

УДК 581.52;550.72

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В КРУГОВОРОТЕ АЗОТА И СЕРЫ В ШАХТНЫХ ВОДАХ И РУДНОМ ТЕЛЕ ЗОЛОТОНОСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РИДДЕР-СОКОЛЬНОЕ

<sup>1</sup>Канаев А.Т., <sup>2</sup>Канаева З.К., <sup>3</sup>Семенченко Г.В., <sup>3</sup>Шилманова А.

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы;

<sup>2</sup>Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы;

<sup>3</sup>Институт микробиологии и вирусологии Министерства образования и науки Республики Казахстан, Алматы, e-mail: Ashymhan.Kanaev@kaznu.kz

Объектами исследований являлись микроорганизмы, распространенные в шахтных водах и рудном теле Риддер-Сокольного месторождения. В шахтных водах выбранных горизонтов было исследовано распределение аммонифицирующих бактерий. Обнаружение тионовых бактерий в шахтных водах на различных горизонтах и характеристика экологических условий их жизнедеятельности дают основание считать, что на месторождении Риддер-Сокольное они выступают в качестве окислителей рудных минералов. Бактериальные окислительные процессы идут как в верхних, так и в нижних горизонтах. Это в свою очередь подтверждает присутствие достаточного количества влаги и кислорода в исследованных породах, а также их способность адсорбировать бактериальные клетки. Численность *A. ferrooxidans* колебалась в пределах  $10-10^3$  кл/г руды. Наибольшее количество бактерий было приурочено к осадочным и углисто-глинистым породам. Численность *Th. thiooxidans* была выше –  $10^2-10^3$  кл/г руды.

**Ключевые слова:** аммонификаторы, спорообразующие формы, Риддер-Сокольное месторождение

## DISTRIBUTION OF BACTERIA INVOLVED IN THE CYCLE OF NITROGEN AND SULFUR IN MINE WATERS AND OREBODY OF GOLD MINE OF RIDDER-SOKOLNOYE DEPOSIT

<sup>1</sup>Kanaev A.T., <sup>2</sup>Kanaeva Z.K., <sup>3</sup>Semenchenko G.V., <sup>3</sup>Shilmanova A.

<sup>1</sup>Kazakh National University after named al-Farabi, Almaty;

<sup>2</sup>Kazakh National Technical University after named K. Satpayev, Almaty;

<sup>3</sup>Institute of microbiology and virology Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Almaty, e-mail: Ashymhan.Kanaev@kaznu.kz

Object of research are microorganisms, spreading in mine waters and orebody of Ridder-Sokolnoye deposit. In mine waters of selected horizons were studied distribution of ammonifying bacteria. Detection of thio bacteria in mine waters at different levels and characteristics of the environmental conditions of its life give reason to believe that at the Ridder Sokolnoye deposit it act as oxidants of ore minerals. Bacterial oxidation processes are both in the upper and in the lower horizons. This, in its turn, confirms the presence of a sufficient amount of moisture and oxygen in the investigated formations and their ability to adsorb bacterial cells. The number of *A. ferrooxidans* ranged between  $10-10^3$  cells / g of ore. The greatest number of bacteria was in sedimentary, carbonaceous and argillaceous rocks. The number of *Th. thiooxidans* was higher –  $10^2-10^3$  cells / g of ore.

**Keywords:** ammonifiers, sporeforming form, Ridder-Sokolnoye deposit

Риддер-Сокольное месторождение находится на Рудном Алтае, на территории Казахстана. Открыто по следам древних «чудских разработок» в 1784 г. и с тех пор практически непрерывно эксплуатируется. Месторождение связано с девонской базальт-риолитовой формацией и размещается в пределах региональной вулканотектонической депрессии. Рудовмещающие эмско-эйфельские вулканогенно-осадочные породы залегают на метаморфических сланцах нижнего палеозоя. Подрудная часть разреза сложена эффузивно-пирокластической толщей риолитового состава мощностью от 600 до 1100 м [6].

Целью данной работы является определение возможности использовать окислительную деятельность бактерий в процессах кучного выщелачивания сульфид

содержащих руд месторождения Риддер-Сокольное.

Технологии кучного выщелачивания и прямого цианирования при относительно недорогих капитальных затратах позволяют получить в качестве конечного продукта сплав Доре – лигатурное золото, в дальнейшем направляемое на аффинажные предприятия для разделения металлов и их продажи. Одним из преимуществ данных технологий является возможность извлекать золото из руд с низким его содержанием [1].

### Материалы и методы исследования

Изучение количественного и качественного состава микрофлоры исследуемых нами месторождений проводилось по общепринятым методикам. Пробы рудных вод при обследованиях отбирались

стерильно, в соответствии с имеющимися руководствами [5].

Выделение новых микроорганизмов из рудничных месторождений и знание их физиологии позволит расширить применение микробиологических методов выщелачивания и обогащения руд, которые приобретают все большее значение в связи с истощением запасов богатых руд [2, 7].

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

В табл. 1 и 2 приведены характеристики руд месторождения Риддер-Сокольное, на примере руды шахты 38, жила 8 и шахта 39, горизонт 130 м.

**Таблица 1**

Химический состав руд месторождения Риддер-Сокольное

Компоненты	Массовая доля, в %	
	Шахта 38	Шахта 39
SiO <sub>2</sub>	55,5	60,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,6	11,7
CaO	4,7	4,1
MgO	1,5	1,2
Cu	–	–
Zn	0,23	0,08
Pb	–	–
Fe	5,6	5,0
As	–	–
Sb	–	–
S <sub>общ</sub>	2,9	2,4
Au	9,7	11,4
Ag	1,2	6,2
Плотность руды, г/м	2,717	2,724
Насыпной вес г/ м	1,455	1,428

**Таблица 2**

Распределение золота по классам крупности руды

Классы крупности, мм	Выход %	Свободное золото		Общее золото	
		Содержание г/т	Распределение %	Содержание, г/т	Распределение %
+ 0,21	0,11	372,7	4,8	461,3	3,3
– 0,21 + 0,15	0,82	174,4	16,9	176,4	8,7
– 0,15 + 0,1	6,59	11,8	9,4	13,0	11,7
– 0,1 + 0,07	10,56	7,7	9,8	9,8	14,2
– 0,07 + 0,04	38,77	18,8	33,9	20,8	51,2
– 0,04	43,15	0,53	2,8	1,83	10,9
Итого	100,0	6,43	77,6	8,28	100,0

В шахтных водах выбранных горизонтов было исследовано распределение аммонифицирующих бактерий. Известно, аммонификаторы – это физиологическая группа бактерий, использующих белки и аминокислоты в качестве энергетических субстратов, что сопровождается выделением в среду аммиака. Среди аммонификаторов встречаются как спорообразующие формы (*Bacillus*), так и микроорганизмы, не образующие спор (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Proteus*).

Данные физико-химических характеристик указывают, что на участках, достаточно широко представленных в районе Риддер-Сокольного месторождения рудопоявлений и зон рассеянной золото-сульфидной минерализации, трещинные воды за счет растворения окисляющихся сульфидов обогащаются сульфатами, подвижными формами мышьяка, железа, марганца, а также незначительными количествами меди, свинца, цинка, кадмия и других микроэлементов. Минерализация трещинных вод может воз-

расти до 0,7–1 г/дм<sup>3</sup> с переходом типа воды до сульфатно-натриевого по ионному составу. В связи с малым количеством сульфидов в водовмещающих породах и ограниченностью участков развития зон рудной минерализации, в сравнении с общей площадью распространения водоносного горизонта, качество трещинных вод участка остается высоким.

Численность аммонифицирующих бактерий колебалась в пределах 10<sup>1</sup>–10<sup>4</sup> кл/мл (рис. 1). Наименьшая численность бактерий была отмечена в шахтной воде горизонтов 50 и 290, где вода имеет слабокислую (рН 5,8) среду. На этом горизонте трещинные воды Риддер-Сокольного рудника относятся к грунтовым водам зоны выщелачивания. Гидрохимические условия в водоносном горизонте определяются естественными природными факторами – содержанием водорастворимых солей в водовмещающих породах (химико-минералогическим составом), их проницаемостью и скоростью фильтрации подземных вод.

Ионно-солевой состав шахтных вод горизонтов 90, 330 формируется за счет процессов растворения и выщелачивания ми-

неральной массы горных пород (продуктов гидролитического разложения силикатов, окисления сульфидов и углекислотного выветривания карбонатов). Вследствие интенсивного водообмена в водоносном горизонте формируются пресные маломинерализованные воды, гидрокарбонатные кальциево-натриевые по ионному составу, нейтральные или слабощелочные по величине рН с сухим остатком 0,2–0,4 г/дм<sup>3</sup>. Количество клеток аммонифицирующих бактерий в такой водной среде доходит до 10<sup>4</sup> кл/мл. В воде остальных горизонтов количество аммонификаторов колебалось в пределах 10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> кл/мл. В период обследования воды имели преимущественно нейтральную и слабощелочную реакцию (рН 7,5–8,2).

Таким образом, процесс *аммонификации* в шахтных водах горизонтов золото-мышьяковистого месторождения сопровождается подщелачиванием среды. В результате аминокислоты дезаминируются с образованием органических кислот (пирувата, ацетата и других интермедиатов ЦТК) и в таком виде входят в цикл Кребса для полного окисления и получения клеткой энергии.

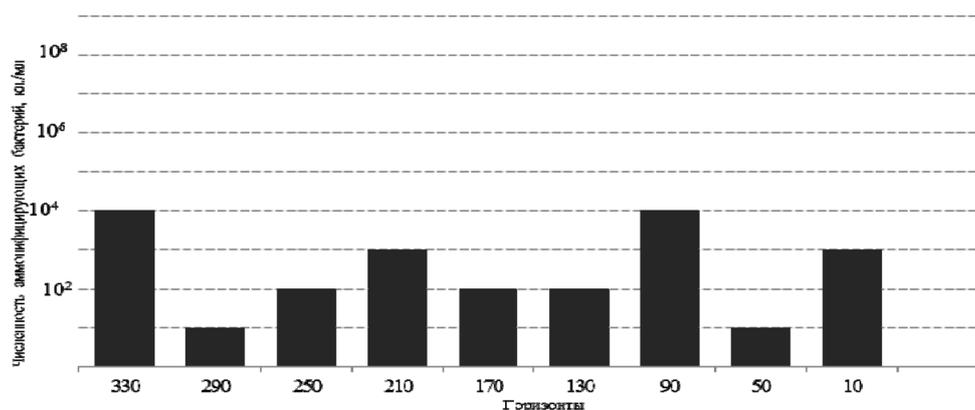


Рис. 1. Численность аммонифицирующих бактерий в шахтных водах

Анализ физиологических групп бактерий, участвующих в круговороте азота в различных типах пород, слагающих рудное тело, представлен на рис. 2. Учитывали аммонификаторы, нитрификаторы 1-й и 2-й фазы, денитрификаторы и азотфиксирующие микроорганизмы. В общем, численность представителей этих групп бактерий варьировала в пределах 10<sup>2</sup>–10<sup>7</sup> КОЕ/г.

Наибольшее количество аммонифицирующих бактерий было отмечено в пробах песчаника верхней алевролито-песчаниковой толщи (3), в кремнистых образованиях

(6) и в углисто-глинистого аргиллита (9) и составляло 10<sup>6</sup> КОЕ/г. В терригенно-осадочных породах (1) и рудах из горизонта кызыловской зоны смятия (4) количество аммонификаторов доходило до 10<sup>5</sup> КОЕ/г. В остальных исследуемых пробах их численность варьировала в интервале 10<sup>3</sup> и 10<sup>4</sup> КОЕ/г.

Как известно, нитрификаторы первой фазы осуществляют окисление аммония до азотистой кислоты ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ ) второй фазы – перевод азотистой кислоты в азотную ( $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ). Максимальное

количество нитрификаторов I-фазы наблюдается в пробах № 3, 6, 7 –  $10^6$  КОЕ/г. В остальных пробах их количество варьировало в пределах  $10^2$ – $10^4$  КОЕ/г. Максимальное количество нитрификаторов II фазы отмечалось в пробах № 1, 3, 4, 6, 7 в количестве  $10^5$  КОЕ/г. В остальных пробах составляет  $10^3$ – $10^4$  КОЕ/г.

симальное количество нитрификаторов II фазы отмечалось в пробах № 1, 3, 4, 6, 7 в количестве  $10^5$  КОЕ/г. В остальных пробах составляет  $10^3$ – $10^4$  КОЕ/г.

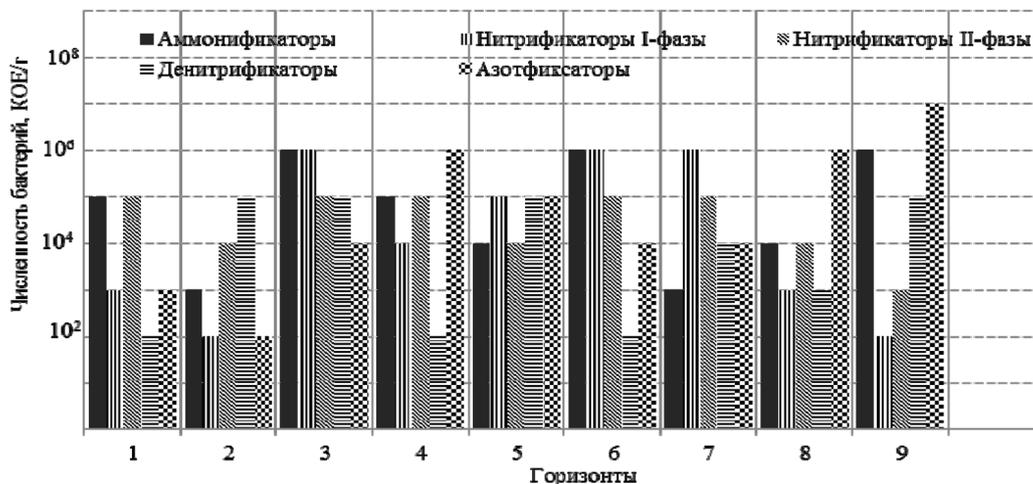


Рис. 2. Численность бактерий, участвующих в круговороте азота в рудном теле

Учитывали также денитрифицирующие бактерии, восстанавливающие нитраты до молекулярного азота, в число которых входили как восстанавливающие нитраты до нитритов, так и доводящие восстановление до элементарного азота. Максимально количество денитрифицирующих бактерий было отмечено в пробах руды № 2, 3, 5, 9 и составляло  $10^5$  КОЕ/г. В остальных образцах их количество колебалось в пределах  $10^2$ – $10^4$  КОЕ/г.

Численность азотфиксирующих бактерий, обладающих способностью усваивать молекулярный азот воздуха и переводить его в доступные для организма формы, варьировала в пределах  $10^2$ – $10^7$  КОЕ/г. Наибольшее их количество отмечено в образцах № 4, 8, 9 –  $10^6$ – $10^7$  КОЕ/г, наименьшее – в пробе № 2 –  $10^2$  КОЕ/г.

Таким образом, судя по полученным данным, наиболее интенсивно процессы круговорота азота осуществляются в пробах песчаника верхней алевролитопесчанниковой толщи (3), в кремнистых образованиях (6) и углисто-глинистого аргиллита и алевролита (9) с преобладанием процессов образования и утилизации аммиака до молекулярного азота. В последней пробе отмечена также активная азотфиксация. Обнаружение основных групп микроорганизмов практически во всех исследуемых образцах говорит об активном участии микроорганизмов в превращениях разнообразных органических веществ в шахтных водах и рудном теле Риддер-Сокольского месторождения.

Химический состав и качество вод изучаемой площади Риддер-Сокольского золотоносного месторождения характеризуется следующими данными.

Сухой остаток трещинных вод изменяется по площади и глубинам опробования, составляя 0,2–0,6 г/дм<sup>3</sup>, жесткость – 2,1–5,3 мг-экв/дм<sup>3</sup>, рН 6,7–7,9. Химический состав вод гидрокарбонатный и гидрокарбонатно-сульфатный по анионам и кальциевый, кальциево-натриевый по катионам.

Содержание веществ группы азота ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ) намного ниже нормативных уровней, перманганатная окисляемость по  $\text{O}_2$  низкая, концентрация железа не превышает 0,25 мг/дм<sup>3</sup>. Микроэлементы (Cu, Pb, Zn, As, F и др.) содержатся в количествах намного меньше допустимых пределов.

Тионовые бактерии *A. ferrooxidans* встречались в основном в воде, имеющей слабокислую реакцию среды (рН 5,0 – 5,5). Наибольшее количество *A. ferrooxidans* было отмечено в пробах шахтной воды горизонта 170, численность варьировала в пределах  $10$ – $10^3$  кл/мл воды, а также в рудничных водах горизонтов 210 и 290 с численностью до  $10^2$  кл/мл воды (рис. 3).

В водах горизонтов 90 и 330 тионовые бактерии не обнаружены, что, видимо, связано с нейтральной реакцией шахтных вод и непродолжительным контактом руд с кислородом воздуха.

Распространение бактерий *Th. thiooxidans* в природе зависит от наличия

восстановленных соединений серы, используемых этими бактериями для хемоавтотрофного роста. Основная масса серы в природе связана с металлами в сульфатной и сульфидной форме, часть ее находится в виде самородных месторождений. Как известно, бактерий этой группы способны осуществлять процессы, приводящие к разрушению или образованию месторождений полезных ископаемых, минералов и горных пород, а также к миграции отдельных элементов. Изучение этих процессов важно для теоретических представлений о круговороте элементов, а также для добычи полезных ископаемых.

При обследовании стоячих вод и капелей месторождения *Th. thiooxidans* были обнаружены в пробах воды, имеющих слабокислую реакцию (pH 5,0–5,5), численность достигала  $10\text{--}10^2$  кл/мл (рис. 3). Было установлено, что температура рудного тела с увеличением глубины горизонта снижается с 12 до 6,5°C, pH колеблется в пределах 5,5–7,5.

Таким образом, обнаружение тионовых бактерий в шахтных водах на различных горизонтах и характеристика экологических условий их жизнедеятельности дают основание считать, что на месторождении Риддер-Сокольное они выступают в качестве окислителей рудных минералов.

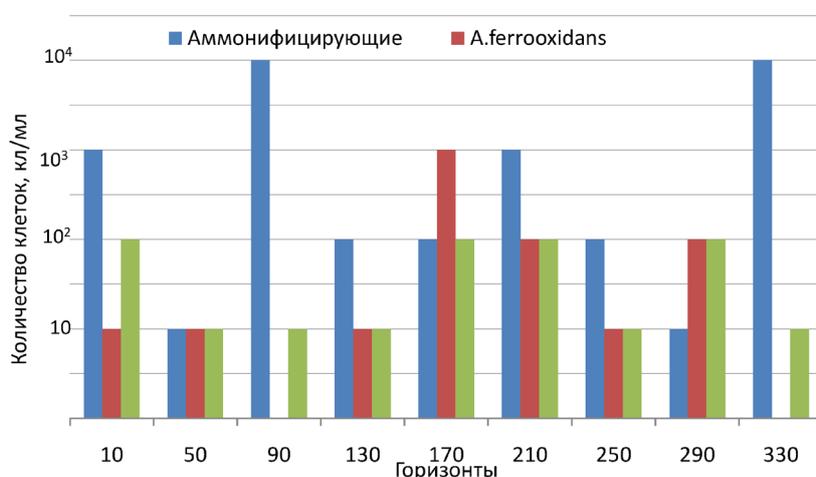


Рис. 3. Численность бактерий, участвующих в круговороте азота и серы в шахтных водах

Анализируя данные о численности и характере распределения хемолитоавтотрофных бактерий *A. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* – основных показателей степени окислительно-восстановительных процессов, необходимо отметить, что они встречались в шахтных водах редко и в незначи-

тельных количествах. С глубиной горизонта количество находок *A. ferrooxidans* значительно уменьшалось, распределение же *Th. thiooxidans* определялось наличием серы в нижних горизонтах шахтных вод. Ареалы распространения тионовых бактерий характеризуются слабокислой реакцией среды.

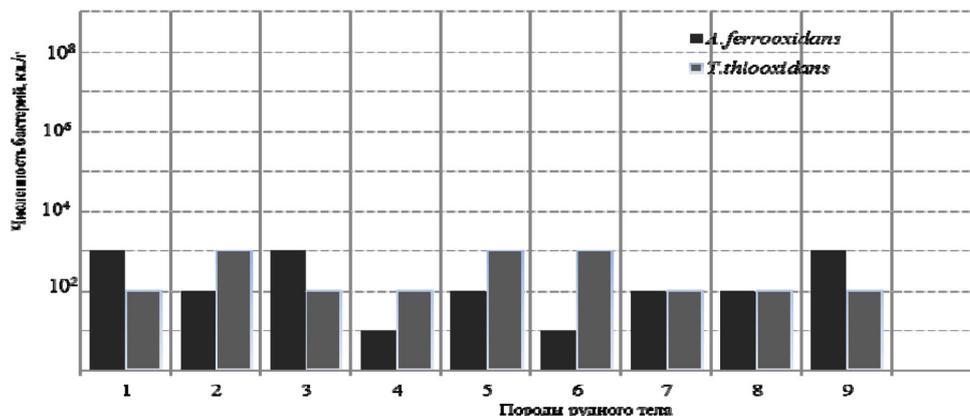


Рис. 4. Численность тионовых бактерий в рудном теле

Присутствие тионовых бактерий в рудном теле отмечалось во всех типах слагающих пород. Численность *A. ferrooxidans* колебалась в пределах  $10^2$ – $10^3$  кл/г руды. Наибольшее количество бактерий было приурочено к осадочным и углисто-глинистым породам. Численность *Th. thiooxidans* была выше –  $10^2$ – $10^3$  кл/г руды. Вскрышная глинистая порода, серые песчаники, пепловые туфы и кремнистые образования содержали наибольшее количество этих бактерий (рис. 4). Образцы пород с находками тионовых бактерий имели слабокислую реакцию.

### Выводы

Таким образом, распространение тионовых бактерий в отдельных породах рудного тела свидетельствует о процессах бактериального окисления серы и других рудных элементов [3, 4]. Если сравнить эти данные с расположением рудного тела и золото-вмещающих минералов по горизонтам, то можно отметить, что бактериальные окислительные процессы идут как в верхних, так и в нижних горизонтах. Это, в свою очередь, подтверждает присутствие достаточного количества влаги и кислорода в исследованных породах, а также их способность адсорбировать бактериальные клетки.

### Список литературы

1. Авдонин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М. [и др.]. Месторождения металлических полезных ископаемых. – М.: Академический проект, – 2005. –143 с.
2. Канаев А.Т., Канаева З.К., Мухамбетов Н., Бидайбеков Д. Микробные ценозы золото-мышьяковистого Месторождения Бакырчик // Bulletin d'eurotalent-fidjip, Editions du jipto. Imprimé en France Indicatif éditeur 11 rue de la Concorde 10100 Romilly sur Seine: – France Dépôt legal, – 2014. – № 5 – P. 40–44.

3. Каравайко Г.И., Кузнецов С.И., Голомзик А.И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. – М.: Наука, 1972. – 248 с.

4. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Недра, 1973. – 124 с.

5. Сергеев Н.Б. Динамика формирования зонального профиля выветривания сульфидных месторождений // Геол. рудн. месторожд. – 1995. – Т. 37, № 6, – С. 547–557.

6. Funtikova N.S., Mysyakina I.S. Sporangiospores of the fungus *Mucor lusitanicus* 12M: correlation between lipid composition, viability, and morphology of growth upon germination // Microbiology, – 2003. – № 72 (6). – P. 686–689.

7. Garnova E.S., Krasil'nikova E.N. Carbohydrate metabolism of the saccharolytic alkaliphilic anaerobes *Halonatronum saccharophilum*, *Amphibacillus fermentum*, and *Amphibacillus tropicus* // Microbiology, – 2003. – № 72 (5). – P. 558–563.

### References

1. Avdonin V.V., Boytsov V.E., Grigorev V.M. i dr. Mestorozhdeniya metallicheskih poleznykh iskopaemykh. M.: Akademicheskii proekt, 2005. –143 p.

2. Kanaev A.T., Kanaeva Z.K., Mukhambetov N., Bidaybekov D. Mikrobnye tsenozy zoloto-myshyakovistogo Mestorozhdeniya Bakyrchik // Bulletin deurotalent-fidjip, Editions du jipto. Imprime en France Indicatif editeur 11 rue de la Concorde 10100 Romilly sur Seine: France Depot legal, 2014. no. 5. pp. 40–44.

3. Karavayko G.I., Kuznetsov S.I., Golomzik A.I. Rol mikroorganizmov v vyshchelachivanii metallov iz rud. M.: Nauka, 1972. 248 p.

4. Petrovskaya N.V. Samorodnoe zoloto. M.: Nedra, 1973. 124 p.

5. Sergeev N.B. Dinamika formirovaniya zonalnogo profilya vyvetrivaniya sulfidnykh mestorozhdeniy // Geol. rudn. mestorozhd. 1995. T. 37, no. 6, pp. 547–557.

6. Funtikova N.S., Mysyakina I.S. Sporangiospores of the fungus *Mucor lusitanicus* 12M: correlation between lipid composition, viability, and morphology of growth upon germination // Microbiology, 2003. no. 72 (6). pp. 686–689.

7. Garnova E.S., Krasilnikova E.N. Carbohydrate metabolism of the saccharolytic alkaliphilic anaerobes *Halonatronum saccharophilum*, *Amphibacillus fermentum*, and *Amphibacillus tropicus* // Microbiology, 2003. no. 72 (5). pp. 558–563.