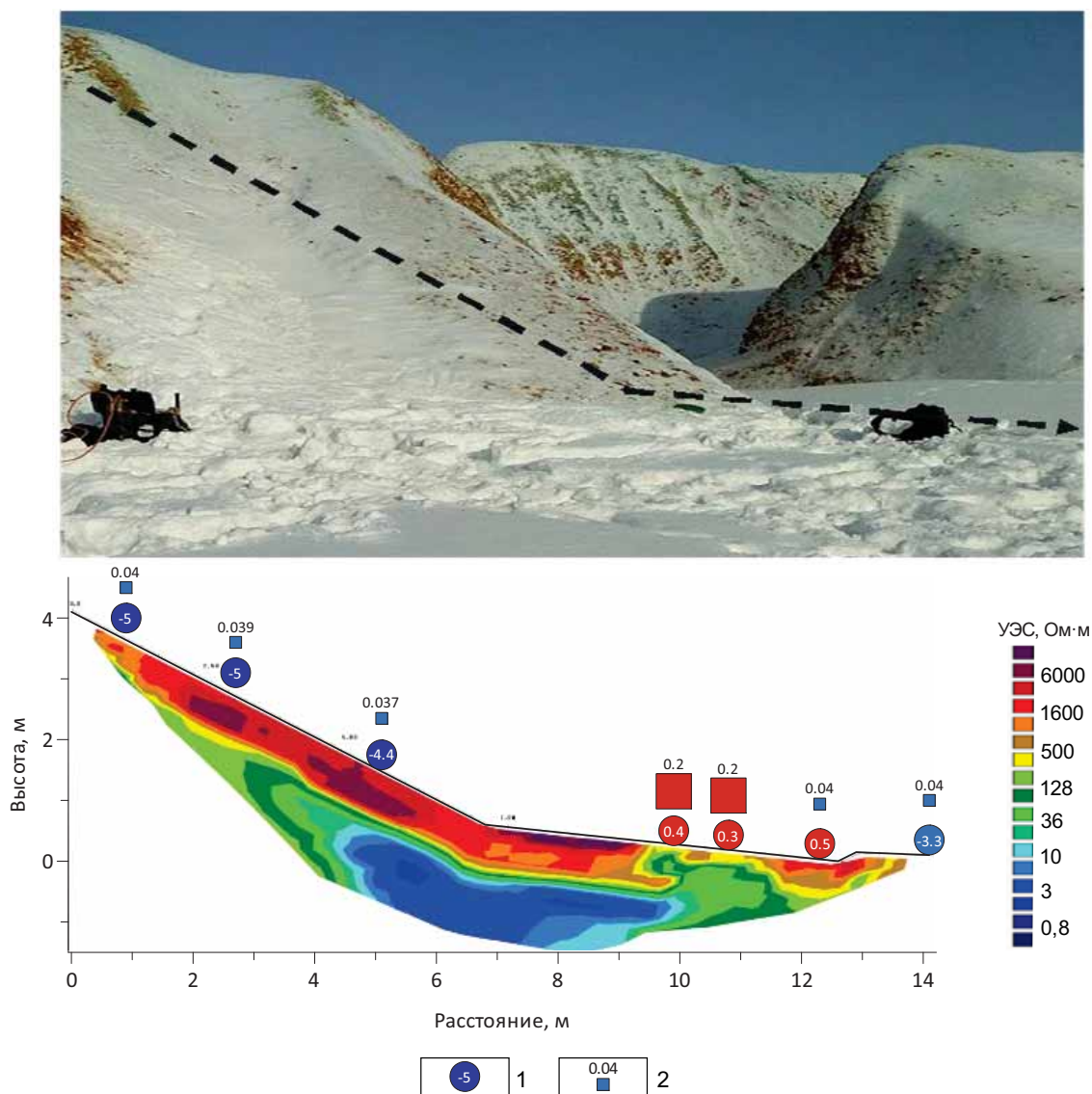
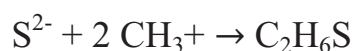


Рис. 2. Геоэлектрический разрез, температура грунта на глубине 0,1 м (1) и концентрация ДМС в приповерхностном слое атмосферы (2)

Присутствие ДМС (C_2H_6S) свидетельствует о метилировании сульфидсодержащих соединений автотрофными микроорганизмами *Pseudomonas* sp. and *Bacillus* sp. по реакции [7]:



Молекула ДМС обладает дипольным моментом (1,51 D), сравнимым с таковым для молекулы воды (1,84 D), что указывает на высокую вероятность формирования полярных ионных связей ДМС с двухвалентными катионами металлов и их вовлечение в газовый перенос [1, 7].

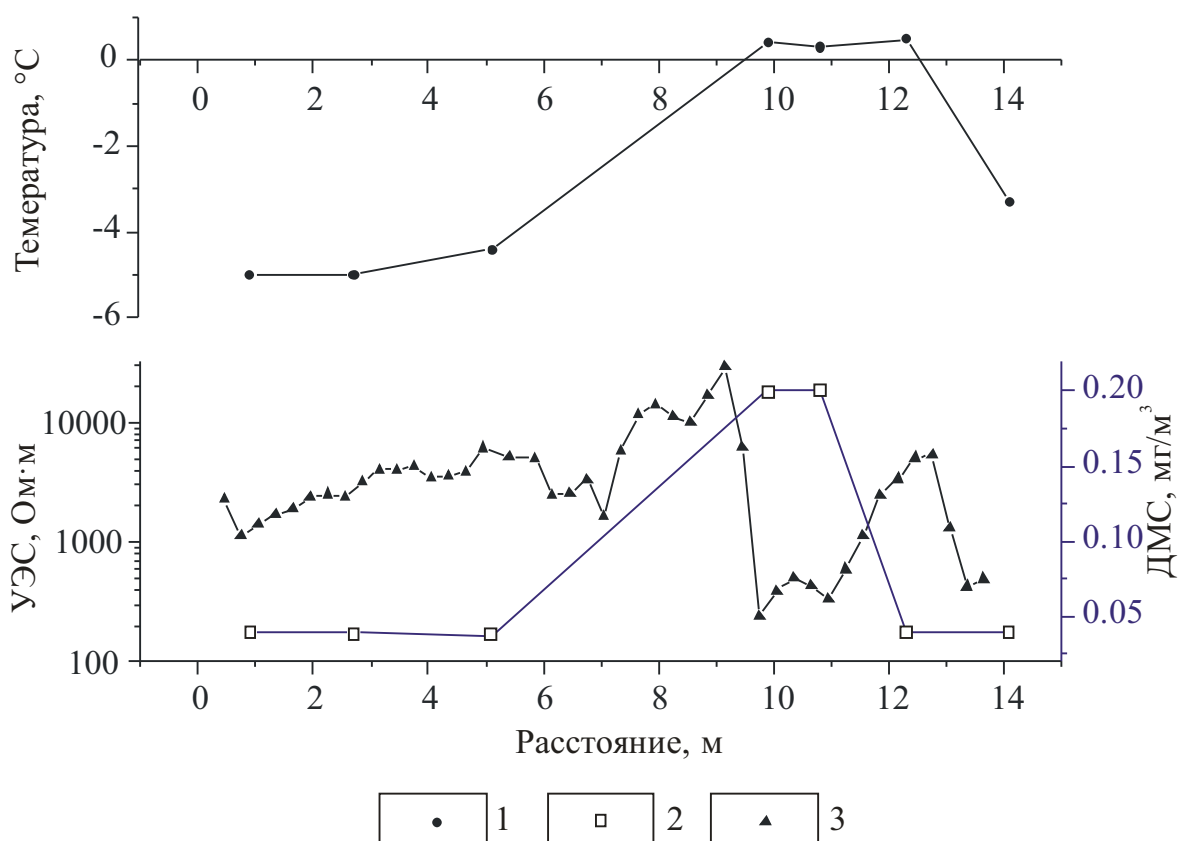


Рис. 3. Температура (1), концентрация ДМС (2) и удельное электрическое сопротивление среды (3) на глубине 0,1 м

Кроме того, найденные нами ранее в сульфидсодержащих хвостах бактерии *Pseudomonas* sp. and *Bacillus* sp. [8] способны метилировать соединения металлов и металлоидов (Hg, Se, Bi, Te, Sb, and As), увеличивая их подвижность [9, 10].

В результате исследований мы установили тесную взаимосвязь температуры грунта, концентрации ДМС в приземном слое атмосферы и удельного электрического сопротивления среды. Обнаружена локальная аномалия пониженного УЭС, которой соответствует грунт с положительной температурой.

Установлено, что в приповерхностном слое над аномальной по сопротивлению областью концентрация ДМС повышена по сравнению с остальными участками. Присутствие метилированных форм сульфид-содержащих газов указывает на протекание реакций с участием биоты даже в зимнее время. В то же время на участке с высоким УЭС, обусловленным низкой влажностью грунта, предполагается слабая активность биотических процессов, о чем говорит малый уровень ДМС.

Результаты сезонных наблюдений за трансформацией отходов позволят установить периоды наибольшей активности техногенной среды и выявить отклик таких изменений в электроразведочных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S. B. Bortnikova, N. V. Yurkevich, N. A. Abrosimova et al. // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – Vol. 186. – P. 256–269.
2. Птицын А. Б. Теоретическая геохимия. – Новосибирск : Академическое издательство Гео, 2006. – 180 с.
3. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area / N. V. Yurkevich, N. A. Abrosimova, S. B. Bortnikova et al. // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2017. – Vol. 99, I. 9–10. – P. 1328–1345.
4. Определение состава горнорудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) / М. И. Эпов, Н. В. Юркевич, С. Б. Бортникова и др. // *Геология и геофизика*. – 2017. – № 58(12). – С. 1944–1954.
5. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В. В. Оленченко, Д. О. Кучер, С. Б. Бортникова и др. // *Геология и геофизика*. – 2016. – № 4. – С. 782–795.
6. Loke M. H. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*. – 2009. – 57 p.
7. Виноградова И. В. Парообразные ионные формы элементов в почвенном воздухе и приземной атмосфере как индикаторы рудных месторождений и экологической обстановки : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – СПб., 1995. – 17 с.
8. As and Sb in Wastes of Komsomolsk Gold-extraction Factory: Results of Investigation of Water-wastes-bacteria Interaction / N. Abrosimova, A. Edelev, S. Bortnikova et al. // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2017. – Vol. 17. – P. 261–264.
9. Hale M. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits: the contribution of the Applied Geochemistry Research Group, Imperial College of Science and Technology, London // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2010. – Vol. 10, I. 3. – P. 261–267.
10. Bentley R., Chasteen T. G. Microbial methylation of metalloids: arsenic, antimony, and bismuth // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2002. – Vol. 66, I. 2. – P. 250–271.

REFERENCES

1. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S. B. Bortnikova, N. V. Yurkevich, N. A. Abrosimova et al. // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – Vol. 186. – P. 256–269.
2. Pticyn A. B. *Teoreticheskaja geohimija*. – Novosibirsk : Akademicheskoe izdatel'stvo Geo, 2006. – 180 s.
3. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area / N. V. Yurkevich, N. A. Abrosimova, S. B. Bortnikova et al. // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2017. – Vol. 99, I. 9–10. – P. 1328–1345.
4. Opredelenie sostava gornorudnyh othodov geohimicheskimi i geofizicheskimi metodami (na primere hvostohranilishha Salairskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata) / M. I. Jepov, N. V. Jurkevich, S. B. Bortnikova i dr. // *Geologija i geofizika*. – 2017. – № 58(12). – S. 1944–1954.
5. Vertikal'noe i lateral'noe rasprostranenie vysokomineralizovannyh rastvorov kislogo drenazha po dannym jelektrotomografii i gidrogeohimii (Urskoj otval, Salair) / V. V. Olenchenko, D. O. Kucher, S. B. Bortnikova i dr. // *Geologija i geofizika*. – 2016. – № 4. – S. 782–795.
6. Loke M. H. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*. – 2009. – 57 p.

7. Vinogradova I. V. Paroobraznye ionnye formy jelementov v pochvennom vozduhe i prizemnoj atmosfere kak indikatory rudnyh mestorozhdenij i jekologicheskoj obstanovki : avtoreferat dis. ... kand. geol.-min. nauk. – Sankt-Peterburg, 1995. – 17 s.
8. As and Sb in Wastes of Komsomolsk Gold-extraction Factory: Results of Investigation of Water-wastes-bacteria Interaction / N. Abrosimova, A. Edelev, S. Bortnikova et al. // Procedia Earth and Planetary Science. – 2017. – Vol. 17. – P. 261–264.
9. Hale M. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits: the contribution of the Applied Geochemistry Research Group, Imperial College of Science and Technology, London // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2010. – Vol. 10, I. 3. – P. 261–267.
10. Bentley R., Chasteen T. G. Microbial methylation of metalloids: arsenic, antimony, and bismuth // Microbiology and Molecular Biology Reviews. – 2002. – Vol. 66, I. 2. – P. 250–271.

© *Н. В. Юркевич, В. В. Оленченко, С. Б. Бортникова,
А. В. Еделев, О. П. Саева, 2018*