



БИОГЕОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

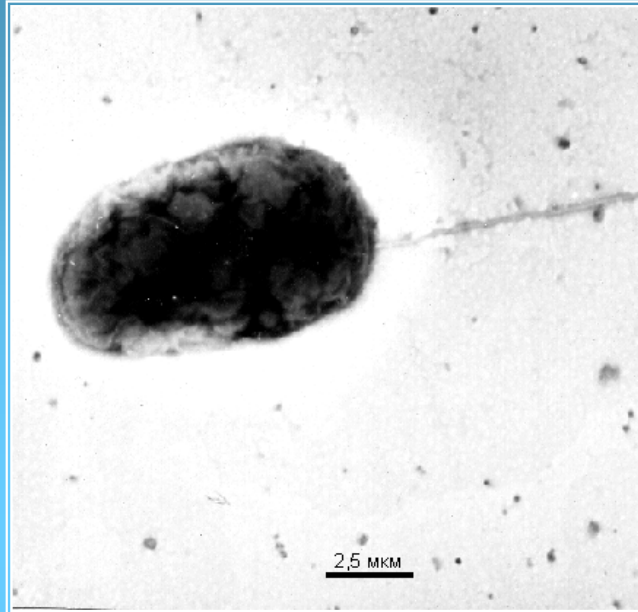
Т.Ф. Кондратьева

*Учреждение Российской академии наук
Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН*

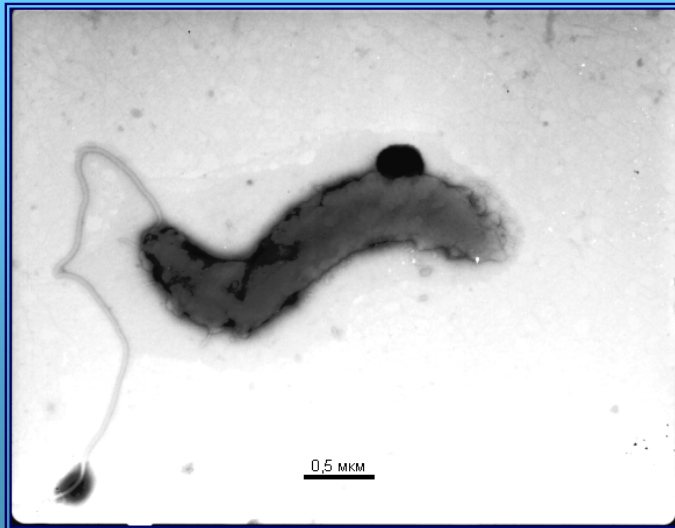
Биогеотехнология извлечения золота из сульфидных руд и концентратов

Биогеотехнология переработки упорных золотомышьяковых концентратов основана на бактериальном окислении сульфидных минералов, прежде всего арсенопирита и пирита, для вскрытия находящихся с ними в тесной ассоциации тонкодисперсных и субмикроскопических частиц золота.

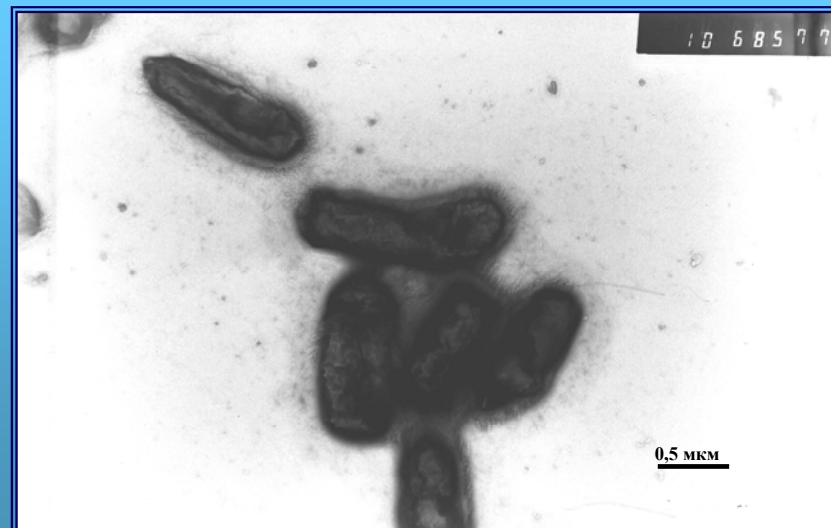
Acidithiobacillus ferrooxidans



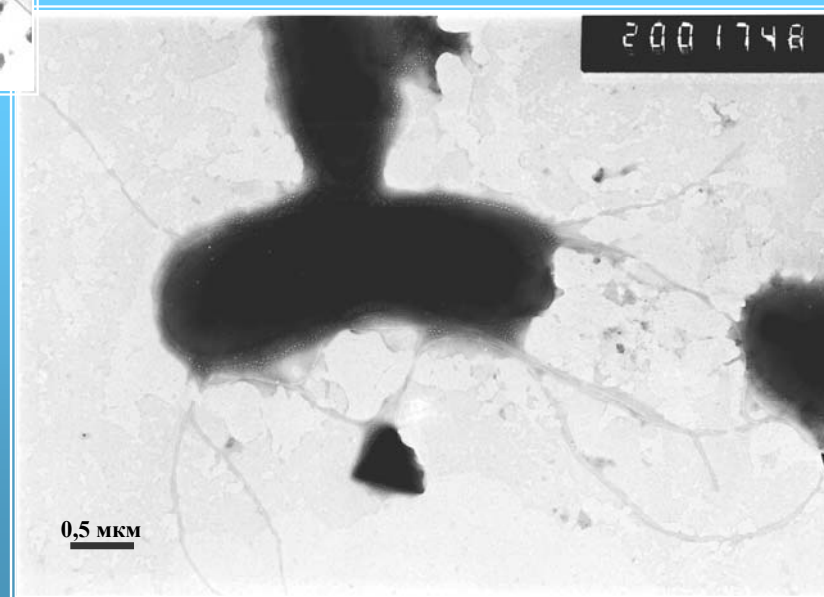
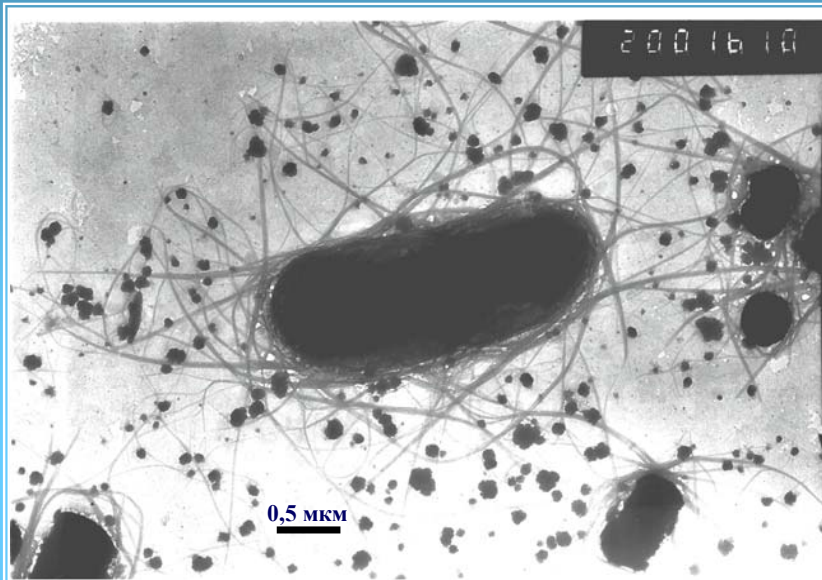
*Leptospirillum
ferrooxidans*



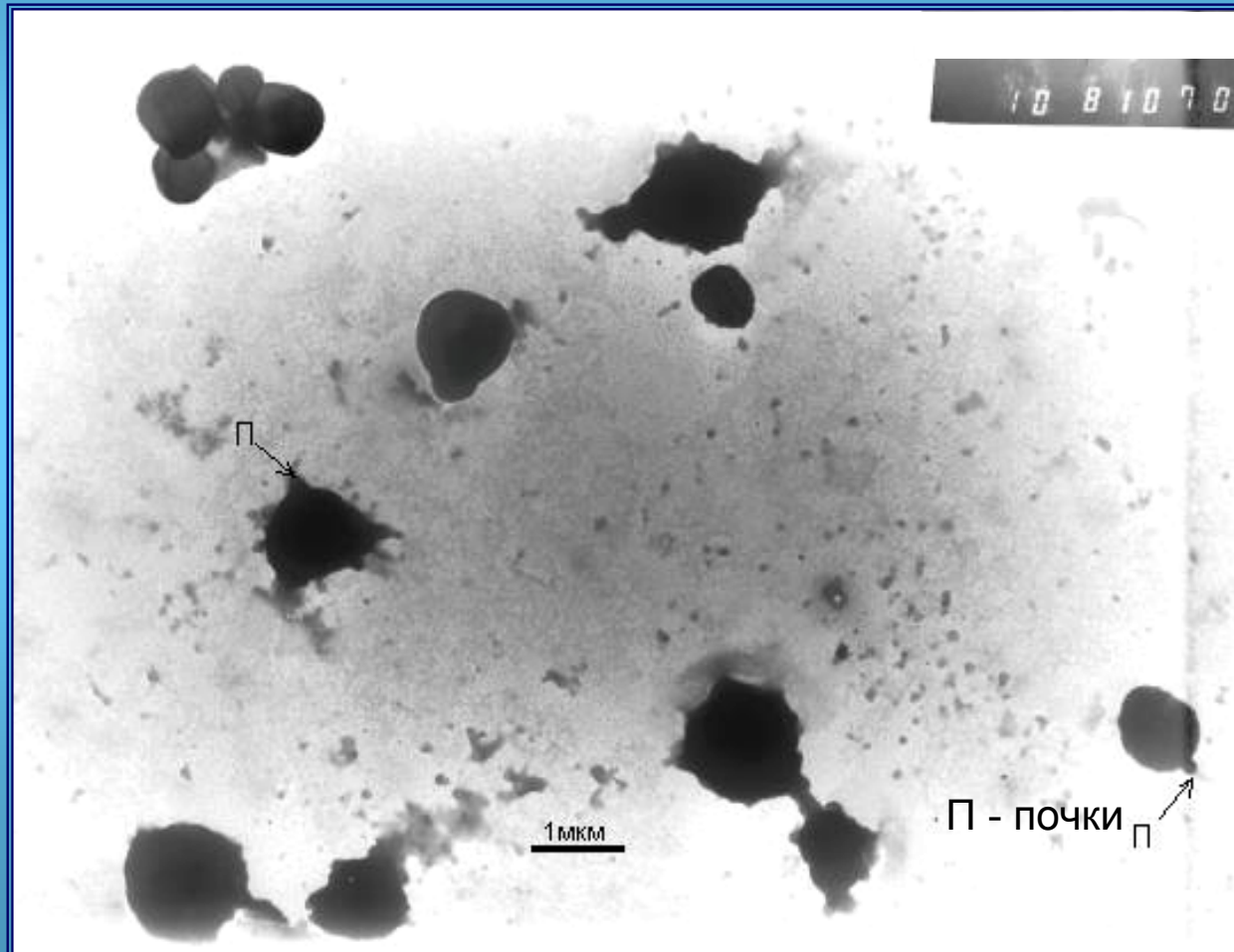
A. thiooxidans



Морфология клеток штамма *Sulfobacillus olympiadicus* S-5.



Вид архей *Ferroplasma acidiphilum* под
электронным микроскопом



Разнообразие ацидофильных хемолитотрофов. Грамотрицательные бактерии.

Бактерии	Неорганические источники энергии	Оптимальные условия / пределы жизнедеятельности	Ссылка
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ (S ²⁻), сульфидные минералы	pH = 1,7 - 2,5 / 1,0 - 4,5; t, °C = 28 - 30 / 2 - 37	Colmer, Hinkle, 1947; Kelly, Wood, 2000
<i>A. thiooxidans</i>	S ⁰ (S ²⁻)	pH = 2,0 - 3,0 / 0,5 - 5,5; t, °C = 28 - 30 / 2 - 37	Waksman, Joffe, 1922; Kelly, Wood, 2000
<i>A. caldus</i>	S ⁰ (S ²⁻)	pH = 2,0 - 2,5 / 1,0 - 3,5; t, °C = 45 / 32 - 52	Hallberg, Lindstrom, 1994; Kelly, Wood, 2000
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Fe ²⁺ , FeS ₂	pH = 1,8 - 2,2 / 1,5 - 5,0; t, °C = 30 - 45) / 2 - 50	Маркосян 1972
<i>L.thermoferrooxidans</i>	Fe ²⁺	pH = 1,65 – 1,9 / 1,3 - 4,0; t, °C = 45 – 50 / 30 - 60	Головочева и др., 1992; Hippe, 2000
<i>L. ferriphilum</i>	Fe ²⁺ , FeS ₂	pH = 1,4 - 1,8; t, °C = 30 - 37	Coram and Rawlings, 2002
<i>L. ferrodiazotrophum</i>	Fe ²⁺	pH = 1,2; t, °C = 37	Tyson et al., 2005

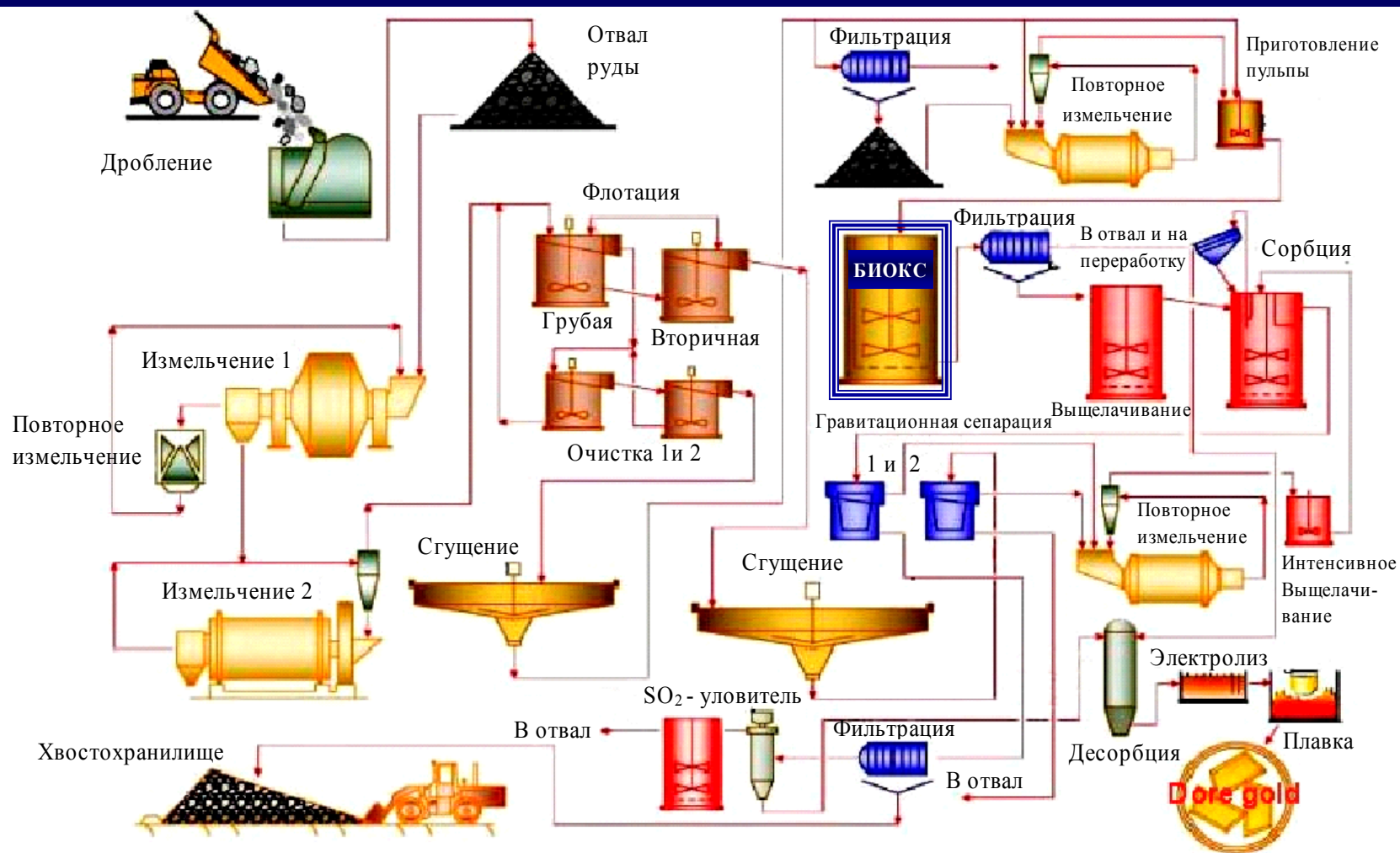
Разнообразие ацидофильных хемолитотрофов. Грамположительные бактерии.

Микроорганизмы	Неорганические источники энергии	Оптимальные условия/ пределы жизнедеятельности	Ссылка
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ (S ²⁻), сульфидные минералы	pH = 1,7 - 2,4 / 1,5 - 5,5; t, °C = 50 - 55 / 20 - 60	Головачева и Каравайко, 1978
<i>S. acidophilus</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфидные минералы	pH = 2,0; t, °C = 45 - 50	Norris et al., 1996
<i>S. sibiricus</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфидные минералы	pH = 2,0 / 1,1 - 2,6; t, °C = 55 / 17 - 60	Меламуд и др., 2003
<i>S. thermotolerans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , S ₄ O ₆ ²⁻ , сульфидные минералы	pH = 2,0 / 1,2 - 2; t, °C = 40 / 20 - 60	Bogdanova et al., 2006
<i>Alicyclobacillus disulfidooxidans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻ , FeS ₂	pH = 1,5 - 2,5 / 0,5 - 6,0; t, °C = 35 / 4 - 40	Dufresne et al., 1996; Karavaiko et al., 2005
<i>Al. tolerans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфидные минералы	pH = 2,0 - 2,7 / 1,5 - 5,0; t, °C = 28 - 42 / 20 - 55	Коваленко и Малахова, 1983; Karavaiko et al., 2005

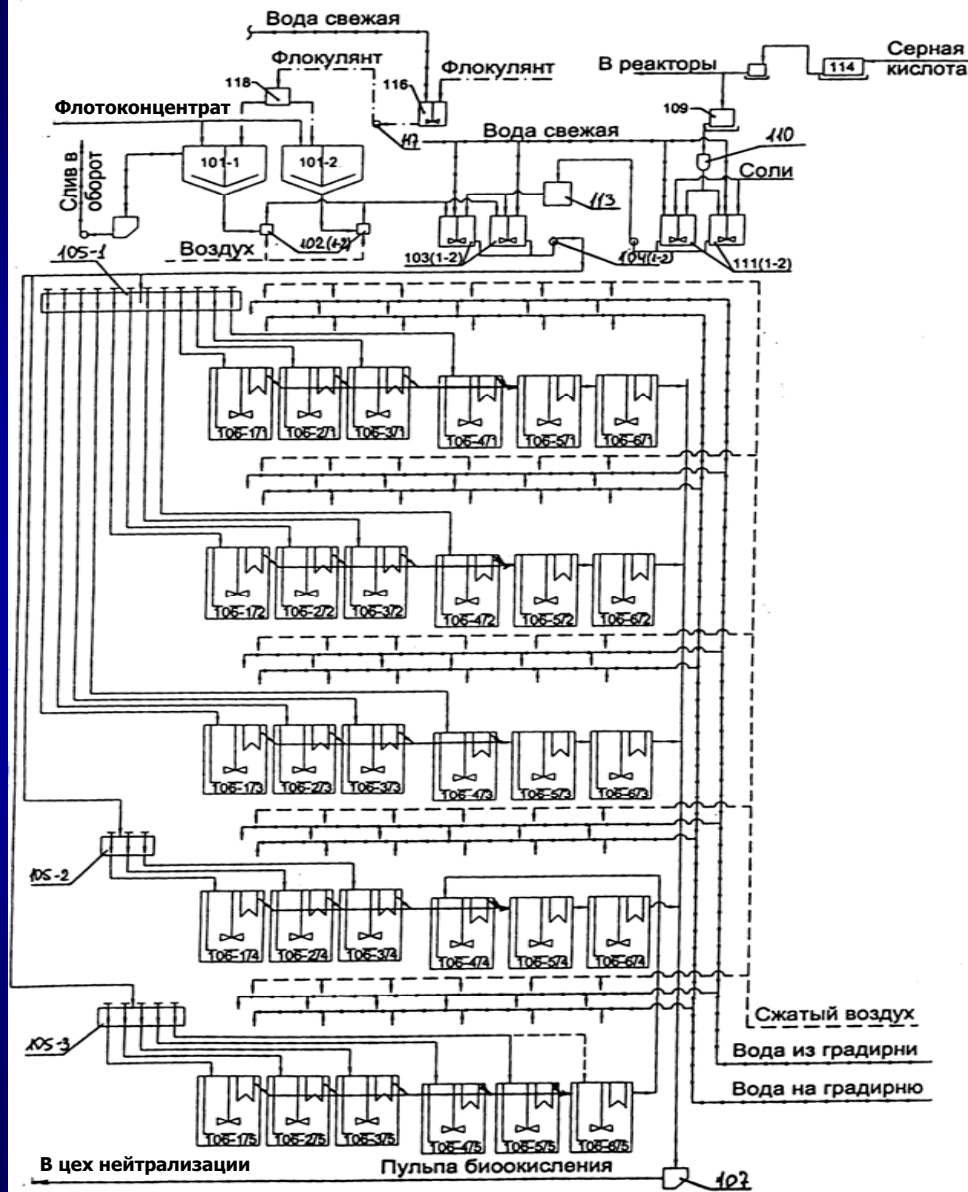
Разнообразие ацидофильных хемолитотрофов. Археи.

Микроорганизмы	Неорганические источники энергии	Оптимальные условия / пределы жизнедеятельности	Ссылка
<i>Acidianus brierleyi</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ (S ²⁻), сульфидные минералы	pH = 1,5 - 2,0 / 1,0 -6,0; t, °C = 70 /45 - 75	Seegerer et al., 1986
<i>Ac. infernus</i>	S ⁰	pH = 1,5 - 2,0 / 1,0 -5,5; t, °C = 90 / 65 -96	Seegerer et al., 1986
<i>Ac. ambivalens</i>	S ⁰	pH = 2,5 / 1,0 -3,5; t, °C = 80 / - 87	Zillig et al., 1986; Fuchs et al., 1996
<i>Ac. tengchongensis</i>	S ⁰	pH = 2,5 / 1,5 - 5,0; t, °C = 70 / 55 - 80	He et al., 2004
<i>Ac. manzaensis</i>	S ⁰	pH = 1,2-1,5 / 1,0-5,0; t, °C = 80 / 60 - 90	Yoshida et al., 2006
<i>Metallosphaera sedula</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфидные минералы	pH = 1,5 - 2,0; t, °C = 50 - 80	Huber et al., 1989
<i>M. prunae</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфидные минералы	pH = 3,0 / 1,0 - 5,0; t, °C = / 55 - 80	Fuchs et al., 1995
<i>M. hakonensis</i>	S ⁰ , (S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	pH = 3,0 / 1,0 - 4,0; t, °C = 70 / 50 - 80	Takayanagi et al., 1996; Kurosawa et al., 2003
<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	S ⁰ , (S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	pH = 2,5 / 2,0 - 4,0; t, °C = 70 / 55 - 85	Brock et al., 1972
<i>Sul. solfataricus</i>	S ⁰ , (S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	pH = 4,5 / 3,5 - 5,0; t, °C = 70 / 55 - 85	Zillig et al., 1980
<i>Sul. shibatae</i>	S ⁰	pH = 3,0; t, °C = 81	Grogan et al, 1990
<i>Sul. metallicus</i>	S ⁰	pH = / 1,0 - 3,5; t, °C = 65 / 50 - 75	Huber and Stetter, 1991
<i>Sul. yangmingensis</i>	S ⁰ , (S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	pH = 4,0 / 2,0 - 6,0; t, °C = 80 / 65 - 90	Jan et al., 1999
<i>Sul. tokodaii</i>	S ⁰	pH = 2,5 - 3,0 / 2,0 - 5,0; t, °C = 80 / 70 -85	Suzuki et al., 2002
<i>Sul. tengchongensis</i>	S ⁰	pH = 3,5 / 2,5 - 4,5; t, °C = 85-90 / 65 - 95	Xiang et al., 2003
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	Fe ²⁺ , FeS ₂	pH = 1,7 - 1,8 / 1,3 - 2,2; t, °C = 35 / 15 - 45	Golyshina, et al., 2000
<i>F. acidarmanus</i>	Fe ²⁺	pH = 1,2 / 0 - 1,5; t, °C = 42 / 23 - 46	Dopson et al., 2004
<i>F. cupricumulans</i>	Fe ²⁺	pH = 1,0 -1,2 /; t, °C = 53 / 22 - 63	Hawkes et al., 2006

Технологическая схема биогидрометаллургической переработки золотосодержащей сульфидной руды



БИОКС – бактериальное окисление золотосодержащего сульфидного концентрата. www.polyusgold.com



**Технологическая
схема биоокисления
флотоконцентрата**

Золотодобывающие предприятия, использующие биогидрометаллургическую технологию (Lawrence R.W.,1994; Brierley C.L, 1995; Brierley J.A. and Brierley C.L. 2001; Fernando A., 2002)

Предприятие, страна	Наименование технологии	Мощность, т концентрата (руды) / сут	Годы ввода и расширения
Упорные золотосодержащие концентраты (чановое биовыщелачивание)			
Fairview (ЮАР)	BIOX®	14 35 55	1986 1991 1999
Austin, США	BIOX®	45-50	1989
Fairview, ЮАР	BIOX®	35	1986-1999
Sao Bento, Бразилия	BIOX®	150 300 380	1991 1994 1998
Harbour Lights, Австралия	BIOX®	40	1991
Wiluna, Австралия	BIOX®	115 154	1993 1996
Ashanti-Sansu, Гана	BIOX®	720 960	1994 1995
Tamboraque, Перу	BIOX®	60	1998
Youanmi, Австралия	BacTech	120	1994
Kasese Cobalt Co. Ltd. (KCCL), Уганда	BRGM/Signet/KCCL	240	1998
Beaconsfield, Австралия	Mintek/BacTech	68	1999
Laizhou, Китай	Mintek/BacTech	100	2001-2004
ЗАО "Полюс", Россия	BIONORD®	300 1000	2001 2006
ЗАО ГМК "Алтын Аймак", Казахстан	BIOX®		2004
Кокпатас, Узбекистан	BIOX®	2163	2006
Золотосодержащие руды			
Tonkin Springs, США	Чановое биовыщелачивание	1500	1991-1998
Mount Leyshon, Австралия	Кучное биовыщелачивание	1370	1992
Carlin, США	BioPro (кучное биовыщелачивание)	10000	1995
Agnes, ЮАР	GEOCOAT® (кучное биовыщелачивание)	50	2003
ОАО "АЛЕЛ", Казахстан	Кучное биовыщелачивание		2004

Экономическое сопоставление технологии биовыщелачивание – цианирование с вариантами пирометаллургической и автоклавной технологий переработки упорных золотосодержащих концентратов (Corrigan 1993; Лодейщиков, 1999)

Показатели	Автоклавное окисление-цианирование	Обжиг-цианирование
снижение капитальных вложений, %	20-40%	12-20%
уменьшение эксплуатационных затрат на 1 т концентрата	до 10%	8-25%
повышение извлечения золота	до 13%	2-13%
уменьшение сроков строительства	до 25%	

Биогеотехнология выщелачивания цветных металлов

С конца 80-х и начала 90-х годов основными направлениями технического прогресса в области переработки низкосортных, окисленных, трудно-обогащаемых медных руд являются разработка и применение процессов кучного выщелачивания или выщелачивания в отвалах.

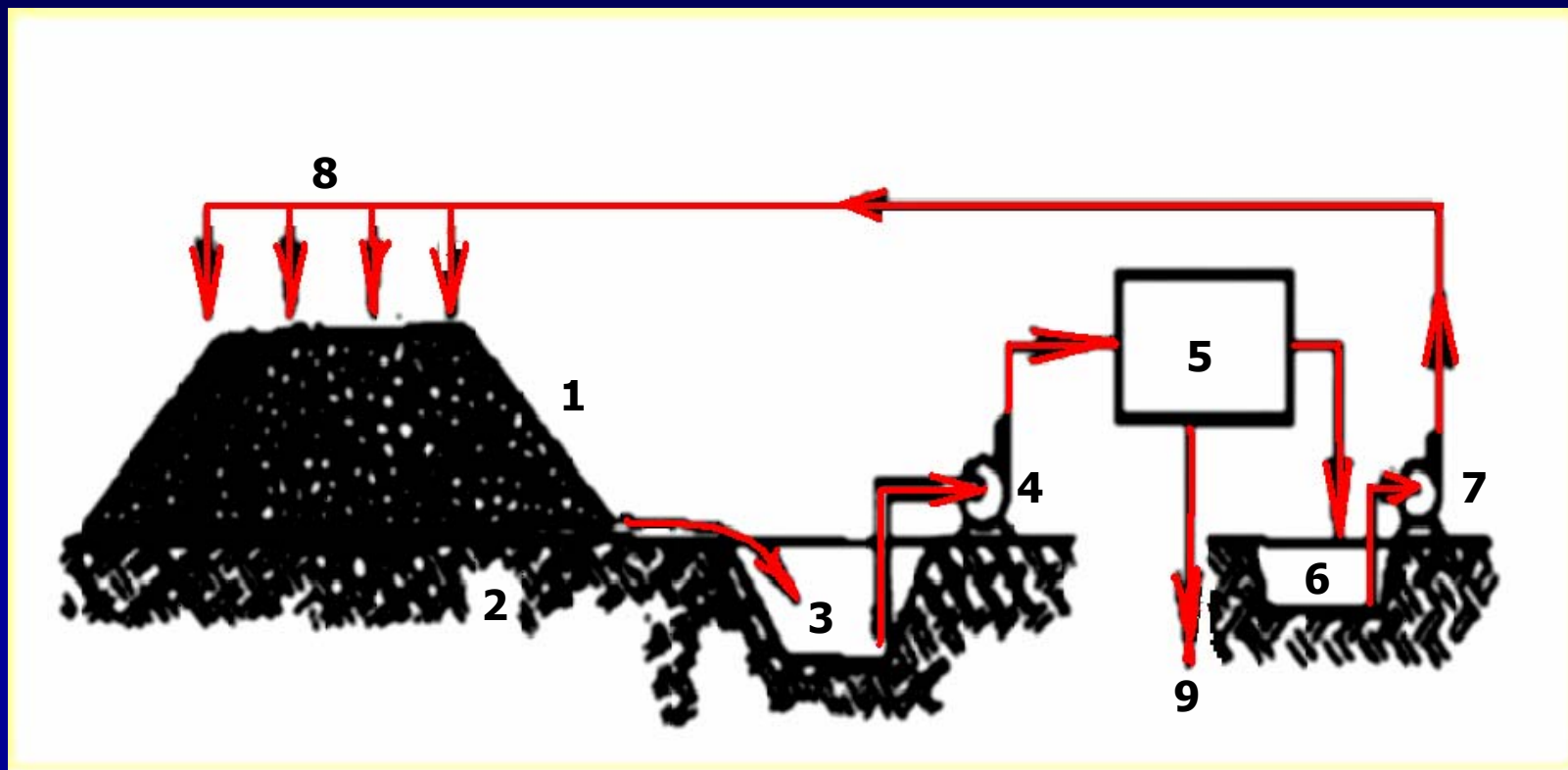


Схема процесса кучного выщелачивания:

1 – куча, 2 – поверхность почвы, 3 – прудок для сбора продуктивных растворов, 4 – насос, 5 – желоба для цементации, 6 – прудок для отработанного раствора, 7 – насос, 8 – система орошения отвала, 9 – металл

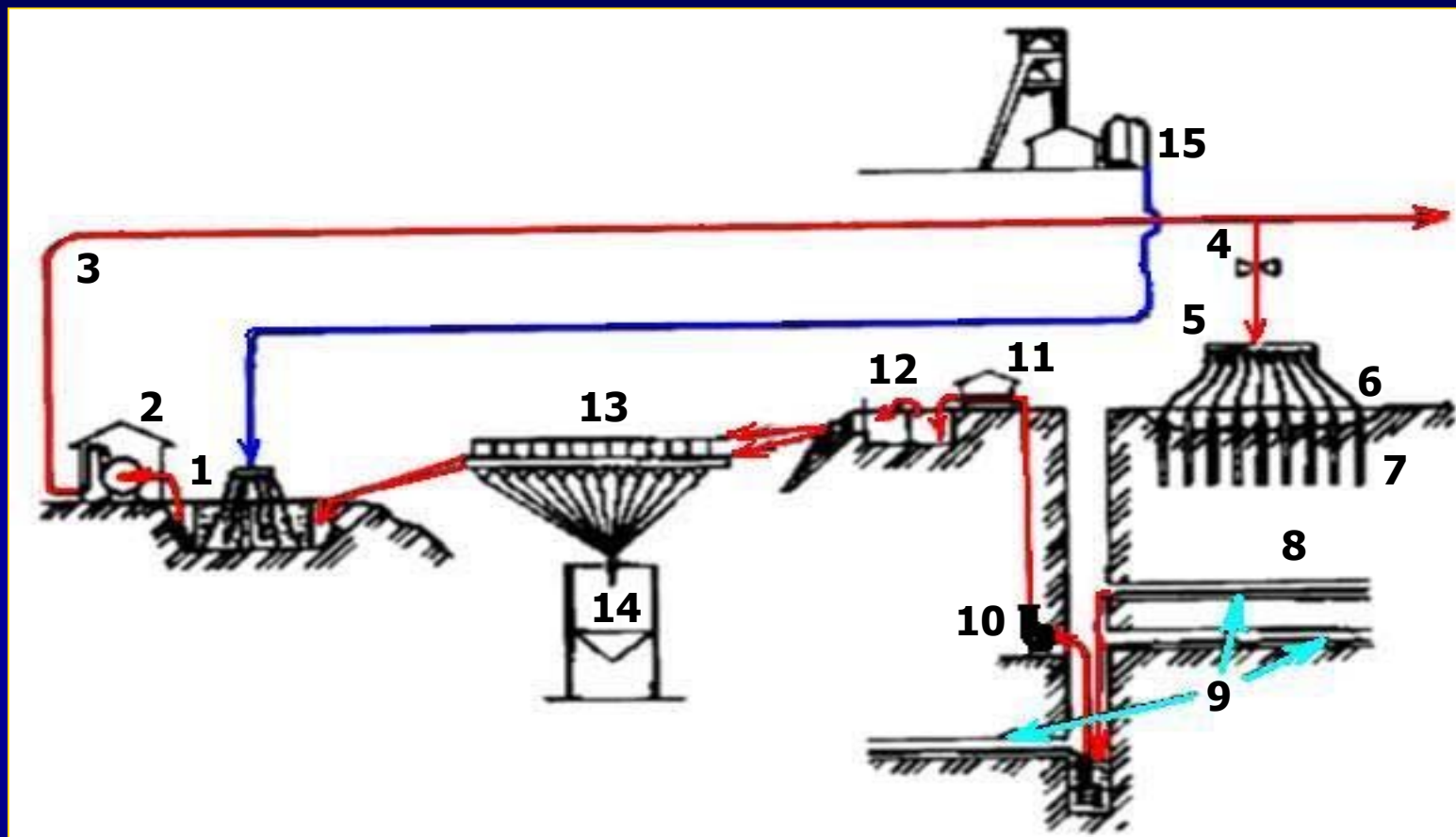


Схема подземного бактериального выщелачивания меди на руднике Дегтярский: 1 – аэрация рециркулирующего раствора, 2 – насосная станция, 3 – распределительный трубопровод для подачи растворов, 4 – кран, 5 – разветвленный трубопровод, 6 – трубопровод, 7 – нагнетательные скважины, 8 – рудное тело, 9 – дренажные желоба, 10 – насос для подачи продуктивных растворов, 11 – лимниграфная установка, 12 – отстойник, 13 – желоб для осаждения, 14 – бункеры для цветной меди, 15 – компрессорная установка.

Основные горнорудные предприятия, использующие технологию кучного выщелачивания медной руды (Lawrence R.W.,1994; Brierley and Brierley C.L, 2001; Fernando A., 2002; Drescher W.H., 2004)

Предприятие, страна	Производительность по руде, тыс. т/сутки	Содержание меди, %	Год ввода
<i>Lo Aguirre, Chile</i>	16	1.5	1980
<i>Mt. Leyshon, Australia</i>	1.37	0.15	1992-1995
<i>Cerro Colorado, Chile</i>	16	1.4	1993
<i>Salvador QM, Chile</i>		0.3-0.4	
<i>Collahuasi, Chile</i>		1.44	
<i>Chuquicamata SBL, Chile</i>		0.6-0.8	1998
<i>Girrilambone, Australia</i>	2	3	1993
<i>Ivan Zar, Chile</i>	1.5	2.1	1994
<i>Quebrada Blanca, Chile</i>	17.3	1.3	1994
<i>Andacollo, Chile</i>	16	1	1996
<i>Dos Amigos, Chile</i>	3	2.5	1996
<i>Cerro Verde, Peru</i>	32	0.7	1996
<i>Zaldivar, Chile</i>	20	1.4	1998
<i>S&K Copper, Myanmar</i>	15	1.25	1998
<i>Cananea, Mexico</i>		0,6	1980

Развитие новых более эффективных технологий переработки минерального сырья, содержащего цветные металлы

Развитие новых эффективных технологий для переработки минерального сырья является одним из важнейших факторов научно-технического прогресса. Это, прежде всего, связано с тем, что резко изменились свойства руд и концентратов, практически не подлежащих переработке традиционными технологиями. Первостепенное значение приобретает и проблема комплексного и рационального использования полезных ископаемых.

Актуальной задачей является создание современной биогидрометаллургической технологии с высокой степенью извлечения металлов, отвечающей требованиям охраны окружающей среды.

Принципиальная технологическая схема с применением двухстадийного бактериально-химического выщелачивания



Заключение

Разработкой процессов микробиологического выщелачивания занимаются более 100 фирм в 25 странах. Промышленные установки бактериального выщелачивания золотомышьяковых концентратов работают во многих странах (ЮАР, Австралия, Бразилия, Гана, США, Канада, Россия). Опыт эксплуатации этих установок показал высокую эффективность и экономичность процесса. По некоторым данным, капитальные затраты на бактериальное выщелачивание в 2 раза ниже по сравнению с обжигом и в 2,5 раза ниже по сравнению с автоклавным выщелачиванием. Извлечение золота по бактериальной технологии выше по сравнению с традиционными на 15-20%. Преимущество биотехнологического метода по сравнению с пирометаллургическими и автоклавными подтверждено интенсивным внедрением биогидрометаллургических технологий при получении золота из золотомышьякового сырья. В мировой практике работает более 15 промышленных предприятий.

Задача настоящего времени - создание конкурентоспособного, ресурсосберегающего и экологически чистого производства извлечения цветных металлов с применением бактериального выщелачивания. Международные компании Генкор (ЮАР), Лонро (Англия) и др. ведут активные разработки технологий для извлечения цветных металлов с применением бактериального выщелачивания. Однако пока ни за рубежом, ни в России промышленных установок чанового выщелачивания нет.