

УДК 581.52:550.72

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБОЦЕНОЗОВ ЗОЛОТОНОСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕСТОБЕ

Канаев А.Т., Баймырзаев К.М., Канаева З.К., Токпаев К.М.

Научно-исследовательский институт проблем биотехнологии Жетысуского государственного университета имени И. Жансугурова, Талдыкорган, e-mail: kuna.1993@mail.ru

Для выполнения исследования нами была предпринята попытка поиска и выделения хемолитотрофных бактерий на месторождении Бестобе для получения активных ассоциаций литотрофных микроорганизмов. Микробиологическое обследование руды месторождений Бестобе позволило определить численность основных групп хемолитотрофных бактерий: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfolobus*, *Leptospirillum* и *Acidiplasma* sp. Представители последних трех родов исследовались на данном месторождении впервые. Установлено, что из-за повышенной упорности руд численность основных микроорганизмов-окислителей *A. ferrooxidans* и *A. thiooxidans* не превышает  $10^3$  кл/г руды. Наиболее распространены экстремофилы из числа *Sulfolobus*, *Leptospirillum* и *Acidiplasma* sp., численность которых достигала  $10^7$ – $10^9$  кл/г руды. Поскольку представители родов *Sulfolobus* и *Leptospirillum* постоянно присутствуют в руде в достаточном количестве, то для интенсификации геохимических процессов разложения руды решено было более подробно изучить представителей видов *A. ferrooxidans* и *Acidiplasma* sp., из которых и была получена ассоциативная культура. Прогнозные предложения о развитии объекта исследования – выполнение дальнейших этапов программы позволит получить производственно ценные ассоциативные культуры хемолитотрофных бактерий, которые могут быть с успехом использованы для выщелачивания руды на месторождениях Казахстана. В связи с этим возникает необходимость в продолжении исследований в указанном направлении.

**Ключевые слова:** месторождения, микроорганизмы, бактерия, руда, золото, химический состав, ацидофил

## THE STUDY OF THE MICROBIOCENOSIS GOLD DEPOSITS BESTOBE

Kanaev A.T., Baymyrzaev K.M., Kanaeva Z.K., Tokpaev K.M.

Research Institute of biotechnology problems of Zhetysu State University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, e-mail: kuna.1993@mail.ru

To carry out the study, we have undertaken the search and isolation of chemolithotrophic bacteria in the Bestobe field to obtain active associations of lithotrophic microorganisms. Microbiological examination of ore deposits Bestobe allowed to determine the number of major groups of chemolithotrophic bacteria: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfolobus*, *Leptospirillum* and *Acidiplasma* sp. Representatives of the last three genera were studied at this Deposit for the first time. It is established that due to the increased persistence of ores, the number of the main microorganisms-oxidizing agents *A. ferrooxidans* and *A. thiooxidans*, does not exceed  $10^3$  CL/g of ore. The most common extremophiles are *Sulfolobus*, *Leptospirillum* and *Acidiplasma* sp. the number of which reached  $10^7$ – $10^9$  CL/g of ore. As the representatives of the genera *Sulfolobus* and *Leptospirillum* are constantly present in the ore in sufficient quantity, for the intensification of geochemical processes of decomposition of ore, it was decided to explore in more detail representatives of types of *A. ferrooxidans* and *Acidiplasma* sp. from which the associative culture was obtained. Forecast proposals for the development of the object of research – the implementation of further stages of the program will provide production and valuable associative cultures of chemolithotrophic bacteria that can be successfully used for leaching ore in the fields of Kazakhstan. In this regard, there is a need to continue research in this direction.

**Keywords:** deposits, microorganisms, bacteria, ore, gold, chemical composition, acidophilus

Месторождение Бестобе располагается на севере Казахстана в 80 км восточнее станции Аксу. Данное месторождение начало свою работу в 1930-е гг., на данный период глубина шахты достигает 700 м. Сырье, добываемое на этом месторождении, идет на переработку на Бестобинскую, Жолымбетскую и Аксуискую обогатительные фабрики с помощью гравитационно-флотационной схемы с получением золота и серебросодержащих концентратов.

На месторождении Бестобе находится золотоизвлекательная фабрика, использующая метод кучного выщелачивания. Наименьший показатель составляет 71,3% извлечения золота, достигнут на Бестобинской фабрике. В настоящее время на всех этих месторождениях строятся допол-

нительные мощности по переработке до 2 млн т в год (на каждом) руды из хвостохранилищ, а также геологоразведочные работы проводятся для повышения сырьевой базы до 262 т золота. После получения результатов компания намерена в период с 2013 по 2016 г. инвестировать 512 млн долларов в строительство трех новых золотоизвлекательных фабрик на территории Аксуской, Бестобинской и Жолымбетской месторождений, мощность переработки которых составляет 4,7 млн т руды в год. Кроме того, планируется строительство новых установок для кучного выщелачивания мощностью по переработке до 2,2 млн т руды в год. За счет нового оборудования производство золота составит на новых фабриках КВ – 500 тысяч унций или 15,5 т в год [1].



Рис. 1. Географическое расположение золотоносного месторождения Бестобе

Цель исследования: исследование и выделение кислотолюбивых видов хемолитотрофов для получения активных ассоциаций на золотоносном месторождении Бестобе.

#### Материалы и методы исследования

Химический состав руды месторождений определяли масс-спектрометрическим методом на атомно-абсорбционном спектрометре AA240 «Varian» с индуктивно-связанной плазмой («Varian Optical Spectroscopy Instruments», Австралия) по ГОСТ 27329-87 [2].

На дифрактометре *D8 Advance (BRUKER)* проводили дифрактограммы средней пробы. Исследование микрофлоры месторождений количественного и качественного состава проводили по установленной методике. Пробы рудных вод при обследовании отбирали стерильно, в соответствии с имеющимися руководствами [3].

Для учета количественного состава кислотолюбивых бактерий, содержащихся в 1,0 г руды, использовали метод десятикратных разведений. В гомогенизаторе измельчали навеску субстратного сырья и растирали ее в ступке, готовили исходную взвесь в разведении 1:10. Последующие разведения полученной взвеси готовили из исходного жидкого материала с таким расчетом, чтобы при посеве двух последних разведений в жидкую среду был рост бактерий [4].

Поскольку основной целью работы было получение активных ассоциативных культур для интенсификации процесса выщелачивания благородных металлов из упорных руд указанных месторождений, то список кислотолюбивых бактерий, играющих важную роль в разрушении минералов, был расширен.

Учет культур *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A.thiooxidans*, *Sulfolobus Leptospirillum*, *Acidiplasma sp. Acidiplasma sp.* проводили по методике, рекомендованной [5].

Концентрацию ионов двух- и трехвалентного железа определяли методом комплексного метрического титрования [2].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Месторождение Бестобе находится в Акмолинской области Казахстана, в подчинении Степногорской городской адми-

нистрации. Расположено примерно в 83 км к востоку от г. Степногорска.

На рис. 1 приведена схема тектонической позиции золоторудных полей Северного Казахстана [2]. Разработка месторождения была начата в 1930-е гг., на сегодняшний день глубина шахт достигает 700 м. Добытые руды перерабатываются на Аксуской, Бестобинской, Жолымбетской обогатительных фабриках с получением золото-серебросодержащих концентратов и шламов по гравитационно-флотационному методу. На месторождении Бестобе существует одна золотоизвлекательная фабрика. Средний показатель извлечения золота, достигнутый на Бестобинской фабрике, составляет 71,3%. Переработку руды ведет компания ОАО «Горно-металлургический Концерн – Казахалтын», который является открытым акционерным обществом, зарегистрированным в соответствии с законодательством Республики Казахстан 9 июля 2001 г. в г. Степногорске, где и расположено производство золота. Основной деятельностью компании является добыча золота: производство и эксплуатация золоторудных месторождений Бестобе, Аксу, Кварцитовые Горки, Жолымбет и Байлюсты с обработкой золото-содержащих руд и производство золотосодержащих изделий. В течение последних трех лет объемы производства ОАО «ГМК Казахалтын», по группе месторождений Аксу, Бестобе, Жолымбет составили около 1,0 т золота в год. В настоящее время на всех этих месторождениях строятся дополнительные мощности по переработке до 2 млн т в год (на каждом) руды из хвостохранилищ, а также проводятся геологоразведочные работы для повышения обрабатываемой минерально-сырьевой базы до 262 т золота. После получения результатов компания намерена в период с 2013 по 2016 г. инвестировать 512 млн долларов в строи-

тельство трех новых золотоизвлекающих фабрик на месторождениях Аксу, Бестобе и Жолымбет общей мощностью переработки 4,7 млн т руды в год. Кроме того, планируется строительство установки кучного выщелачивания мощностью по переработке 2,2 млн т руды в год. Производство золота составит на новых фабриках и установках КВ – 500 тысяч унций или 15,5 т в год.

Вещественный состав и физико-химические характеристики руды месторождения Бестобе. Руда месторождения Бестобе относится к арсенопиритной. В минералогическом составе руды этого месторождения имеются свои особенности. Такие общепринятые золотовмещающие минералы, как арсенопирит, пирротин, халькопирит, сфалерит и ковеллин, не являются носителями золота и серебра, так как содержат незначительное количество благородных металлов. Пирит в основном не содержит золота. То же самое можно сказать и о содержании серебра в этих минералах. Подавляющая часть золота и серебра представлена в форме природного сплава электрум ( $Au_{0,812}Ag_{0,172}Cu_{0,001}Fe_{0,002}Bi_{0,005}S_{0,007}$ ). В кристаллической решетке на 812 атомов золота приходится 172 атома серебра. Примеси в сумме занимают 11 позицию на каждую тысячу атомов. Другие халькофильные элементы – медь, железо, теллур, селен – присутствуют в сотых долях процента. Частицы электрума имеют размер от нескольких микрон до 160–180 мкм. Носителем золота также является самородная медь ( $Cu_{98;27}Fe_{1,50}S_{0,05}Ag_{0,01}Au_{0,01}Mn_{0,04}Zn_{0,04}Bi_{0,01}$ ).

Биниит (тетраэдрит) – сурьмянистая сульфасоль меди ( $Cu_{9,55}Fe_{0,79}Ag_{0,06}Mn_{0,001}Zn_{1,10}S_{11,501}$ ) содержит до 0,8% серебра и его можно отнести к коллектору се-

ребра. Носителем серебра также являются миаргирит ( $AgSbS_2$ ) и самородная медь.

Присутствие золота в арсенопиритной руде месторождения Бестобе определяется наличием сплава электрум с другими сульфидными минералами. Из нижеприведенных формул минералов, благородные металлы находятся в тесных ассоциациях с несколькими металлами, как с серой и сурьмой. Известно, что сурьма создает специфические трудности при флотации, образуя легкую черную пену, вываливающуюся из флотационных машин, чем весьма затрудняет процесс работы флотации. Такая специфическая упорность руды месторождения Бестобе требует также неординарного подхода к ее переработке, поэтому поиск оригинальных методов выщелачивания представляет научный и практический интерес.

Были изучены основные фазы руды месторождения Бестобе с помощью рентгенофазового анализа (рис. 2, табл. 1).

**Таблица 1**  
Фазовый состав руды месторождения Бестобе

Formula	S-Q
SiO <sub>2</sub> -Quartz	37,0
(K,Na)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si <sub>3,1</sub> A <sub>10,9</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	34,2
MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	10,6
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	9,9
A <sub>12</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	5,8
FeS <sub>2</sub>	1,9
AlAs	0,6
As	0,1

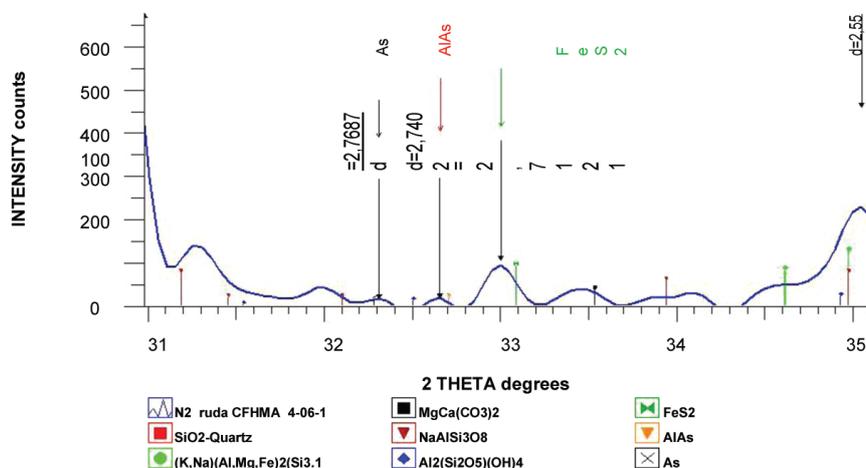


Рис. 2. Дифрактограмма средней пробы месторождения Бестобе

В процессе изучения химического состава было изучено, что максимум содержания основных элементов – золото составляет около 3,6 г/т. Из числа косвенных химических элементов содержание Ag составляет – 13,0 г/т. Среднее содержание железа – 3,0, медь – 0,002, кобальт – 0,0007; никель – 0,003, мышьяк – 0,9 и сера – 2,4 г/т.

Сульфидные руды: в процессе окисления тионовыми бактериями ведущая роль принадлежит бактерия *A. ferrooxidans*. Была отмечена численность *A. ferrooxidans* в результате микробиологического обследования в образцах карьерных, шахтных вод и в рудном теле  $10^5$ ,  $10^3$  и  $10^2$  кл/мл соответственно (табл. 2). Тионовые бактерии *A. ferrooxidans* встречались в имеющей слабо-кислую реакцию среде, в данном случае соответствовал рН 5,0–5,5.

Численность *A. thiooxidans* в карьерной воде на изучаемом месторождении варьировала в пределах  $10^3$  кл/мл. Бактерии в шахтной воде встречались редко и в минимальных количествах –  $10^2$  кл/мл руды. Наибольшее количество этих бактерий содержали вскрышная глинистая порода, серые песчаники, пепловые туфы и кремнистые образования до  $10^3$  кл/г. Образцы пород с находками тионовых бактерий имели слабо-кислую реакцию.

Наиболее распространенными в карьерной, шахтной воде и в руде отобранные из трех точек оказались экстремальные ацидофилы родов *Sulfolobus*, *Leptospirillum* и *Acidiplasma sp.* их численность до-

стигали от  $10^3$  до  $10^7$  кл/г/мл руды и/или воды (рис. 3).

Аборигенные культуры, представители хемолитотрофных бактерий, которые нами были выделены и изучены на окислительную способность в жидкой среде Сильвермана и Лундгрена 9К.

В процессе роста культур ежесуточно определялась окислительная способность исходных штаммов, выращиваемых на среде 9 К Сильвермана и Лундгрена комплексометрическим методом. В этом эксперименте исходное содержание окисного железа составило 9,0 г/л.

Как видно из рис. 4, восстановление трехвалентного железа осуществлялось интенсивно в первые 3–4 суток культурой *Sulfolobus*. В этот отрезок времени наиболее активно восстановление окисного железа осуществлялось штаммом *Acidiplasma sp.*, наименьшую активность проявила популяция *A. ferrooxidans*, которая занимала нижнее положение. Однако после четырех суток появились изменения. Активность *Leptospirillum ferrooxidans* варианта начала возрастать и на седьмые сутки она стала опережать других штаммов. В итоге окисление закисного железа завершилось на 8 сутки. Активность штаммов *A. ferrooxidans* и *A. thiooxidans* напротив начала падать, особенно низкой была активность штамма *A. ferrooxidans*. Лучшие результаты, по сравнению со штаммом *Sulfolobus*, показал штамм *Leptospirillum ferrooxidans*. Кривая динамики *A. ferrooxidans* окисного железа была сходна по форме с кривой для штамма *A. thiooxidans*.

Таблица 2

Численность хемолитотрофных бактерий в карьерных, шахтных водах и в рудном теле месторождения Бестобе

Месторождение	№ пробы	Численность хемолитотрофных бактерий, кл/г руды				
		<i>A. ferrooxidans</i>	<i>A. thiooxidans</i>	<i>Sulfolobus</i>	<i>Leptospirillum</i>	<i>Acidiplasma sp.</i>
Бестобе	1	$10^5$	$10^3$	$10^6$	$10^3$	$10^4$
	2	$10^3$	$10^2$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
	3	$10^2$	$10^3$	$10^3$	$10^7$	$10^3$



1



2



3

Рис. 3. Точка отбора проб для исследования.

Примечание: 1 – карьерная вода, 2 – шахтная вода, 3 – рудный материал

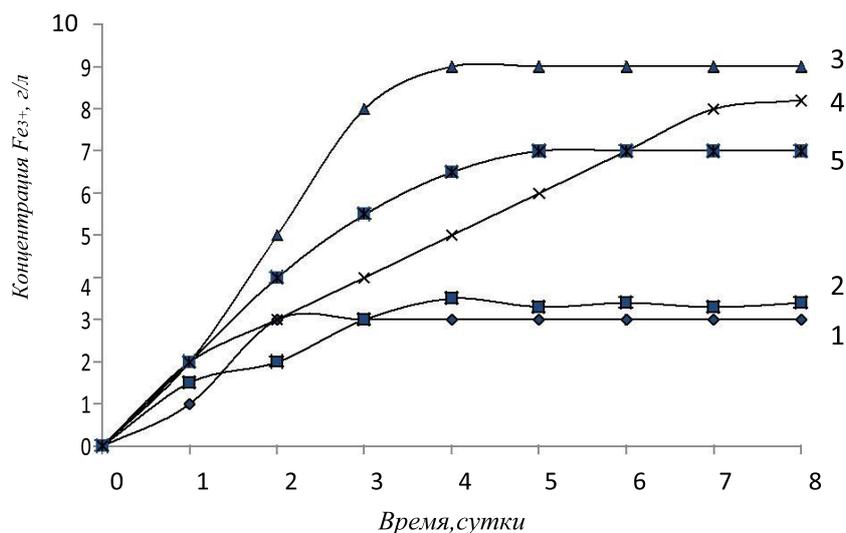


Рис. 4. Численность хемолитотрофных бактерий месторождений Бестобе:  
Примечание: 1 – *A. ferrooxidans*, 2 – *A. thiooxidans*, 3 – *Sulfolobus*,  
4 – *Leptospirillum ferrooxidans*, 5 – *Acidiplasma sp.*

Итак, по восстановительной способности популяции хемолитотрофов можно было распределить в порядке: *Sulfolobus* → *Leptospirillum ferrooxidans* → *Acidiplasma sp.* → *A. thiooxidans* → *A. ferrooxidans*.

Таким образом, культуры отличаются по скорости восстановления Fe<sup>3+</sup> и по конечному результату и срокам завершения окисления закисного железа можно судить об их активности.

### Выводы

В результате полученных данных по численности и активности некоторых групп бактерий можно сделать вывод о низкой деятельности основных возбудителей окислительно-восстановительных процессов на вышеперечисленных месторождениях, за счет этого данные рентгенофазового анализа показывают редкость окисленных фаз в рудах. За счет того, что в рудах присутствует большое количество хемолитотрофных бактерий группы *Leptospirillum* и *Sulfolobus*. В производственных условиях это значительно облегчает получение в достаточных объемах популяций бактерий, длительное совместное культивирование более двух видов бактерий приводит к определенным

трудностям и ведет к потере ценных видов бактерий. Для разрушения пирита и арсенипирита идет увеличение интенсивности, основных золотовмещающих минералов, для этого необходимо повысить активность хемолитотрофных бактерий по разрушению вышеперечисленных минералов.

### Список литературы

1. Bulaev A.G., Panyushkina A.E., Tsaplina I.A., Kondrat'eva T.F., Belyi, A.V. Physiological and morphological characteristics of acidophilic bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus thiooxidans*, members of a Chemolithotrophic microbial consortium. *Microbiology (Russian Federation)*. 2018. № 87 (3). P. 326–338.
2. Kanayev A., Kuat B., Zylkha K., Kuanysh T. The effect of temperature on the duration of the process of biochemical leaching method. *International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2018. (1.4)*. P. 179–186.
3. Прунтова О.В., Сахно О.Н. Лабораторный практикум по общей микробиологии // Владимирский государственный университет. Владимир, 2005. 76 с.
4. Spasova I.I., Nicolova M.V., Georgiev P.S., Groudev S.N. Bacterial pretreatment of a gold-bearing pyrite/arsenopyrite concentrate for improving the subsequent gold extraction: Proceedings of the 14 Balkan Mineral Processings Congress (Tuzla, 14–16 June, 2011). 2011. Vol. 2. P. 600–603.
5. Булаев А.Г., Пивоварова Т.А., Меламуд В.С., Цаплина И.А., Журавлева А.Е., Кондратьева Т.Ф. Полиморфизм штаммов *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, доминирующих в процессах высокотемпературного окисления золотомышьякового концентрата // *Микробиология*. 2011. Т. 80. № 3. С. 320–328.