

УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ

В. И. ИВАНОВ

**РОЛЬ ТИОНОВЫХ БАКТЕРИЙ
В ПРОЦЕССАХ ОКИСЛЕНИЯ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
МЕДНО-СУЛЬФИДНЫХ РУД**

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК**

СВЕРДЛОВСК — 1962

УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ

На правах рукописи

В. И. ИВАНОВ

РОЛЬ ТИОНОВЫХ БАКТЕРИЙ
В ПРОЦЕССАХ ОКИСЛЕНИЯ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
МЕДНО-СУЛЬФИДНЫХ РУД

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

СВЕРДЛОВСК — 1962

Автореферат розослан
Защита назначена



ВВЕДЕНИЕ

Изучение роли и значения живого населения Земли в геологических и геохимических процессах земной коры впервые приняло систематический характер и приобрело глубокое теоретическое обоснование благодаря исследованиям академика В. И. Вернадского, заложившего основы современной геохимии, обосновавшего новую научную дисциплину — биогеохимию и создавшего общее учение о биосфере. В. И. Вернадский не только заложил общие основы биогеохимии, но и экспериментально исследовал ряд частных биогеохимических проблем, изучая роль и значение живых организмов в отдельных геохимических процессах. Это направление работ В. И. Вернадского получило широкое развитие, и в настоящее время биологами, геологами и геохимиками раскрываются все новые стороны участия различных видов живых организмов во всевозможных геохимических процессах, процессах образования и разрушения месторождений полезных ископаемых и т. д.

Одной из частных проблем этого направления, а именно изучению роли и значения хемоавтотрофных тионовых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в окислении и выщелачивании медно-сульфидных руд и посвящена диссертационная работа. Эта проблема, наряду с несомненным эвристическим интересом, приобретает в настоящее время и чисто прикладное значение, поскольку бактериальные процессы, протекающие в сульфидных месторождениях, могут быть использованы для интенсификации процессов гидromеталлургической переработки сульфидных руд.

Сульфидные минералы представляют собой одну из распространенных форм нахождения металлов в природе. В окислительных условиях земной коры сульфиды относительно неустойчивы и под действием различных окислительных агентов превращаются в сульфаты, которые, в отличие от сульфидов, в большинстве своем хорошо растворимы в воде. Поэтому окисление сульфидов в месторождениях сопровождается, как правило, их выщелачиванием. Долгое время в качестве природных окислителей сульфидов были известны только химические (абиотические) агенты: кислород, серная кислота, трехвалентное железо и др.

Первые указания о роли биотического (бактериального) фактора в окислении и выщелачивании сульфидов были получены в 1947 г. Колмером и Хинклом, которые установили, что интенсивное окисление ионов 2-валентного железа в 3-валентное состояние, наблюдаемое в кислых дренажных водах пиритосных угольных месторождений, обусловлено участием в этом процессе тионовых бактерий нового вида, названного ими позднее *Thiobacillus ferrooxidans*. 3-валентное железо является одним из наиболее сильных окислителей сульфидов, при взаимодействии с которыми оно восстанавливается в 2-валентное состояние, поэтому бактериальная регенерация 3-валентного железа из 2-валентной формы имеет, несомненно, большое значение в общем процессе окисления и выщелачивания сульфидных минералов. В более поздних работах различных исследователей было экспериментально установлено, что скорость выщелачивания различных сульфидов возрастает в несколько раз под воздействием бактерий, выделенных из пиритосных угольных или сульфидных месторождений. Изучение микрофлоры таких месторождений показало, что в них повсеместно обнаруживаются тионовые бактерии двух видов — *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans*. Сопоставление данных о распространении, экологии и физиологии этих организмов с прямыми экспериментальными данными о резком ускорении выщелачивания сульфидов бактериями дренажных вод сульфидных месторождений делает весьма вероятным вывод о том, что «биокаatalитическое» ускорение выщелачивания сульфидов связано (хотя бы частично) с жизнедеятельностью именно этих микроорганизмов. Колмер и Хинкл предположили, что в пиритосных угольных месторождениях *Th. thiooxidans* окисляет пирит в сульфат 2-валентного железа, а *Th. ferrooxidans* окисляет далее 2-валентное железо в 3-валентное. В исследованиях Брайнера и Джэмерсона, Зарубиной и др. и Мархлевиц отмечено ускорение выщелачивания сульфидов под воздействием чистых культур *Th. ferrooxidans*. Мархлевиц обнаружила способность ускорять выщелачивание сульфидов также у чистых культур *Th. thiooxidans*. Однако, Брайнер и Джэмерсон и Силвермэн с сотр. на основании своих экспериментальных данных отрицают такую способность этого вида бактерий. Таким образом, данные о роли *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в окислении и выщелачивании сульфидных минералов остаются пока противоречивыми. Естественно, что в связи с этим ограничены также данные о механизмах воздействия этих бактерий на сульфидные минералы. Практически имеются данные Колмера и др., Ляликовой, Бека и Мархлевиц об окислении ионов железа культурами *Th. ferrooxidans* и отдельные данные Брайнера и др. и Циммерли и др., не подтвержденные пока опытами с чистыми культу-

рами, о непосредственном окислении сульфидов этим микроорганизмом. Однако экспериментальных данных об относительном значении прямого окисления сульфидов организмом *Th. ferrooxidans* и регенерации им 3-валентного железа пока не было получено.

Таким образом, несмотря на полную уверенность в решающем значении бактериальных процессов при выщелачивании сульфидных минералов в природе, механизм этих процессов, участие в них одного или двух видов бактерий, а в случае участия двух их относительная роль и характер взаимодействия остаются еще невыясненными. Данные о роли *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в окислении и выщелачивании сульфидов несомненно представляют большой интерес для понимания сущности биологических процессов, протекающих в сульфидных месторождениях, и для изучения условий рационального использования этих процессов при переработке руд. Поэтому в диссертационной работе внимание в основном сконцентрировано на экспериментальном изучении этих вопросов. Кроме того, в работе представлены результаты исследования влияния некоторых факторов среды и вещественного состава сульфидных материалов на скорость бактериальных окислительных процессов, поскольку знание условий, благоприятствующих развитию этих процессов, необходимо при промышленном использовании бактерий в практике переработки руд. Учитывая, что в гидрометаллургии сульфидных руд большое народнохозяйственное значение имеют процессы подземного и кучного выщелачивания меди, где в первую очередь могут быть применены бактериальные методы интенсификации процессов, основными объектами при выполнении исследования служили медно-сульфидные минералы и руды.

Диссертационная работа состоит из следующих основных разделов:

I. Введение.

II. Обзор литературы и постановка вопроса (основные положения работ, изложенных в обзоре, даны в настоящем введении).

III. Материал и методика.

IV. Результаты опытов и их обсуждение.

V. Заключение.

Выводы.

Список литературы, включающий 77 работ (35 русских и 42 иностранных).

Объем диссертации 96 страниц с 16 рисунками и 10 таблицами в тексте.

Материалы диссертации доложены на расширенном совещании лаборатории биофизики БИУФАН, посвященном проблемам теоретической и экспериментальной биогеоэко-

логии, на научно-техническом совете института «Уралмеханобр» и на техническом совещании при директоре Кировградского медеплавильного комбината.

Ниже изложены основное содержание диссертации и выводы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

При выполнении работы использованы образцы минералов и руд различных месторождений: пирит, халькопирит, сфалерит, ковеллиновая, халькозиновая, борнитовая и смешанная медная руды, а также синтетический химически чистый ковеллин. Для проведения опытов образцы минералов и руд измельчали до необходимой крупности и выделяли навески на сократителе Джонса или методом квадратов.

Для выделения бактериальных культур, культивирования бактерий и выщелачивания минералов и руд применялись различные среды и растворы: жидкая минеральная среда Летена (выделение и культивирование *Th. ferrooxidans*, растворитель в опытах по выщелачиванию), жидкая минеральная среда Колмера и ее модификации (растворители в опытах по выщелачиванию), жидкая минеральная среда Старки (выделение и культивирование *Th. thiooxidans*), тиосульфат-агар по Ваксману выделение чистых культур *Th. thiooxidans*).

Культуры изучаемых бактерий были выделены из кислых дренажных вод Дегтярского и Красногвардейского месторождений. Чистые культуры *Th. ferrooxidans* получены методом разведения, а *Th. thiooxidans* из типичных хорошо изолированных колоний на тиосульфат-агаре.

Для экспериментального изучения роли исследуемых организмов в выщелачивании сульфидов в основном проводились разнообразные опыты по выщелачиванию сульфидных минералов и руд в присутствии бактерий и в стерильных условиях. Навески материалов помещались в перколяторы (специальные аппараты для выщелачивания) или конические колбы, заливались необходимым растворителем, инкубировались в соответствующих вариантах требуемыми бактериальными культурами и ставились на инкубацию. Регулярно в течение опытов, а также в конце их производились анализы растворов на выщелоченные металлы. По данным анализов судили о ходе и результатах выщелачивания.

Кроме опытов по выщелачиванию, были проделаны также опыты по изучению окисления сульфата 2-валентного железа культурами *Th. ferrooxidans* в различных условиях.

Химические анализы растворов на медь и цинк и анализы исходных материалов выполнены химико-аналитической лабораторией института «Уралмеханобр». Однако такие параметры как рН и содержание различных форм железа в

растворах необходимо было определять на месте во избежание их изменения при хранении. Определение рН производили электрометрическим методом. Общую концентрацию железа в растворах и концентрацию его 3-валентной формы определяли фотоколориметрическим методом с сульфосалициловой кислотой в кислой среде, а концентрацию 2-валентного железа — по разности.

Стерилизация аппаратуры, посуды и материалов производилась термическим (паром под давлением) или химическим (добавление тимола) методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная часть работы естественно распадается на пять следующих частей, по которым и описаны полученные результаты:

1. Влияние бактерий рудничных вод на выщелачивание сульфидов.

2. Роль *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в выщелачивании сульфидов.

3. Относительное значение различных механизмов воздействия *Th. ferrooxidans* на сульфидные минералы.

4. Влияние физико-химических факторов среды на окисление сульфата 2-валентного железа культурами *Th. ferrooxidans*.

5. Контрольный опыт по бактериальному выщелачиванию медной руды.

Обсуждение полученных результатов проводится по тем же разделам попутно с их изложением.

Влияние бактерий рудничных вод на выщелачивание сульфидов

В описываемых опытах в качестве объектов были взяты различные медно-сульфидные материалы (халькопирит, халькозиновая, борнитовая и ковеллиновая руды) и сульфид цинка — сфалерит. Инокулятом в бактериальных вариантах служила рудничная вода Дегтярского месторождения или накопительная культура *Th. ferrooxidans*, выделенная из той же воды. Результаты опытов показали, что бактерии рудничных вод значительно (примерно от 2 до 12 раз) ускоряют выщелачивание отдельных сульфидов, и что абсолютная скорость бактериального выщелачивания вторичных сульфидов меди (халькозин, борнит, ковеллин) во много раз больше скорости выщелачивания первичного сульфида меди — халькопирита. Полученные результаты не только согласуются с литературными данными о резком ускорении выщелачивания сульфидов бактериями сульфидных месторождений и подтверждают наличие таких бактерий в Дегтярском месторож-

денин, но и показывают, что вторичносульфидные медные руды, обычно труднообогатимые, могут более эффективно перерабатываться методом бактериального выщелачивания, чем первичносульфидные руды, что является, несомненно, ценным для практики.

Роль *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в выщелачивании сульфидов

Выше было отмечено, что роль и относительное значение в процессах окисления и выщелачивания сульфидов бактерий *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans*, повсеместно обнаруживаемых в сульфидных месторождениях, не были установлены. Для выяснения этих вопросов проделаны опыты по выщелачиванию пирита и ковеллина в стерильных условиях и в присутствии бактерий каждого вида в отдельности или их совместном присутствии. Растворителем в опытах с пиритом и в части опытов с ковеллином служил основной раствор среды Колмера без железа, в другой части опытов с ковеллином в растворитель было внесено 1 г/л железа в виде феррисульфата. Навески минералов были по 1 г. Продолжительность опытов с пиритом 27 суток, с ковеллином — 20 суток. Результаты опытов (табл. 1) показали, что:

Таблица 1

Влияние *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* на выщелачивание пирита и ковеллина

Минерал	Растворитель	И н о к у л я т			
		стерильный контроль	<i>Th. ferrooxidans</i>	<i>Th. thiooxidans</i>	<i>Th. ferrooxidans</i> et <i>thiooxid.</i>
		Выщелочено металла, в мг			
Пирит	основной раствор среды Колмера без железа	12	29	13	53
Ковеллин	то же среда	44	83	46	81
Ковеллин	Колмера с $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	69	140	70	164

1. *Th. ferrooxidans* значительно ускоряет выщелачивание обоих минералов. При этом в опытах с ковеллином в отсутствие железа в растворе ускорение выщелачивания следует объяснить непосредственным окислением этим организмом сульфидной серы в сульфатную. Сравнение двух нижних строк таблицы показывает также, что в случае выщелачивания ковеллина инокуляция среды *Th. ferrooxidans* дает значительно больший эффект при наличии в растворе ионов железа. Значит *Th. ferrooxidans* не только окисляет сульфидную серу, но и осуществляет регенерацию отработанного растворителя, окисляя ионы 2-валентного железа в 3-валентное состояние.

2. *Th. thiooxidans* в чистой культуре не ускоряет выщелачивание пирита и ковеллина.

3. Наибольшая скорость окисления пирита и ковеллина (последнего только при наличии в среде ионов железа) достигается при смешанной инокуляции среды обеими формами тионовых. Это следует объяснить, вероятно, интенсивным окислением организмом *Th. thiooxidans* коллоидной элементарной серы, образующейся, как известно, на поверхности сульфидов при их взаимодействии с 3-валентным железом, что ограничивает, несомненно, дальнейший доступ реагента и бактерий к сульфидной поверхности. Окислять элементарную серу может и *Th. ferrooxidans*, но гораздо медленнее, чем *Th. thiooxidans*. Характерно, что при выщелачивании пирита, в котором на 1 атом металла приходится 2 атома серы, а не 1, как в ковеллине, эффект от смешанной инокуляции выражен гораздо сильнее. Следует ожидать, что при выщелачивании и других медно-сульфидных минералов, имеющих обычно низкое атомное отношение серы к металлу, основное значение имеет *Th. ferrooxidans*.

В соответствии с изложенным выше схема участия *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в окислении и выщелачивании сульфидов включает 1) непосредственное окисление сульфидов бактерией *Th. ferrooxidans*, 2) регенерацию этим организмом ионов 3-валентного железа и 3) окисление элементарной серы в основном бактерией *Th. thiooxidans* и, вероятно, частично *Th. ferrooxidans*.

Относительное значение различных механизмов воздействия *Th. ferrooxidans* на сульфидные минералы

Для оценки относительного значения непосредственного окисления сульфидов организмом *Th. ferrooxidans* и регенерации им 3-валентного железа проделаны опыты по выщелачиванию халькопирита и сфалерита при участии этого организма растворителями, свободными от железа или содержащими сульфаты его 2- или 3-валентной форм. Резкое ускорение

выщелачивания в присутствии солей железа вне зависимости от валентности последнего (табл. 2) показало, что 1) регенерация 3-валентного железа организмом *Th. ferrooxidans* имеет гораздо большее относительное значение, чем непосредственное окисление сульфидов этим организмом и 2) скорость окисления 2-валентного железа в 3-валентное бактериями *Th. ferrooxidans* значительно больше скорости восстановления 3-валентного железа в 2-валентное сульфидами (независимость скорости выщелачивания от валентности железа, хотя взаимодействует с сульфидами только 3-валентная форма).

Таблица 2

Влияние различных соединений железа на выщелачивание сульфидов культурой *Th. ferrooxidans*

Минерал	растворитель — основной раствор среды Летена		
	без железа	с FeSO ₄	с Fe ₂ (SO ₄) ₃
	Выщелочено металла, мг		
Халькопирит	1,5	31	31
Сфалерит	3	81	83

Детальное экспериментальное изучение соотношения скоростей окисления 2-валентного железа бактериями и восстановления 3-валентного железа сульфидами показало, что при выщелачивании сульфидов их окисление является лимитирующей стадией процесса только в случае трудноокисляемых сульфидов, как халькопирит и сфалерит. В случае же легкоокисляемых сульфидов (халькозин, ковеллин, борнит) лимитирующей стадией процесса бактериального выщелачивания является регенерация отработанного реагента бактериями. Следовательно, при выщелачивании таких сульфидов необходимо предусматривать дополнительную бактериальную регенерацию 3-валентного железа в отдельном аппарате с последующим возвращением регенерированного растворителя в цикл выщелачивания. Это положение подтвердилось специальными опытами, показавшими, что дополнительная регенерация 3-валентного железа увеличивает скорость выщелачивания легкоокисляемой вторичносульфидной медной руды примерно в полтора-два раза.

Влияние физико-химических факторов среды на окисление сульфата 2-валентного железа культурами *Th. ferrooxidans*

При выщелачивании медно-сульфидных минералов и руд бактериальное ускорение процесса определяется главным образом регенерацией 3-валентного железа организмом *Th. ferrooxidans*. Для определения благоприятных для такой регенерации значений физико-химических параметров и технологических условий среды проведены опыты по изучению окисления 2-валентного железа культурами *Th. ferrooxidans* в различных условиях. Полученные результаты показали следующее:

1. Наибольшая окислительная активность бактерий наблюдается в кислой среде при значении рН около 2.

2. Для бактериального окисления 2-валентного железа благоприятны низкие его концентрации порядка единиц граммов на литр.

3. Бактерии не погибают при концентрациях железа, меди или цинка в растворе порядка 10—20 г/л и легко адаптируются к повышенным концентрациям меди.

4. При бактериальной регенерации Fe^{3+} не требуется внесения в среду дополнительных источников минерального питания, сверх имеющихся в природных водах.

5. При периодическом режиме перколяции с применением бактериальной регенерации 3-валентного железа скорость выщелачивания примерно в 2 раза выше, чем при непрерывном режиме.

В экспериментально найденных благоприятных условиях проведено контрольное бактериальное выщелачивание медной руды Джекказганского месторождения. Медь в руде была представлена примерно на 90% вторичными сульфидами. За 80 суток опыта под воздействием бактерий было выщелочено 76% меди, а в стерильных условиях только 29%, при этом в данном опыте скорость выщелачивания меди под воздействием бактерий была примерно в полтора раза выше, чем в более ранних опытах по выщелачиванию аналогичных материалов, когда ряд факторов, благоприятствующих развитию бактериальных процессов, не был еще найден и учтен. Таким образом, интенсификация выщелачивания сульфидов бактериями может быть значительно усилена путем регулирования условий среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение участия различных видов живых организмов в отдельных геологических и геохимических процессах является необходимым условием познания грандиозного круговорота веществ и энергии, протекающего в биосфере Земли. Одним из звеньев этого круговорота являются процессы окисления и выщелачивания сульфидных руд. Открытие биогенного характера этих процессов и изучение экологии, физиологии и биохимии хемоавтотрофных тионовых бактерий, участвующих в этих процессах, позволяет по-новому оценить значение хемосинтезирующих организмов в энергетическом балансе биосферы. В самом деле, до недавнего времени в качестве первичных «доноров», вносящих энергию в биосферу из внешних (по отношению к биосфере) источников, строго говоря могли рассматриваться только фотосинтезирующие организмы. Как пока первое (но вряд ли в периоде единственное) исключение из этого общего правила можно рассматривать тионовые бактерии, использующие в качестве энергетического материала сульфидные минералы, поскольку абиогенное («внебиосферное») происхождение многих сульфидных месторождений является доказанным.

Участие в превращениях сульфидов тионовых бактерий двух видов интересно и в другом отношении, так как является еще одним примером эволюционной адаптации и координации функций двух биологических видов, жизнедеятельность которых не только взаимосвязана, но и согласована с чисто химическими абиогенными процессами.

Наконец, следует отметить, что биологические процессы, протекающие в сульфидных месторождениях, могут быть успешно использованы в практике гидрометаллургической переработки сульфидных руд (в первую очередь медных) в процессах подземного и кучного выщелачивания, имеющих большое народнохозяйственное значение и позволяющих добывать значительные количества дешевой меди из безвозвратных эксплуатационных потерь природных богатств, неизбежных при разработке месторождений горным способом и непригодных для других способов переработки: забалан-

совые руды, целики, малые месторождения, хвостовые отвалы и др.

Область возможного применения бактериальных процессов в горнорудной промышленности не ограничивается выщелачиванием медных руд. Заслуживает внимания и изучения возможность применения бактериального выщелачивания к сульфидным рудам других металлов. Способность *Th. ferrooxidans* резко интенсифицировать окисление ферросульфата в феррисульфат может быть использована в качестве нового безреагентного способа регенерации этого ценного промышленного растворителя. Способность *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* резко ускорять выщелачивание пирита может быть использована в алюминиевой промышленности для повышения кондиций по сере богатых пестроцветных бокситов. Таким образом, возможности применения бактериальных методов в процессах первичной переработки руд, как это явствует уже из немногочисленных приведенных примеров, широки и многообразны и заслуживают глубокого и детального изучения.

Задача практического использования бактериальных методов в горнорудной промышленности требует, конечно, дальнейшего исследования разнообразных геохимических процессов, протекающих при участии микроорганизмов, изучения экологии, физиологии и биохимии таких микроорганизмов, проведения генетико-селекционных исследований с целью получения устойчивых высокоактивных вариантов, особенно методами радиационной селекции, а также решения целого ряда других, как биологических, так и чисто инженерных задач.

ВЫВОДЫ

1. В процессах окисления и выщелачивания сульфидных руд меди и, по-видимому, других металлов в сульфидных месторождениях, большое значение имеют бактериальные окислительные процессы, протекающие при участии тионовых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus thiooxidans*, что необходимо учитывать и рационально использовать в практике гидрометаллургической переработки таких руд, при этом специального внесения бактерий в среду извне, как правило, не потребуется.

2. Механизм участия бактерий *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans* в выщелачивании сульфидов включает непосредственное окисление сульфидов бактерий *Th. ferrooxidans*, образование из пирита и постоянную регенерацию этим организмом сульфата 3-валентного железа, являющегося растворителем сульфидов, и, по-видимому, окисление в основном бактерий *Th. thiooxidans* элементарной серы, образующейся на поверхности сульфидов при их взаимодействии с 3-валентным железом.

3. При выщелачивании медно-сульфидных руд особенно большое значение имеет регенерация 3-валентного железа организмом *Th. ferrooxidans*. Следовательно, при выщелачивании медно-сульфидных руд рациональным является использование для орошения кислых рудничных вод или хвостовых вод цементационных установок, содержащих железо и, как правило, значительное количество бактерий.

4. Для бактериальной регенерации 3-валентного железа благоприятны относительно низкие концентрации ионов железа, а скорость растворения многих сульфидов в растворе сульфата 3-валентного железа практически не зависит от концентрации последнего, поэтому для выщелачивания медно-сульфидных руд с применением бактериальной регенерации феррисульфата достаточно тех концентраций железа, которые имеются обычно в кислых сульфатных рудничных водах.

5. Скорость растворения легкоокисляемых вторичных сульфидов меди в подкисленном растворе сульфата 3-ва-

лентного железа больше скорости регенерации отработанного растворителя организмом *Th. ferrooxidans*. Поэтому при бактериальном выщелачивании таких сульфидов необходима дополнительная регенерация реагента в отдельном аппарате, например, в аэрируемом отстойнике.

6. Благоприятными условиями для бактериального выщелачивания медно-сульфидных руд являются кислая среда и аэрация. Повышенные концентрации меди в растворах не являются препятствием для применения бактериального метода. При бактериальном выщелачивании не требуется внесения в среду дополнительных источников минерального питания бактерий сверх имеющихся в природных водах.

7. Изучение вопроса о роли тионовых бактерий в процессах окисления и выщелачивания медно-сульфидных руд позволяет вскрыть биогеохимический механизм одного из звеньев круговорота веществ и энергии в биосфере, дает возможность по-новому оценить значение хемосинтетиков в биосфере, знакомит с уникальными по своей физиологии и экологии организмами и, главное, расширяет представления о роли и значении жизни в «механизме планеты». Так как ближайшее рассмотрение вопроса о роли бактериальных процессов в выщелачивании сульфидов показало, к тому же, что процессы такого рода могут быть использованы в практике переработки руд, то своевременным и актуальным является изучение этого вопроса с биологических, геохимических и инженерных позиций и поиски путей интенсификации бактериальных процессов выщелачивания с целью скорейшего их внедрения в практику промышленности.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Иванов В. И., Степанов Б. А., 1960. Применение микробиологических методов в обогащении и гидрометаллургии. Изд. ЦИИНЦветмет, М.
2. Степанов Б. А., Иванов В. И., Нагирняк Ф. И., 1960, Применение микробиологических процессов в обогащении руд и гидрометаллургии. Бюлл. цвет. мет., 5(154).
3. Иванов В. И., 1961. О применении бактериальных методов в обогащении руд цветных металлов. Тр. ИНМИ АН СССР, вып. IX, «Геологическая деятельность микроорганизмов».
4. Иванов В. И., Нагирняк Ф. И., Степанов Б. А., 1961. Бактериальное окисление сульфидных руд. I. Роль *Thiobacillus ferrooxidans* в окислении халькопирита и сфалерита. Микробиология, т. XXX, вып. 4.
5. Иванов В. И., Ляликова Н. Н., 1962. О систематике железоокисляющих тионовых бактерий. Микробиология, т. XXXI, вып. 3.
6. Иванов В. И., 1962. Влияние некоторых факторов на окисление железа культурами *Thiobacillus ferrooxidans*. Микробиология, т. XXXI, вып. 4.
7. Иванов В. И., Нагирняк Ф. И., 1962. Интенсификация выщелачивания медно-сульфидных минералов тионовыми бактериями. Цветные металлы, № 8.