

УДК 579.66

## **ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ МИКРООРГАНИЗМОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В БИОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

**Т.В. ВАСИЛЬЕВА, И.А. БЛАЙДА, В.А. ИВАНИЦА**

Биотехнологический научно-учебный центр

Одесского национального университета имени И.И. Мечникова

*Извлечение ценных компонентов из минералов с помощью микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности служит признанным биотехнологическим приемом переработки сульфидных руд. На сегодняшний день эта технология является экономически выгодной и экологически безопасной. В статье охарактеризованы основные группы бактерий, участвующих в биогидрометаллургических процессах извлечения металлов из природных сульфидных руд, и современные данные о механизме их бактериально-химического окисления. Приведены основные фенотипические и генотипические свойства ацидофильных хемолитотрофных бактерий, участвующих в биогидрометаллургических процессах, – мезофильных и умеренно термофильных хемолитотрофных представителей родов *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*. Указаны перспективные направления использования бактериального выщелачивания и возможное значение этого метода для получения металлов из нетрадиционного минерального сырья.*

**Ключевые слова:** биогидрометаллургия, бактериально-химическое выщелачивание, мезофильные и умеренно термофильные хемолитотрофные бактерии, сульфидные руды

В мировой практике гидрометаллургии для извлечения полезных компонентов из природных минералов отработаны и применяются методы с использованием неорганических, органических и смешанных растворителей, которые по своей природе достаточно сложны, энергоемки, агрессивны и, следовательно, экологически опасны [1-3]. Выбор экономически рентабельных и экологически адаптированных растворителей минералов имеет ключевое значение при переработке полезных ископаемых и извлечении из них ценных компонентов. К таким растворителям могут быть отнесены природные растворы, минерализованные насыщенные углекислотой воды, гуминовые соединения, воды минеральных источников, а также продукты жизнедеятельности микроорганизмов и питательные среды для их культивирования [4, 5].

Интенсивное развитие неорганической, органической и биоорганической химии способствовало созданию теоретических основ микробиологических методов выщелачивания металлов. Примером и результатом современного междисциплинарного использования химии и микробиологии являются технологии низкотемпературного бактериально-химического выщелачивания металлов из природных сульфидных руд [6-8]. В основе этого технологического подхода лежит использование свойств микроорганизмов, участвующих в природных процессах формирования рудных месторождений.

Открытие и изучение микроорганизмов, оказывающих влияние на формирование и изменение месторождений полезных ископаемых, связано с развитием геомикробиологии – науки о взаимодействии микроорганизмов с различными природными материалами, включая горные породы. Результаты фундаментальных исследований геохимической деятельности микроорганизмов послужили толчком к направленному применению бактериальных методов для переработки природных ископаемых с целью извлечения из них меди, цинка, молибдена, урана, марганца и других металлов [8-11].

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что микроорганизмы, обладающие разнообразными ферментными системами, легко приспосабливаются к изменяющимся, зачастую экстремальным условиям окружающей среды (перепады температур, рН, высокое давление, повышенные концентрации токсичных металлов и т.д.), играют важную роль в круговороте органических и неорганических веществ в биосфере. Имеются многочисленные доказательства участия микроорганизмов в процессах разрушения природных ископаемых и извлечения из них металлов. Достаточное количество экспериментальных данных свидетельствует о том, что эффективность выщелачивания металлов, в том числе редких и драгоценных, в присутствии микроорганизмов в десятки, сотни и тысячи раз превышает химические процессы. Подтверждение тому – многочисленные примеры количественных оценок деятельности микроорганизмов, основанные на мониторинге химического состава месторождений полезных ископаемых, а также на результатах окисления соединений серы в природных месторождениях [10-13].

На базе этого богатого междисциплинарного экспериментального материала сформирована новая научная дисциплина – **биогеотехнология металлов**, в рамках которой разрабатываются способы извлечения металлов из руд, горных пород, промышленных продуктов и растворов при нормальном давлении и температуре под воздействием микроорганизмов или их метаболитов, окисляющих элементы сульфидных минералов с переменной валентностью ( $S^0$ ,  $S^{2-}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $Cu^{1+}$ ) в кислой среде. Иными словами, в основе процесса бактериального выщелачивания большинства металлов лежит их вскрытие и перевод из нерастворимой сульфидной формы в растворимую сульфатную [14-17].

В настоящее время механизм взаимодействия бактерий с сульфидными минералами окончательно не выяснен, однако установлено, что он зависит от многих причин - физико-химической природы и строения минерала, состава примесей, степени структурной упорядоченности, типа проводимости,

электрохимического потенциала твердого субстрата и бактериальной клетки [18-21]. Установлено, что при бактериальном выщелачивании происходит либо окисление нерастворимых сульфидов металлов и их переход в растворимые сульфаты, либо создание условий для максимального растворения соединений с поверхности минерала в результате взаимодействия с веществами, выступающими в роли растворителя. Примером первого процесса является переход таких нерастворимых соединений меди, как ковеллин (CuS) или халькозин (Cu<sub>2</sub>S), в растворимые сульфаты. Примером второго процесса служит извлечение железа, мышьяка и серы из золотосодержащего арсенопирита (FeAsS), вследствие чего оставшееся в минерале золото легче выделяется при помощи цианирования. Оба этих процесса являются окислительными; если добываемый металл переводится в раствор, речь идет о биовыщелачивании; когда же металл остается в руде – о биоокислении. Тем не менее, термин «биовыщелачивание» часто используется в обоих случаях.

Rodriguez Y. et al. сделали первую попытку объяснить механизм биовыщелачивания, предложив два возможных пути: прямой и непрямой [20]. Согласно их теории *при прямом бактериальном выщелачивании* происходит взаимодействие микробных клеток с поверхностью твердой частицы. Этот процесс происходит в несколько стадий и катализируется ферментами:



Суммарное уравнение:



При прямом взаимодействии бактериями могут быть окислены не содержащие железа сульфиды металлов, такие как ковеллин (CuS), халькозин (Cu<sub>2</sub>S), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), молибденит (MoS<sub>2</sub>), стибнит (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), кобальтин (CoS), миллерит (NiS). И, таким образом, прямое бактериальное выщелачивание может быть описано следующей общей реакцией:



где MeS – сульфид металла.

*При непрямом бактериальном выщелачивании* бактерии находятся в свободном состоянии и выполняют только каталитическую функцию, ускоряя окисление  $\text{Fe}^{2+}$  до  $\text{Fe}^{3+}$ , генерируя тем самым «окислитель»  $\text{Fe}^{3+}$ , который в дальнейшем химически окисляет сульфидный минерал. Растворение металла в этом случае может быть описано следующей реакцией:



Для поддержания достаточного количества железа в растворе химическое окисление сульфидов металлов должно проводиться в кислых условиях при  $\text{pH} < 5,0$ . При  $\text{pH} 2,0 - 3,0$  бактериальное окисление  $\text{Fe}^{2+}$  примерно в  $10^5$ - $10^6$  раз быстрее, чем химическое окисление.

Tributsch H., Rodriguez. et al. считают, что процесс биовыщелачивания, в частности, пирита является двухступенчатым [20, 22]. На первой стадии окисление происходит с помощью микроорганизмов, прикрепившихся к твердой поверхности минерала, посредством контактного механизма. На второй стадии основным фактором растворения пирита является не прямой механизм с помощью  $\text{Fe}^{3+}$ , регенерируемого микроорганизмами в растворе. Следовательно, изначальное прикрепление микроорганизмов к поверхности сульфида играет важную роль в достижении высокой скорости растворения минерала на второй стадии, то есть биовыщелачивание включает два сосуществующих механизма – не прямой и контактный. Эффективность каждого из этих процессов зависит от степени прикрепления клеток бактерий и их концентрации в среде.

Таким образом, несмотря на то, что в целом механизм взаимодействия бактерий и сульфидных минералов до конца не изучен, тем не менее, установлено, что бактерии обладают способностью сорбироваться на поверхности природных минералов, изменяя тем самым их физико-химические свойства, что в свою очередь приводит к пассивации сульфидов и снижению их электродного потенциала. Окислительно-восстановительный потенциал среды при этом резко возрастает, в результате в системе «минерал — среда» создается

выраженная окислительная ситуация, в которой минерал занимает позицию анода и быстро окисляется [21,23].

Многие из известных к настоящему времени микроорганизмов, обладающих способностью выщелачивать металлы, обитают в природных и техногенных условиях, например, вблизи серных геотермальных источников и в рудничных водах. Гетерогенные условия таких районов с перепадами температур и кислотности поддерживают широкое разнообразие ацидофильной микробиоты. Детальное понимание физиологии, биохимии и биоэнергетики отдельных микроорганизмов является решающим для их использования в биогидрометаллургических процессах.

В течение многих лет для биовыщелачивания традиционно применяли относительно ограниченное количество одних и тех же видов микроорганизмов. Так, в патентах 90-х годов прошлого века фигурируют классические виды тионовых бактерий – *Thiobacillus* (в настоящее время переименованы в *Acidithiobacillus*) *thiooxidans*, *T. (A.) ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*. Однако уже с началом 2000-х годов спектр описываемых в научных публикациях и заявляемых в патентах микроорганизмов расширился. Кроме уже традиционно используемых *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *L. ferrooxidans*, авторы описывают выщелачивание металлов *T. caldus*, *Acidimicrobium sp.*, некоторыми представителями *Sulfobacillus* и архей. Появление последних в списке связано с их термофильностью – способностью окислять соединения серы при повышенных температурах [24, 25].

Таким образом, в последние десятилетия в области биовыщелачивания наметились изменения, направленные на поиск и использование микроорганизмов, которые ведут процессы выщелачивания при повышенной температуре, способны разрушать силикатные минералы (в отличие от окисления сульфидов), обеспечивают извлечения металлов при нейтральных или умеренно кислых значениях pH.

Микробиологами различных стран выявлено и описано множество потенциально полезных бактерий и архей, способных окислять сульфидные минералы. Лидируют в этих процессах представители родов *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*, *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Ferroplasma*. Для некоторых видов родов микроскопических грибов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Mucor* и *Auerobasidium* также показана способность к окислению элементарной серы, тиосульфата и даже сульфидов металлов в сульфат. Однако, скорость такого окисления на один-два порядка ниже, чем у литотрофных бактерий [26-29].

В настоящем сообщении основное внимание уделено мезофильным и умеренно термофильным хемолитотрофным ацидофильным сероокисляющим бактериям, к репрезентативным представителям которых принадлежат тионовые бактерии. Тионовые бактерии – это наиболее важная в геохимическом отношении группа, хорошо изученная физиологически и биохимически. Именно при их участии происходят основные процессы, связанные с окислением серы и ее соединений. Они ускоряют растворение халькопирита в 12 раз, арсенопирита и сфалерита в 7 раз, ковелина и борнита в 18 раз по сравнению с обычными химическими методами [10, 15, 29, 30].

В основу систематики тионовых бактерий положены их физиологические особенности, в первую очередь, отношение к различным источникам энергии, поскольку в зависимости от видовой принадлежности тионовые бактерии способны использовать в качестве энергетических субстратов элементарную серу, тиосульфат, тетратионат, сульфиды металлов, сероводород, двухвалентное железо [15, 29]. Однако, несмотря на обширный материал, касающийся классификации тионовых бактерий, до сих пор их систематическое положение четко не определено. Тионовые бактерии являются наглядным примером гетерогенности не только морфологических, физиологических, биохимических, но и генетических свойств. Метаболизм тионовых бактерий включает сложный набор реакций, многие из которых до конца не изучены [19,

30-33]. В последние десятилетия, благодаря современным молекулярно-генетическим методам, а именно методу определения Г–Ц пар, ДНК-ДНК гибридизации, ПЦР и 16S-РНК, проведена реклассификация рода *Thiobacillus* с его четким разделением на роды *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus*, *Halothiobacillus* и *Thermothiobacillus*, дополнив основные различия отношением этих бактерий к рН и температуре [34-38].

Среди тионовых бактерий для биогидрометаллургических процессов наибольшее значение имеют представители рода *Acidithiobacillus* – *Bacteria*, *Proteobacteria*, *Gammaproteobacteria*, *Acidithiobacillales*, *Acidithiobacillaceae* и *Acidithiobacillus*. Они широко распространены в природных и искусственных экологических нишах – в месторождениях сульфидных руд и каменного угля, в шахтных и дренажных водах, в термальных источниках вулканического происхождения, а также техногенных отходах. Секвенирование 16S и/или 5SRNA показало, что внутри данного рода существуют  $\alpha$ - ,  $\beta$ - и  $\gamma$ - подразделения прокариот; их принадлежность к *Zetaproteobacteria* не установлена [35, 36, 38]. На основе анализа структуры хромосомной ДНК методом пульс-электрофореза, плазмидных профилей, нуклеотидных последовательностей 16SrДНК показано, что при адаптации ацидофильных хемолитотрофных бактерий к новым энергетическим субстратам происходят изменения в структуре хромосомной ДНК, которые, в случае их необратимости, приводят к возникновению штаммов с новыми фенотипическими характеристиками. Это свидетельствует о микроэволюционных процессах, происходящих в различных экологических нишах [19, 30, 31, 39].

*Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* - мезофильные представители данного рода – мелкие грамотрицательные палочковидные подвижные с одним полярным жгутиком или не подвижные клетки. Растут и развиваются в широком диапазоне значений рН и температуры; среди них есть термофилы с оптимальной температурой для роста 50,0 °С. Это типичные хемолитотрофные бактерии, которые развиваются на простых минеральных средах. Однако многие из их пищевых потребностей

количественно не установлены, и химический состав основных питательных сред для тионовых бактерий меняется достаточно широко. В то же время есть данные о росте данных бактерий на органических веществах, что свидетельствует о спорности автотрофного питания тионовых бактерий [12–21].

*Acidithiobacillus ferrooxidans* доминируют в мезофильном сообществе ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов природных ископаемых. Из природных (горные породы, месторождения сульфидных руд, рудничные воды), а также технологических сред (плотные пульпы биогидрометаллургических установок по переработке руд и концентратов) исследователями разных стран выделено большое число штаммов *A. ferrooxidans*. Штаммы *A. ferrooxidans* разного происхождения отличаются высокой степенью генетического разнообразия и по размеру генома ( $1,7 \div 2,8 \times 10^6$  пар оснований), содержанием нуклеотидных пар Г + Ц в ДНК (55-65 % содержания G-C), степенью ДНК-ДНК гомологии тотальных геномов, плазмидными профилями, оптимальными для роста значениями pH и температуры, устойчивостью к ионам металлов и токсичным элементам, способностью окислять различные энергетические субстраты и эффективностью этого процесса [12, 19, 29–31, 39–41]. *Acidithiobacillus ferrooxidans* способен окислять, кроме соединений серы, восстановленные соединения железа, разрушая широкий набор сульфидных минералов - пирит, марказит, полидимит, реальгар, халькопирит, молибденит, кобальтин, ковеллин, марматит, виоларит, тетраэдрит, геокранит, миллерит, арсенопирит, пирротин, антимонит, аурипигмент, борнит, сфалерит, пентландит, халькозин, галенит, бравойт, энаргит [41–43].

Использование в качестве источников энергии широкого спектра окисляемых субстратов, устойчивость к ионам тяжёлых металлов и низким значениям pH, а также высокий уровень изменчивости в экстремальных условиях среды обуславливают ведущую роль *A. ferrooxidans* в бактериально-химических процессах вскрытия золота и выщелачивания редких, цветных и

тяжелых металлов. Это во многом определило характер исследований физиологии, биохимии и генетики данного микроорганизма. Изучены особенности конструктивного и энергетического метаболизма *A. ferrooxidans*, устойчивость к ионам металлов и токсичным элементам. Подробно исследованы компоненты железоокисляющей системы *A. ferrooxidans*, охарактеризованы отдельные ферменты пути окисления серы и её восстановленных соединений. Идентифицировано множество генов этой бактерии, изучена их регуляция, а также кодируемые белки [44–46].

*Acidithiobacillus thiooxidans* окисляют элементарную серу и её восстановленные соединения (тиосульфат, тетратионат), разрушая незначительное количество сульфидных минералов – галенит, сфалерит, вурцит [12, 29]. В отличие от *Acidithiobacillus ferrooxidans* *Acidithiobacillus thiooxidans* не окисляет двухвалентное железо и играет менее значительную роль в биовыщелачивании металлов из сульфидных руд; зачастую встречается в тесной ассоциации с *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Однако при изучении окисления сульфидных минералов чистыми и смешанными культурами *Thiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus thiooxidans* рядом авторов показано, что чистая культура *Thiobacillus thiooxidans* практически не окисляла ковеллин, пирит [47–50].

Установлено участие *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* в процессах выщелачивания металлов не только из природных руд и промышленных концентратов; они считаются наиболее эффективными в горнодобывающей промышленности [17, 27, 28, 51] и наиболее перспективны при переработке техногенных металлосодержащих отходов [43].

Наряду с *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, выделяют не менее важный *Acidithiobacillus caldus* - граммотрицательный, хемолитоавтотрофный аэробный микроорганизм, который использует энергию окисления восстановленных соединений серы, но не способен окислять железо (II); температурный оптимум для него лежит в диапазоне 40,0 – 50,0 °C [52–54]. При некоторых условиях *Acidithiobacillus caldus* может доминировать в

промышленных биовыщелачивающих и биоокисляющих процессах [52], однако в большинстве случаев *Acidithiobacillus caldus* считают «сорняком» в процессах биовыщелачивания, поскольку его присутствие в микробиоценозах минеральных субстратов природного и техногенного происхождения незначительно. При этом часто в ассоциации *Acidithiobacillus caldus* повышает эффективность выщелачивания по сравнению с другими бактериями. Так, выделенный из угольных отвалов *Acidithiobacillus caldus* в сочетании с *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum* активизирует извлечение меди из халькопирита путем окисления серы [54].

В процессах бактериального выщелачивания металлов значительную роль играют представители другой группы бактерий – железобактерии – *Bacteria*, *Nitrospirae*, *Nitrospira* (class), *Nitrospirales*, *Nitrospiraceae*, *Leptospirillum*. Впервые подробное описание хемолитотрофных железоокисляющих микроорганизмов было дано Г.А. Заварзиным [29]. Основными представителями железобактерий с энергетическим метаболизмом хемолитотрофного типа являются бактерии рода *Leptospirillum*. Большинство изученных штаммов этого рода принадлежат к облигатным хемолитоавтотрофам, использующим энергию окисления железа для ассимиляции CO<sub>2</sub>, служащего основным или единственным источником углерода. Железобактерии представляют собой мелкие грамтрицательные изогнутые палочки, вибрионы или спириллы, подвижные благодаря единственному жгутику. Растут в кислых условиях (оптимальные значения pH от 1,0 до 3,0) в широком диапазоне температур (от 30,0 до 70,0 °C) на минеральной среде, содержащей Fe<sup>2+</sup>. Сера и органические вещества не являются для них источниками энергии [29].

Род *Leptospirillum* включает железоокисляющие бактерии *Leptospirillum ferrooxidans*, *Leptospirillum thermoferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum*, играющих важную роль в процессах биовыщелачивания и биоокисления. Поскольку они доминируют в условиях с высоким содержанием железа, это делает их перспективными для использования в промышленных масштабах.

Классическим примером ацидофильных железобактерий служит выделенная и описанная Г.Маркосяном мелкая спиралила или вибрион *Leptospirillum ferrooxidans*, окисляющая в кислой среде  $Fe^{2+}$  и пирит [55–57]. *Leptospirillum ferrooxidans*, выделенная из бедных сульфидных руд Патагонии (Чили), оказалась эффективной при выщелачивании цинка из некондиционных комплексных природных руд [58].

Большинство исследователей придерживаются мнения, что представители рода *Leptospirillum* скорее способствуют повышению выщелачивающей активности при использовании их в смешанных культурах с *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*. Например, показана возможность проведения процесса микробиологического извлечения цинка из марматита ассоциацией *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* [59, 60]. Смешанные культуры *Leptospirillum ferriphilum*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* эффективно выщелачивали халькопирит в лабораторном биореакторе [61]. Использование в ассоциации *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* способствовало более эффективному извлечению марганца из отработанных аккумуляторов [62].

Способностью окислять сульфиды металлов обладают некоторые представители грамположительных бактерий, принадлежащие к родам *Alicyclobacillus*, *Sulfobacillus* и еще не описанному роду *Cadibacillus*. Эти бактерии способны расти литотрофно с ионами двухвалентного железа и/или соединениями серы, а также органотрофно с различными органическими веществами. Наибольшее значение для процессов биовыщелачивания металлов имеют представители рода *Sulfobacillus* - *Bacteria*, *Firmicutes*, *Clostridia*, *Clostridiales*, *Clostridiales incertae sedis*, *Clostridiales Family XVII*, *Incertae Sedis*. *Sulfobacillus* включает группу хемолитотрофных аэробных умеренно термофильных и термотолерантных грамположительных ацидофильных микроорганизмов следующих видов *S. acidophilus*, *S. ambivalens*, *S. montserratensis*, *S. sibiricus*, *S. thermosulfidooxidans*, *S. yellowstonensis*,

*S. thermotolerans*. Эти бактерии способны к автотрофному росту в присутствии двухвалентного железа и различных восстановленных соединений серы в качестве источников энергии, а также CO<sub>2</sub> как единственного источника углерода. Оптимальный тип питания – миксотрофный, когда одновременно используются метаболические пути окисления неорганических и органических соединений (глюкоза, дрожжевой экстракт), а источниками энергии служат сера, ее восстановленные соединения (тиосульфат, тетратионат и др.), двухвалентное железо, сульфидные минералы. Представители этого рода были выделены из сульфидных руд и термальных источников, многие из них еще достаточно не изучены [63–66].

Значительный вклад в исследование биоразнообразия сульфобацилл внесен Р.С. Головачевой. Ею впервые описаны род *Sulfobacillus* и вид *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, представляющий собой споровую аэробную бактерию с оптимальным развитием при температуре 50,0 – 55,0 °С и рН 1,9–2,4, окисляющую элементную серу, восстановленное железо и широкий спектр сульфидных минералов, обитающую как в гидротермальных источниках, так и в зонах разогрева сульфидных и серных руд [67–68].

Еще один вид этого же рода *Sulfobacillus sibiricus* – палочковидная, аэробная умеренно термофильная бактерия, выделенная из золотомышьякового концентрата Неждановского рудного отложения Восточной Сибири, окисляет серу, двухвалентное железо, сульфидные минералы только в присутствии дрожжевого экстракта [69, 70].

*S. thermotolerans* выделен Богдановой И.А. с коллегами из золотосодержащего сульфидного концентрата при температуре 40,0 °С. Это термотолерантная ацидофильная грампозитивная бактерия, растет миксотрофно, окисляя в присутствии 0,02 % дрожжевого экстракта или других органических соединений двухвалентное железо, серу и ее восстановленные формы, а также сульфидные минералы [71, 72].

В последнее время перспективными для целей биогидрометаллургии считают представителей семейства *Ferroplasmaceae*, занимающих

значительную часть в естественных местообитаниях. *Ferroplasma spp.*, которые входят в состав этого семейства, принадлежат к порядку *Thermoplasmales* – ацидофильным археям, которые обладают одной периферической мембраной. Некоторые метаболические и экофизиологические свойства объединяют *Ferroplasma spp.* с представителями архей порядка *Sulfolobales* и классическими мезофильными бактериями *Acidithiobacillus spp.* и *Leptospirillum spp.*, но они лучше адаптированы к той экологической нише, которая характеризуется низкими значениями pH и высокими концентрациями  $Fe^{2+}$  и других металлов. Данные микроорганизмы способны выщелачивать металлы из сульфидных минералов (пирит, арсенопирит, медьсодержащие сульфиды) и более устойчивы к кислоте, нежели железо- и сероокисляющие бактерии (в частности, тионовые), обитающие в сходных эколого-физиологических условиях [73-75].

Пивоварова Т.А. с коллегами описали два штамма *Ferroplasma acidiphilum* – YТ, Y-2, которые были впервые выделены Голициной О.В. из плотных пульп в процессе окисления золотосодержащих арсенопиритных и пиритных концентратов. Штаммы окисляют  $Fe^{2+}$  из  $FeSO_4$  и пирита ( $Fe_2S$ ),  $Mn^{2+}$  из  $MnSO_4$  [76–78].

Наряду с вышеперечисленными бактериями известны типичные гетеротрофные микроорганизмы, участвующие в окислении сероводорода, молекулярной серы и тиосульфата. К числу таковых относятся представители *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Sphaerotilus*, а также актиномицетов, плесневых грибов (*Penicillium luteum*, *Aspergillus niger*), дрожжей и *Alternaria*. Некоторые из них, в частности нитчатая многоклеточная бактерия *Sphaerotilus natans*, в присутствии сероводорода откладывает в клетках серу. Другие (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Achromobacter stuzeri*) способны окислять тиосульфат до тетратионата ( $Na_2S_4O_6$ ). Отмечено также образование политионатов и сульфата при воздействии смешанных культур гетеротрофных микроорганизмов на элементарную серу. Механизм окисления

и биологическое значение этого процесса для гетеротрофов остаются не выясненными.

К настоящему времени наиболее изучены процессы выщелачивания металлов мезофильными хемоавтотрофными кислотолюбивыми бактериями и образующимися при их участии эффективными растворителями из природных металлосодержащих руд и промышленных концентратов. С появлением технологических возможностей осуществления чанового биовыщелачивания все больший интерес привлекают умеренно термофильные и термофильные бактерии и археи, которые при высоких температурах обеспечивают более высокую скорость окисления сульфидов.

Получение ценных компонентов с помощью микроорганизмов является признанным биотехнологическим методом переработки природных сульфидных руд, поскольку является ресурсо- и энергоэффективным, экологически безопасным, позволяет осваивать бедные некондиционные руды, которые невыгодно перерабатывать традиционными химическими методами. На сегодняшний день в мире построены и действуют более 20 промышленных установок бактериального выщелачивания меди, кобальта, никеля, золота, цинка и урана в ЮАР, Австралии, Бразилии, США, Канаде, Замбии, Гане и России. Это особенно актуально и перспективно в связи с необходимостью восполнения дефицита редких, драгоценных и цветных металлов, разработки для этих целей горных пород с низким содержанием целевых компонентов, поиском их новых нетрадиционных источников. К последним с полным правом можно отнести техногенные отходы предприятий угольной, металлургической и энергетической промышленности, для которых характерно низкое содержание ценных компонентов на фоне большого количества балластных веществ, высокий процент изоморфизма, что значительно осложняет применение для такого вида сырья традиционных пирометаллургических методов. Сведения об использовании бактериального выщелачивания для переработки отходов и отвалов с извлечением из них

ценных микро- и макросоставляющих в литературе ограничены, однако перспективность метода очевидна [43, 79, 80].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов / А.Н. Зеликман, Г.М. Вольдман, Л.В. Беляевская – М.: Metallurgy, 1983. – 424 с.
2. Минеев Г.Г. Растворители золота и серебра в гидрометаллургии / Г.Г. Минеев, А.Ф. Панченко. – М.: Metallurgy, 1994. – 241 с.
3. Черняк А.С. Процессы растворения: выщелачивание, экстракция / А.С. Черняк. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1998. – 407 с.
4. Аренс В.Ж. Химико-экологические проблемы выщелачивания / В.Ж. Аренс, А.С. Черняк // Горный журнал. – 1994. – № 12. – С. 5-7.
5. Аренс В.Ж. Химия и микробиология в сфере горного дела / В.Ж. Аренс, А.С. Черняк // Горное дело. – 2006. – С. 304–313.
6. Biohydrometallurgical Techniques. Vol.1. Bioleaching Processes / [Torma A.E., Wey J.E., Lakshmanan V.L. (eds)]. – Warrendale: TMS (The Minerals, Metals and Materials Society). – 1993. – 1430 p.
7. Recent Progress in biohydrometallurgy: Selected Papers / [Rossi G., Torma A.E. (eds)]. – Iglesias/Italy: AMS (Associazione Mineraria Sanda). – 1983. – 752 p.
8. Кузнецов С. И. Бактериальные методы выщелачивания металлов из руд / С.И. Кузнецов, Г.И. Каравайко. – М.: Изд. ИМ РАН, 1970. – 233 с.
9. Иванов М.В. Геологическая микробиология / М.В. Иванов, Г.И. Каравайко // Микробиология. – 2004. – Т. 73, № 5. – С. 581-597.
10. Кузнецов С.И. Введение в геологическую микробиологию / С.И. Кузнецов, М.В. Иванов, Н.Н. Ляликова. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 352 с.
11. Черняк А.С. Основы биотехнологии металлов / А.С. Черняк. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2002. – 102 с.

12. Соколова Г.А. Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий / Г.А. Соколова, Г.А. Каравайко. – М.: Наука, 1964. – 332 с.
13. Роль микроорганизмов и некоторых физико-химических факторов среды в разрушении кварца / [Г.И. Каравайко, Н.П. Белканова, В.А. Ерошев-Шак, З.А. Авакян] // Микробиология. – 1984. – Т. 53. – Вып. 6. – С. 976-981.
14. Wachtershauser G. The case for the chemoautotrophic origin of life in iron sulfur world / G. Wachtershauser // Origin life and evol. Bios. – 1990. – V. 20, N 2. – P. 173-176.
15. Lowenstam H.A. Minerals formed by organisms / H.A. Lowenstam // Science. – 1981. – V.211. – P. 1126-1131.
16. Польшкин С.И. Технология бактериального выщелачивания цветных металлов / С.И. Польшкин, Э.В. Адамов, В.В. Панин. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
17. Bousecker K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms / K. Bousecker // FEMS Microbiol. Rev. – 1997. – V. 20. – P. 591-604.
18. Каравайко Г.И. Изучение закономерностей адсорбции бактериальных клеток на пористых носителях / Г.И. Каравайко, С.И. Кузнецов, В.В. Самотин // Микробиология. – 2004. – 73. – N 6. – С. 810 – 816.
19. Тупикина О.В. Фенотипические и генотипические характеристики кислотофильных хемолитотрофов, окисляющих разные типы пиритов. – Автореферат на соискание уч. степени канд. биол. наук. – Москва, 2008. – 23 с.
20. Rodriguez Y. New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature / Y. Rodriguez, A. Ballester, M.L. Blazquez // Hydrometallurgy. – 2003. – V. 71. – P. 37-46.
21. Каравайко Г.И. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа / Г.И. Каравайко, Г.А. Дубинина, Т.Ф. Кондратьева // Микробиология. – 2006. – Т. 75, № 5. – С. 593 – 629.
22. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching / H. Tributsch // Hydrometallurgy. – 2001. – V. 59. – P. 177-185.

23. Яхонтова Л.К. Взаимодействия в биокосных системах / Л.К. Яхонтова, А.П. Грудев, В.В. Зуев // Минерал. сб. Львов. ун-та. – 1991. – Вып. 1. – С. 14-21.
24. US Patent 5089412 Bacteria for oxidizing multimetallic sulphide ores. – Hackl R.P., Wright F.R., Bruynesteyn A. – 1992.
25. US Patent 6245125 Copper, nickel and cobalt recovery. – Dew D.W., Miller D.M. – 2001.
26. Кальдерные микроорганизмы / Под ред. Г. А. Заварзина. – М.: Наука, 1989. – 120 с.
27. Кузякина Т.И. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд / Т.И. Кузякина, Т.С. Хайнасова, О.О. Левенец // Вестник краунц. науки о земле. – 2008. – Вып. 12, № 2. – С. 76–86.
28. Каравайко Г.И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд / Г.И. Каравайко, С.И. Кузнецов, А.И. Голомзик. – М.: Наука, 1972. – 218 с.
29. Заварзин Г.А. Литотрофные микроорганизмы / Г.А. Заварзин. – М.:Наука, 1972. – 322 с.
30. Турова Т.П. Применение методов геносистематики для решения вопросов таксономии и изучения биоразнообразия прокариот. – Автореферат на соискание уч. степени доктора биологических наук. – Москва, 2009. – 86 с.
31. Агеева С.Н. Фенотипический и генотипический полиморфизм штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans*. – Автореферат на соискание уч. степени канд. биол. наук. – Москва, 2003. – 19 с.
32. Takakuwa S. Biochemical aspects of microbial oxidation of inorganic sulfur compounds / S. Takakuwa // Organic Sulfur Chemistry / [Oae S. and T. Okuyama (Eds.)]. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1992. – P. 1-43.
33. Oxidative metabolism of inorganic sulfur compounds by bacteria / [D. P. Kelly, J. K. Shergill, W.-P. Lu, A. P. Wood] // Antonie Van Leeuwenhoek. – 1997. – V. 71. – P. 95-107.
34. Kelly D.P. Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Hallothiobacillus* gen. nov. and

*Thermithiobacillus* gen. nov. / D.P. Kelly, A.P. Wood // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2000. – V. 50. – P. 512 – 516.

35. Phylogeny of Gammaproteobacteria / [K.P. Williams, J.J. Gillespie, B.W.S. Sobral, E.K. Nordberg] // Journal of Bacteriology. – 2010. – V. 192 (9). – P. 2305–2314.

36. Kelly D.P. Taxonomic relationships of *Thiobacillus*, as determined using 16S rRNA sequencing / D.P. Kelly, J.C. Murrell, A.P. Wood // Arch Microbiol. – 2002. – V. 166. – P. 394-397.

37. Rawlings D.E. Molecular genetics of *Thiobacillus ferrooxidans* / D.E. Rawlings, T. Kusano // Microbiol. Rev. – 1994. – V. 58 (1). – P. 39–55.

38. Kelly D.P. Taxonomic relationships of *Thiobacillus*, as determined using 16S rRNA sequencing / D.P. Kelly, J.C. Murrell, A.P. Wood // Arch Microbiol. – 2002. – V. 166. – P. 394-397.

39. Phylogenetic heterogeneity of the species *Acidithiobacillus ferrooxidans* / [G.I. Karavaiko, T.F. Kondrat'eva, T.P. Tourova et al.] // Syst. Evol. Microbiol. – 2003. – V. 53, № 1. – P. 113-119.

40. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates / D.E. Rawlings // Microbial Cell Factories. – 2005. – V. 4, № 13. – P. 4-13.

41. Rawlings D.E. Molecular genetics of *Thiobacillus ferrooxidans* / D.E. Rawlings, T. Kusano // Microbiol Rev. – 1994. – V. 58(1). – P. 39–55.

42. Илялетдинов А.Н. Микробиологические превращения металлов / А.Н. Илялетдинов. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 267 с.

43. Блайда И.А. Извлечение ценных металлов при переработке промышленных отходов биотехнологическими методами / И.А. Блайда // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 6. – С. 39-45.

44. *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: from genome sequence to industrial applications / [J. Valdes, I. Pedroso, R. Quatrini et al.] // BMC Genomics. – 2008. – V. 9. – P. 597-597.

45. Kelly D.P. Biochemistry of the chemolithotrophic oxidation of inorganic sulphur / D.P. Kelly // *Biological Sciences*. – 1982. – № 298. – P.499-528.

46. Kelly D.P. Thermodynamic aspects of energy conservation by chemolithotrophic sulfur bacteria in relation to the sulfur oxidation pathways // *Archives of Microbiology*. – 1999. – № 171. – P. 219-229.

47. Pyrite oxidation by using *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* in pure and mixed cultures / [H. Salard, H. Mozafard, M. Torkzaden, M. Moghtader] // *Biological Diversity and Conservation Biyolojik Çeitlilik ve Koruma*. – 2008. – P. 115-123.

48. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture / [J. Bai, J. Wang, J. Xu, Bo Liang] // *Minerals Engineering*. – 2011. – V. 24. – P. 1128-1131.

49. Donati E. Bioleaching of covellite using pure and mixed cultures of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* / E. Donati, G. C. Pogliani, P.H. Tedesco // *Proc. Biochem*. – 1996. – V.31. – P. 129-134.

50. Gholami R. M. Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* / R.M. Gholami, S.M. Borghei., S.M. Mousav // *Hydrometallurgy*. – 2001. – V. 106. – P. 26-31.

51. Иванов В.И. Применение микробиологических методов в обогащении и гидрометаллургии / В.И. Иванов, Б.А. Степанов. – М.: Наука, 1960. – 165 с.

52. The role of *Acidithiobacillus caldus* in the bioleaching of metal sulfides / [M. Semenza, M. Viera, G. Curutchet, E. Donati] // *Latin American applied research version*. – 2002. – V.32, №.4. – P.135-139.

53. Rawlings D.E. *Thiobacillus caldus* and *Leptospirillum ferrooxidans* are widely distributed in continuous flow biooxidation tanks used to treat a variety of metal containing ores and concentrates / D.E. Rawlings, N.J. Coram, M.N. Gardner // *Biohydrometallurgy and the Environment toward the Mining of the 21<sup>st</sup> Century* / [Amils R. and A. Ballester (Eds)]. – Amsterdam: Elsevier, 1999. – P. 777-786.

54. Isolation of a strain of *Acidithiobacillus caldus* and its role in bioleaching of chalcopyrite / Zhou Qiu Guan, Bo Fu, Hong Bo Zhou et al. // World Journal of Microbiology & Biotechnology. – 2007. – V 23(9). – P. 1217-1225.

55. Markosyan G.E. A new iron-oxidizing bacterium *Leptospirillum ferrooxidans* nov. gen. nov. sp. / G.E. Markosyan // Biol. J. Armenia. – 1972. – V. 25. – P. 26-29.

56. Варданян Н.С. *Leptospirillum*-подобные бактерии и оценка их роли в окислении пирита / Н.С. Варданян, В.П. Акопян // Микробиология. – 2003. – Т. 72, № 4. – С. 493-498.

57. Hippe H. *Leptospirillum* gen. nov. (ex Markosyan 1972), nom. rev., including *Leptospirillum ferrooxidans* sp. nov. (ex Markosyan 1972), nom. rev. and *Leptospirillum thermoferrooxidans* sp. nov. (Golovacheva et al. 1992) / H. Hippe // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2000. – V. 50. – P. 501-503.

58. Bioleaching of zinc from low-grade complex sulfide ores in an airlift by isolated *Leptospirillum ferrooxidans* / [A. Giaveno, L. Lavalle, P. Chiacchiarini, E. Donati] // Hydrometallurgy. – 2007. – V.89. – P. 117-126.

59. Shi S. Bioleaching of marmatite flotation concentrate by adapted mixed mesoacidophilic cultures in an air-lift reactor / S. Shi, Z. Fang // International Journal of Mineral Processing. – 2005. – V. 76, № 1-2. – P. 3-12.

60. Markosyan G.E. A new iron-oxidizing bacterium *Leptospirillum ferrooxidans* nov. gen. nov. sp. / G.E. Markosyan // Biol. J. Armenia. – 1972. – V. 25. – P. 26-29.

61. Bioleaching of chalcopyrite concentrate using *Leptospirillum ferriphilum*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in a continuous bubble column reactor / [Lexian Xia, Chu Yin, Songlin Dai, Guanzhou Qiu] // Journal of Industrial Microbiology Biotechnology. – 2010. – V. 37 (3). – P. 135-143.

62. Jaapar J. Applications of Bioleaching in Recycling of Spent Batteries / Jefri Jaapar, Wan Azlina Ahmad // Jurnal Natur Indonesia. – 2004. – 7(1). – P. 1-4.

63. Филогенетическое положение аэробных умеренно-термофильных бактерий вида *Sulfobacillus*, окисляющих  $Fe^{2+}$ , S(0) и сульфидные минералы / [Г.И. Каравайко, Т.П. Турова, И.А. Цаплина, Т.И. Богданова] // Микробиология. – 2000. – Т. 69, № 6. – С. 857-860.

64. Рост и углеводный метаболизм у сульфобацилл / Г.И. Каравайко, Е.Н. Красильникова, И.А. Цаплина и др. // Микробиология. – 2001. – Т. 70, № 3. – С. 293–299.

65. Журавлева А. Е. Пути метаболизм в сульфобацилл при различных типах питания. – Автореферат на соискание уч. степени канд. биол. наук. – Москва, 2009. – 21 с.

66.. Characteristics of *Sulfobacillus acidophilus*, sp. nov., and other moderately thermophilic mineral-sulphide-oxidizing bacteria / [P.R. Norris, D.A. Clark, J.P. Owen, S. Waterhouse] // Microbiology (UK). – 1996. – V. 142. – P. 775–783.

67. Golovacheva R.S. *Sulfobacillus*, a new genus of thermophilic sporeforming bacteria / R.S. Golovacheva, G.I. Karavaiko // Mikrobiologiya. – 1978 – V.47. – P.815-822.

68. Peculiarities in the chromosomal DNA structure in *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* analyzed by pulsed-field gel electrophoresis / [T.F. Kondrat'eva, V.S. Melamud, I.A. Tsaplina et al.] // Microbiology. – 1998. – V. 67(1). – P. 13–18.

69. *Sulfobacillus sibiricus* sp. nov. новая умеренно термофильная бактерия / [В.С. Меламуд, Т.А. Пивоварова, Т.П. Турова] // Микробиология. – 2003. – Т. 72, № 5. – С. 681-688.

70. Zakharchuk L.M. Activity of the enzymes of carbon metabolism in *Sulfobacillus sibiricus* under various conditions of cultivation / [L.M. Zakharchuk, M.A. Egorova, I.A. Tsaplina] // Microbiology. – 2003. – V. 72, № 5. – P. 553-557.

71. *Sulfobacillus thermotolerans* sp. nov., a thermotolerant chemolithotrophic bacterium / [T.I. Bogdanova, I. A. Tsaplina, T.F. Kondrat'eva, et al.] // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. – 2006. – V. 56. – P. 1039–1042.

72. Phenotypic properties of *Sulfobacillus thermotolerans*: Comparative aspects / [I. A. Tsaplina, A. E. Zhuravleva, T. I. Bogdanova, et al.] // Microbiology. – 2008. – V. 77, № 6. – P. 654 - 664.

73. Gericke M. Bioleaching of a chalcopyrite concentrate using an extremely thermophilic culture / M. Gericke, A. Pinches, J.V. van Rooyen // International Journal of Mineral Processing. – 2001. – V. 62, № 1. – P. 243-255.

74. The cellular machinery of *Ferroplasma acidiphilum* is iron-protein-dominated / [Ferrer M., Golyshina O.V., Beloqui A. et al.] // Nature. – 2007. – V. 445. – P. 91-94.

75. Golyshina O. *Ferroplasma* and relatives, recently discovered cell wall-lacking archaea making a living in extremely acid, heavy metal-rich environments / Golyshina O., Timmis K.N. // Environ. Microbiol. – 2005. – V. 7, № 9. – P. 1277-1288.

76. Pivovarova T.A. Phenotypic Features of *Ferroplasma acidiphilum* strains YT and Y-2 / T.A. Pivovarova, T.F. Kondrateva, S.G. Batrakov // Microbiology. – 2004. – V. 71, № 6. – P. 698-706.

77. *Ferroplasma acidiphilum* gen. nov., sp. nov., an acidophilic, autotrophic, ferrous-iron-oxidizing, cell-wall-lacking, mesophilic member of the Ferroplasmaceae fam. nov., comprising a distinct lineage of the Archaea / [Golyshina O.V., Pivovarova T.A., Karavaiko G.I. et al.] // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2000. – V. 50. – P. 997-1006.

78. Golyshina O. *Ferroplasma* and relatives, recently discovered cell wall-lacking archaea making a living in extremely acid, heavy metal-rich environments / O. Golyshina, K.N. Timmis // Environ. Microbiol. – 2005. – V. 7, № 9. – P. 1277-1288.

79. Васильева Т.В. Металлы из промышленных отходов / Т.В. Васильева, И.А. Блайда, В.А. Иваница // Энергосбережение. – 2011. – № 5. – С. 31–33.

80. Биогеохимическая роль микроорганизмов в процессе выщелачивания ценных компонентов из германийсодержащего сырья / [Блайда И.А., Васильева Т.В., Слюсаренко Л.И. и др.] // Комплексное использование минерального сырья. – 2010. – № 3. – С. 59-68.

## **ОСНОВНІ ГРУПИ МІКРООРГАНІЗМІВ, ЯКІ БЕРУТЬ УЧАСТЬ У БІОГІДРОМЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСАХ**

*Т.В. ВАСИЛЬЄВА, І.А. БЛАЙДА, В.А. ІВАНИЦЯ*

*Біотехнологічний науково-навчальний центр*

*Одеського національного університету імені І.І. Мечникова*

*Вилучення цінних компонентів із мінералів за допомогою мікроорганізмів і продуктів їх життєдіяльності є визнаним біотехнологічним прийомом переробки сульфідних руд. На сьогоднішній день ця технологія є економічно вигідною і екологічно безпечною. У статті охарактеризовано основні групи бактерій, що беруть участь у біогідрометалургійних процесах вилучення металів з природних сульфідних руд, і сучасні дані про механізм їх бактеріально-хімічного окислення. Наведено основні фенотипні і генотипні властивості ацидофільних хемолітотрофних бактерій, що беруть участь в біогідрометалургійних процесах, - мезофільних і помірно термофільних хемолітотрофних представників родів *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*. Вказані перспективні напрями використання бактеріального вилуговування і можливе значення цього методу для отримання металів з нетрадиційної мінеральної сировини.*

**Ключові слова:** *біогідрометалургія, бактеріально-хімічне вилуговування, мезофільні і помірно термофільні хемолітотрофних бактерії, сульфідні руди*

# ***THE MAIN GROUPS OF MICROORGANISMS INVOLVED IN THE BIOHYDROMETALLURGICAL PROCESS***

***T.V. VASYLEVA, I.A. BLAYDA, V.O. IVANYTSIA***

*Biotechnological centre of I.I. Mechnikov Odessa National University*

*Recovery of valuable components from minerals by microorganisms and their metabolic products is recognized biotechnology reception processing of sulphide ores. To date, this technology is cost-effective and environmentally friendly. The article describes the main groups of bacteria involved in the process biohydrometallurgical extraction of metals from natural sulfide ores, and recent data on the mechanism of bacterial and chemical oxidation. The main phenotypic and genotypic properties of acidophilic chemolithotrophic bacteria involved in biohydrometallurgical processes - mesophilic and moderately thermophilic chemolithotrophic members of the genera Acidithiobacillus, Leptospirillum, Sulfolobus. Promising uses of bacterial leaching and the possible importance of this method for obtaining metals from non-traditional minerals indicated.*

***Keywords:*** *biohydrometallurgy, bacterial and chemical leaching, moderately thermophilic and mesophilic chemolithotrophic bacteria, sulfide ore*