

## МИКРОБНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены основные факторы, определяющие развитие микробной деятельности в рудном теле богатых железистых руд Яковлевского месторождения КМА. Исследовано влияние увлажнения, загрязнения и дренажа на рост бактериальной массы в богатых железных рудах. Показана взаимосвязь между прочностью руд и величиной бактериальной массы. Экспериментально определены некоторые физиологические группы и виды микроорганизмов, в том числе микромицеты, а также их численность. Проанализирована активность воздействия биоценозов в условиях Яковлевского рудника на конструкционные материалы – металлы и бетоны.

The principal factors defining development of microbe activity into high grade iron of Jakovlevsky deposit (KMA) were considered. Influence of moisturing, contamination and draining on increasing of bacterial mass in high grade iron ores was investigated. The interrelation between ores shear strength and value of BM is shown. Some physiological groups and kinds of microorganisms, including fungi, and also their number are experimentally defined biocenosis activity influence in Jakovlevsky mine conditions on constructional materials (metals and concrete) was analyzed.

Богатые железные руды Яковлевского месторождения, залегающие на глубине свыше 600 м, представляют собой элювиальные образования, связанные с формированием палеозойской латеритной коры выветривания. Как известно, химическое выветривание различных пород и формирование месторождений в корах выветривания происходит при обязательном участии богатой микрофлоры, активная деятельность которой наблюдается и в настоящее время. Доказано, что недра Земли не являются стерильными: подземные воды, многие осадочные, а также пористые изверженные породы содержат микроорганизмы и их активность зависит от среды обитания. Бактерии, обнаруженные в породах, жидкая составляющая которых содержит такие питательные субстраты, как органические вещества, соединения азота, фосфора и серы, имеют наиболее высокую жизнедея-

тельность и лучшие адаптационные признаки при изменении условий их существования. Живые организмы на больших глубинах в толще обводненных пород рассматриваются как постоянно развивающиеся формы древней микрофлоры за счет автолитических ферментативных процессов, которые приводят к гидролитическому распаду сложных молекул, а также деструкции токсичных продуктов обмена [2].

Еще в 1943 г. член-кор. АН СССР А.Г.Вологдин описал железобактерии в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии. А.Ю.Розанов в 1999 г. идентифицировал фоссилизированные цианобактерии в протерозойских джеспилитах Курской магнитной аномалии. В настоящее время в пределах рудного тела Яковлевского месторождения существуют благоприятные факторы, способствующие развитию жизнедеятельности микроорганизмов (табл.1).

Факторы, способствующие развитию микрофлоры в БЖР рудной толщи Яковлевского месторождения

| Основные группы факторов, способствующие развитию микрофлоры | Основные показатели                 | Показатели и оптимальные их значения для развития микроорганизмов | Численные значения показателей в пределах Яковлевского рудника  | Тип микроорганизмов, характерный для заданных условий                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Физико-химические                                         | Температура                         | 20-35 °С                                                          | 24-27 °С                                                        | Мезофильные группы                                                                                                                                      |
|                                                              | Минерализация вод                   | 1000-10000 мг/л                                                   | 1500-8000 мг/л                                                  | Аэробная, факультативная и анаэробная микрофлора                                                                                                        |
|                                                              | pH                                  | 6,0-8,9                                                           | 7,0-8,63                                                        | Развитие нитрифицирующих и тионовых бактерий                                                                                                            |
|                                                              | Eh                                  | < 50 mV                                                           | < 50 mV                                                         | При pH > 7,0 в водах с повышенной минерализацией развиваются анаэробные микроорганизмы<br>Сульфатредуцирующие и другие анаэробные формы микроорганизмов |
| II. Наличие источников питания и энергии                     | Макрокомпоненты                     | C; H; O; N; S; P; Na; K; Ca; Mg                                   | C; H; O; N; S; P(min); Na(max); Ca(min)                         | Развитие гетеротрофных форм микроорганизмов                                                                                                             |
|                                                              | Микрокомпоненты<br>Наличие органики | Fe; Ni; Co; Cu; Mn; Zn                                            | Fe; Ni(min); Co(min) и др.<br>ХПК мгО <sub>2</sub> /л 14,3-35,6 |                                                                                                                                                         |
| III. Действие слабых магнитных полей [2]                     | Магнитная индукция                  | Меньше 0,1 мТл                                                    | 0,1-0,5 мТл                                                     | Развитие различных гетеротрофных форм микроорганизмов, в том числе обладающих магнитотаксисом                                                           |

Микробиологические исследования на Яковлевском руднике были начаты СПГИ в 2003 г. На первом этапе изучались численность и видовой состав микромицетов (микологические исследования) руд и определялась бактериальная масса по величине микробного белка в различных типах БЖР при изменении режима их увлажнения. Была проведена также сравнительная оценка влияния содержания бактериальной массы на прочность богатых руд.

По результатам посевов на питательные среды выявлено шесть видов микромицетов: *Penicillium adametzi*, *P. verrucosum* var. *cyclopium*, *P. lanosum*, *Paecilomyces inflatus*, *Scytalidium lignorum*, а также актиномицеты. В пробе руды доминировали четыре вида рода *Penicillium*, причем численность колоний данного рода была высокой. Выявленные виды считаются обитателями в различных водосодержащих породах и активными биодеструкторами природных и техногенных субстратов.

С целью определения содержания бактериальной массы (БМ) была использована методика М.Бредфорда по содержанию микробного белка, применяемая в практике биохимических исследований с конца 70-х годов XX в. [6]. Эта методика была адаптирована для оценки БМ в различных грунтах кафедрой грунтоведения и инженерной геологии совместно с лабораторией генной инженерии биологического факультета СПбГУ [4]. Величина бактериальной массы (БМ) определялась в пробах руд в водонасыщенном и воздушно-сухом состояниях, отобранных в подземных выработках:

| Тип руды. Место отбора                                              | Водонасыщенный образец | Воздушно-сухой образец |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| «Синька» на контакте с «красками». Орт № 1 вблизи забоя             | 104,2                  | 31,4                   |
| «Синька». Разведочный штрек 1, забой                                | 106,3                  | 18,3                   |
| «Синька». Разведочный штрек 2, буровая камера 26                    | 155,0                  | 86,0                   |
| «Краска» на контакте с «синьками». Дренажный орт, буровая камера 30 | 83,1                   | 35,0                   |

Состав и количественная оценка содержания микроорганизмов в пробах БЖР (гор.-425)\*

| Объект исследования | Состав микроорганизмов<br>(качественный анализ) | Количественная характеристика<br>содержания микроорганизмов, кл/г |
|---------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Руда без слизи      | Железобактерии                                  | 37700                                                             |
|                     | Магнитобактерии                                 | 17000                                                             |
|                     | Нитрифицирующие бактерии                        | 3200                                                              |
|                     | Клостридии                                      | 400                                                               |
| Руда со слизью      | Актиномицеты                                    | 70800                                                             |
|                     | Железобактерии                                  | 29200                                                             |
|                     | Нитрифицирующие бактерии                        | 18000                                                             |
|                     | Миксобактерии                                   | 14500                                                             |
|                     | Магнитобактерии                                 | 11300                                                             |
|                     | Клостридии                                      | 600                                                               |
|                     | Bacillus cereus                                 | 500                                                               |

\* Микробиологические исследования проводились в лаборатории Санкт-Петербургской Военно-медицинской академии под руководством доктора медицинских наук В.В.Мальшева.

Следует отметить, что метод М.Бредфорда дает заниженные результаты бактериальной массы. Изучение содержания БМ с использованием методов Хартри и Петерсона дали возможность утверждать, что реальное количество БМ в 2,0-2,5 раза выше. Как следует из анализа, наименьшие значения БМ характерны для «красок», в которых содержатся окисленные формы минералов железа, свидетельствующие об аэробных условиях их генерации. «Синьки» формировались в анаэробных условиях. Проведенные исследования показали, что в аэробных условиях величина БМ как правило ниже за счет относительно невысокой численности различных групп микроорганизмов при наличии кислорода.

На втором этапе в 2004 г. были продолжены микробиологические исследования проб БЖР, отобранных в точках наиболее активного проявления микробной деятельности, которая фиксировалась визуально в подземных выработках по количеству слизи, газогенерации и др. Помимо микромицетов определялись также некоторые физиологические группы, виды и роды бактерий и актиномицетов.

Этот этап исследований показал, что микробная деятельность характерна для всего рудного тела, однако меняется численность и видовой состав микроорганизмов.

В результате микологического анализа проб руды без слизи выявлено пять видов микромицетов, три из которых относятся к зигомицетам (группа муковых грибов). Кроме того, в пробе зарегистрировано по одному виду родов *Penicillium* и *Trichoderma*: *Absidia ramosa*; *Absidia glauca*; *Penicillium kojigenum*; *Rhizopus nigricans*; *Trichoderma koningii*.

В образце руды, содержащей слизи, отмечено четыре вида грибов на трех питательных средах (Чапек-Докса, КГА, среда Сабуто) и зафиксировано массовое развитие колоний бактерий. Микромицеты, выявленные в пробе руды со слизью: *Absidia ramosa*; *Absidia glauca*; *Penicillium camemberti*; *Trichoderma koningii*.

Определение содержания бактерий и актиномицетов на двух типах БЖР дали возможность выполнить сравнительную оценку (табл.2).

Наибольшее число микроорганизмов обнаружено в зоне, где отмечается выделение слизи, при этом доминируют актиномицеты – более 70 тыс. клеток в 1 г пробы.

В исследованных пробах присутствуют как аэробные, так и анаэробные формы. Необходимо отметить высокое содержание железобактерий и магнитобактерий. К наиболее известным среди железобактерий относится *Gallionella ferruginea*, которая спо-

способствует биологическому окислению  $Fe^{2+}$  в  $Fe^{3+}$  (при значениях pH, близких к нейтральным). Эти бактерии способны к обильному слизиобразованию. Направленное выделение слизи обеспечивает этим бактериям возможность ограниченного перемещения в рудной толще.

Магнитобактерии относятся к новому видовому составу микроорганизмов, которые в настоящее время усиленно изучаются российскими и зарубежными микробиологами. Они накапливают и/или образуют внутри клетки ферромагнетики, позволяющие бактериям двигаться в магнитном поле. Поскольку эти бактерии содержат металлы в окисленной форме, то они могут выступать в качестве буфера и снижать скорость окислительных процессов [1].

Миксобактерии относятся к довольно редкой группе «скользящих» бактерий, т.е. микроорганизмов, способных к активному передвижению. На твердых средах миксобактерии образуют плоские разрастающиеся колонии. Большинство миксобактерий способны растворять другие микроорганизмы с помощью экзоферментов. В аэробных условиях роды миксобактерий *Cytophaga* и *Sporocytophaga* способны разлагать целлюлозу, что следует учитывать при использовании деревянных конструкций в подземных выработках.

Клостридии (*Clostridium*), определенные в БЖР, относятся к семейству *Vacillaceae* и характеризуются высокой чувствительностью к кислороду. Их метаболизм отличается резко выраженным бродильным типом, в процессе которого происходит выделение  $H_2$  и  $CO_2$ . Повышение содержания  $CO_2$  в подземных водах приводит к росту их углекислой агрессивности по отношению к цементом. Клостридии способны расти только при нейтральной или щелочной реакции среды, которая характерна для подземных вод Яковлевского рудника. Клостридии могут использовать и сбраживать большое число природных органических соединений, в том числе целлюлозу, гемицеллюлозу, белки и др. [4, 5].

*Bacillus cereus* относится к аэробным спорообразующим бактериям, которые ши-

роко распространены в почвах и способны к разложению органических соединений, в том числе белков.

На третьем этапе в 2004 г. проводились исследования бактериальной массы по содержанию микробного белка в пробах БЖР, отобранных при проходке экспериментального штрека из осушенных пород, а также в рудах, где визуально отмечалась активная микробная деятельность по указанным признакам (слизеобразование, газогенерация).

Была оценена бактериальная масса двух типов руд, данные количественного изучения приведены ниже:

| Характеристика            | Воздушно-сухая | Увлажненная |
|---------------------------|----------------|-------------|
| Руда без слизи – «синька» | 34,5           | 167,6       |
| Руда со слизью:           |                |             |
| «синька»                  | –              | 165,4       |
| «краска»                  | –              | 105,0       |

Как и на первом этапе микробиологических исследований, отмечается существенное снижение БМ в воздушно-сухих образцах, дополнительное увлажнение приводит к активному росту бактериальной массы, прежде всего за счет увеличения продуктов метаболизма белковой природы при интенсификации деятельности микроорганизмов в процессе их роста влажности и получения питательных субстратов с водой.

На этом же этапе исследований было выполнено определение содержания БМ в рудах («синьках») по трассе экспериментального штрека:

| Номер образцов         | 1    | 2     | 3     |
|------------------------|------|-------|-------|
| Воздушно-сухой образец | 24,4 | 32,4  | 35,8  |
| Водонасыщенный образец | 82,8 | 117,3 | 110,0 |

*Примечание.* Образцы отобраны по длине штрека, равной 30 м.

Если сравнить результаты определения БМ в различных подземных выработках, то можно отметить почти полное совпадение значений этого показателя микробной пораженности руд. Невысокие значения БМ в воздушно-сухих рудах дают возможность сделать вывод о снижении влияния деятельности микроорганизмов на состояние и свойства руд, а также строительных материалов.

На четвертом этапе в 2005 г. было выполнено исследование пяти образцов БЖР, отобранных с гор.–370 м (два образца) и –425 м (три образца).

В результате микологического анализа выявлено 18 видов микромицетов. Доминирующим по числу видов, как и на ранее проведенных этапах, оказался род *Penicillium* – восемь видов. Из отдела *Zygomycota* отмечено пять видов, причем четыре из них относятся к роду *Mucor*. Три вида принадлежали к роду *Trichoderma*. Количество видов грибов в пробах оказалось различным. Важно отметить, что состав этих проб различался, что свидетельствует о влиянии различных условий в зонах местообитаний грибов (особенности влажности, поступления питательного субстрата и др.). На гор.–370 м в одной пробе доминировали виды родов *Mucor* и *Penicillium*, а в другой пробе преобладали виды *Trichoderma* и *Penicillium*.

Одна из проб, отобранная на гор. –425 м, содержала восемь видов микромицетов и имела высокое сходство по составу грибов с пробой, отобранной с гор.–370 м. Можно предположить, что видовой состав грибов по глубине от отметки –370 м до –425 м в целом постоянен. Однако следует отметить некоторые особенности распределения численности микромицетов на различных горизонтах месторождения. Численность колониеобразующих единиц (КОЕ) на 1 г субстрата на гор.–370 м составляет 1250 в двух пробах, а на гор.–425 м в трех пробах – 1200 КОЕ. Аналогичные выводы можно сделать и по видовому составу: одинаковое количество видов грибов (15) для двух проб с гор.–370 м и трех проб – на гор.–425 м. На основании такой сравнительной оценки можно сделать первый осторожный вывод о том, что БЖР на более высоких горизонтах (–370 м) характеризуются большей микробной пораженностью, чем на глубоких горизонтах. Такое различие может быть объяснено влиянием переноса микроорганизмов из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в рудную толщу.

В целом полученные данные свидетельствуют о том, что в условиях подземного пространства формирование сообществ

микромицетов протекает под влиянием специфических экологических условий и особенностей субстрата. Состав группировок грибов в образцах руды и слизи существенно отличается от микробиоты, развивающейся на строительных материалах. Результаты микологического анализа проб БЖР указывают на довольно высокую насыщенность микробного сообщества и его специфичность для данного субстрата.

На пятом этапе в 2005 г. были исследованы образцы руды («синька» и «краска») со слизью. В результате микологического анализа образца материала выявлено 16 видов микромицетов, при этом доминирующим по числу видов оказался род *Penicillium*.

Количество видов в пробах оказалось различным. Важно отметить, что состав проб различался, однако явным преобладанием характеризовался *Pen. verrucosum* var. *cyclospium* (во всех пробах). В большинстве проб выявлены *Pen. ochraceum*, *Trichoderma koningii*, а также *Doratomyces stemonitis* и др. Оба доминирующих вида *Penicillium* и *Trichoderma koningii* известны как биодеструкторы и встречаются в дисперсных породах. Из исследованных 16 видов семь относятся к активным биодеструкторам материалов и изделий, восемь – биодеструкторы пониженной активности, для двух видов деструктивные свойства мало изучены и девять видов относятся к условным (потенциальным) патогенам.

На пятом этапе также были продолжены исследования содержания бактериальной массы, которые дали возможность еще раз убедиться в том, что «синьки» имеют более высокие величины БМ, чем «краски». Как уже указывалось ранее, такая разница объясняется различными условиями формирования «синек» и «красок». Содержание бактериальной массы в различных типах БЖР (2005 г.) показано ниже:

| Место отбора пробы | Тип БЖР            | Содержание БМ, мкг/г |
|--------------------|--------------------|----------------------|
| Орт. 1             | «Синька» со слизью | 108,0                |
| Орт. 2             | «Синька» со слизью | 103,0                |
| Орт. 2             | «Краска»           | 95,8                 |
| Орт. 2             | «Краска»           | 81,3                 |

Примечание. Определения бактериальной массы проводились по методу Бредфорда.

Бактериологический анализ образцов продемонстрировал доминирование по численности хемолитотрофных бактерий (нитрифицирующих и тионовых). Численность клеток нитрифицирующих бактерий в двух пробах превысила 30000 на 1 г образца. Кроме перечисленных групп микроорганизмов, в пробах также зарегистрированы железобактерии, клостридии, *Bacillus cereus*, магнитные бактерии и актиномицеты.\*

Развитие микроорганизмов приводит к существенному изменению дисперсного состояния пород и руд в сторону возрастания содержания тонкодисперсной фракции диаметром меньше 2μ. Микроорганизмы обычно располагаются на поверхности минеральных частиц, омываемых поровым раствором, а также внутри агрегатов частиц, являясь одним из компонентов их структуры. По данным различных исследователей установлено, что в поровых растворах содержится от 0,1 до 10 % всех микроорганизмов, в то время как остальная часть адсорбирована поверхностью минеральных зерен. По результатам исследований Д.М.Звягинцева вокруг частицы образуется «слой» из многочисленных бактериальных клеток. Толщина такого слоя составляет 0,1-0,5μ.

Формирующиеся бактериальные пленки обволакивают дисперсные частицы, снижая угол внутреннего трения, что подтвердилось результатами исследований.

Показатели сопротивления сдвигу БЖР ненарушенного сложения в зависимости от их микробной пораженности показаны ниже:

|                               |                                |                             |                              |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Сцепление, МПа                | 0,53                           | 0,25-0,8                    | 0,22                         |
| Угол внутреннего трения, град | 8                              | 23                          | < 8                          |
| Место отбора образцов         | Транспортный орг               | Экспериментальная выработка | Экспериментальная выработка  |
| Бактериальная масса, мкг/г    | 71,0-123,1<br>95               | 33,2-35,0<br>34,1           | 90-110,2<br>98               |
| Степень влажности             | Образцы естественной влажности | Осушенные образцы           | Вторично увлажненные образцы |

*Примечание.* В числителе показатели от минимального до максимального, в знаменателе — средние.

\* Бактериологический анализ был выполнен в Санкт-Петербургском государственном научно-исследовательском институте им.Пастера.

Угол внутреннего трения увлажненной руды при содержании БМ > 100 мкг/г в 3-4 раза меньше, чем у руды в воздушно-сухом состоянии.

При разуплотнении руд, что возможно при развитии фронта очистных работ и деформациях кровли выработок, при динамических воздействиях, дополнительном увлажнении рыхлые руды с низким трением и невысоким сцеплением способны переходить в плавунное состояние. Поведение таких руд будет соответствовать признакам «истинных плавунув», для перехода которых в подвижное состояние не требуется наличие остаточных напоров.

Известно, что микробиологическая деятельность в средах, бедных кислородом, может сопровождаться образованием биохимических газов, генерируемых бактериями различных физиологических групп (сульфатредуцирующими, водородобразующими, денитрифицирующими и др.) в процессе метаболизации органических субстратов. Все эти бактерии относятся к гетеротрофным формам, т.е. для их жизнедеятельности необходимы органические вещества, служащие источником энергии и углерода для построения клеток. Представленные в основном строго анаэробными формами (за исключением факультативных денитрифицирующих бактерий), они развиваются в восстановительных, либо микроаэрофильных условиях.

Даже незначительное накопление малорастворимых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) в рудах и соответственно повышение газонасыщения последних вызывает значительное изменение их напряженно-деформированного состояния. Защемленные в порах мельчайшие пузырьки газа с высокой величиной поверхностного натяжения и большим внутренним давлением способствуют значительному разуплотнению руд и снижению их прочности. В таких условиях существенно возрастает плавунность водонасыщенных руд, которая может проявляться даже при незначительных динамических и вибрационных воздействиях. Газонасыщение БЖР приводит к снижению угла внутреннего трения вплоть до их перехода в состояние тяжелой жидко-

сти. Существование макропористых БЖР в условиях их естественного залегания, по всей видимости, обязано газогенерации в период их формирования.

Биохимическая генерация растворимых в воде газов – углекислого газа и сероводорода – способствует повышению агрессивности подземных вод по отношению к строительным материалам и конструкциям, причем активизация этого процесса предопределяет усиление особого вида коррозии – биокоррозии, которая в большинстве случаев способствует другим видам коррозионного повреждения материалов и усиливает их.

Природные биоценозы способны значительно активизировать свою деятельность при техногенном воздействии, в частности, дополнительном внесении нефтяных углеводородов (нефтепродуктов) в подземные воды.

На основе специальных наблюдений и исследований, проведенных во многих странах мира, установлено, что бактерии могут использовать практически все виды органического вещества – от  $C_1$  до полимеров. Наиболее легко усваиваемыми являются органические соединения, содержащие частично окисленные атомы углерода ( $-CHON$ ,  $-CH_2OH$ ,  $-CON$ ). Известно, что микроорганизмы относительно легко утилизируют керосины и особенно соляровые масла, труднее – легкокипящие углеводороды, содержащие алканы с длиной цепи до  $C_8$ . Таким образом, поступление дополнительного питательного и энергетического субстрата за счет привноса в подземные воды и руды нефтяных углеводородов, в первую очередь, солярового масла в сочетании с другими факторами будет способствовать активизации микробной деятельности. Кроме того, в самих нефтепродуктах всегда содержатся разнообразные формы микроорганизмов, которые будут увеличивать общую численность и видовой состав микробиоты в рудном пласте. Небольшая добавка солярового масла в обводненные руды приводит к повышению содержания бактериальной массы во времени:

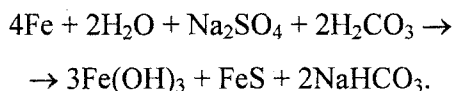
|                    |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Величина БМ, мкг/г | 70  | 85  | 110 | 130 | 145 | 155 | 170 |
| Время, мес.        | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |

Рост бактериальной массы происходит за счет активизации деятельности гетеротрофных бактерий, которые получают дополнительное питание в форме легко утилизируемого солярового масла. Таким образом, при работе механизмов и загрязнении рудного тела нефтяными углеводородами возможна активизация микробной деятельности, которая будет способствовать снижению прочности руд и повышению агрессивности подземной среды по отношению к строительным материалам.

В коррозионных процессах могут принимать участие микроорганизмы, относящиеся к различным родам и видам: бактерии, образующие азотную и серную кислоты, окисляющие метан, железобактерии, сульфатредуцирующие бактерии, микромицеты, микроводоросли и др. В большинстве случаев такие микроорганизмы создают агрессивные среды, в которых ускоряются коррозионные процессы. В зависимости от степени аэрации и насыщенности среды биокислородом коррозия бывает анаэробной и аэробной.

*Анаэробная микробная коррозия.* В средах, лишенных кислорода, железо обычно корродирует незначительно, однако в некоторых случаях скорость коррозии железа аномально высока. В плохо аэрированных водонасыщенных рудах и подземных водах, содержащих сульфаты, формируется возможность для развития сульфатредуцирующих бактерий. Сульфатредуцирующие бактерии играют особую роль в процессе разрушения черных металлов. Проведенные наблюдения свидетельствуют о том, что их разрушение возможно при средних температурах (20–30 °C) в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий. Сульфатредуцирующие бактерии легко восстанавливают неорганические сульфаты до сульфидов в присутствии водорода и органических веществ. На поверхности железа этот процесс интенсифицируется, так как железо, подвергнувшееся электрохимической коррозии, является источником водорода, который бактерии используют для восстановления  $SO_4^{2-}$ . Процесс образования сульфидов при участии сульфатредуцирующих

бактерий на поверхности металлов может быть дан в виде уравнения:



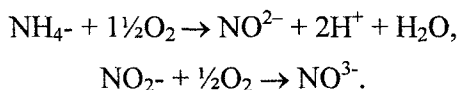
Сульфатредуцирующие бактерии активируют процесс соединения кислорода сульфатов с водородом на поверхности металла ( $\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$ ), что способствует образованию сероводорода, который вступает во взаимодействие с железом с последующей генерацией сернистого железа  $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (гидротроилита) в виде темно-серого или черного порошка.

*Аэробная коррозия.* Этот вид коррозии наблюдается в тех случаях, когда имеется достаточное количество свободного или растворенного в воде кислорода. Возбудителями аэробной коррозии могут быть тионовые бактерии, железобактерии, нитрифицирующие бактерии, продуцирующие коррозионные метаболиты – минеральные или органические кислоты. Все вышеперечисленные группы бактерий обнаружены в БЖР.

Тионовые бактерии играют основную роль в окислении сульфидов до серной кислоты ( $\text{HS}^- + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$ ), которая в свою очередь становится электролитом на поверхности металла. При этом возникают блуждающие токи, активирующие процессы электрокоррозии металлов с последующим окислением закисного железа до окисного.

Тионовые бактерии развиваются при низких значениях pH, но могут продолжать свою деятельность и в щелочных условиях.

Влияние нитрифицирующих бактерий на металлические конструкции обусловлено продуцированием ими в процессе метаболизма азотной кислоты:



В процессе коррозии металла принимают участие железобактерии различных видов, которые развиваются и поселяются на стенках увлажненных железных конструкций и образуют слизистые скопления.

Благодаря волокнистой структуре оболочек железобактерий такие скопления обладают высокой механической прочностью. Благодаря росту железобактерий на поверхности металла создаются дифференцированно аэрируемые ячейки, в которых вентилируемые участки имеют более высокий потенциал и функционируют как катод; менее аэрируемые участки действуют как анод, в результате начинается процесс электрокоррозии и образование гидрооксида железа. Излишек ионов водорода, образующийся при коррозии железа на его поверхности, вызывает подкисление среды до pH = 5-6. Образовавшаяся среда, содержащая ионы  $\text{Fe}^{2+}$ , кислород, двуокись углерода, аммонийные соли или нитраты, является оптимальной средой для развития железобактерий. В образовавшейся кислой среде увеличивается электропроводность, что приводит к ускорению процессов коррозии. В результате на поверхности металлической конструкции образуются пористые налеты или каверны темно-коричневого или желтого цвета, иногда значительных размеров, которые состоят из железобактерий, окруженных оболочками и типичными нитевидными волокнами гидрата окиси железа.

Таким образом, микробиологическая коррозия металлов представляет собой результат действия катодной деполяризации в комбинации с коррозионным действием продуктов микробного метаболизма. Образование пористых «корок» на стальных трубах нередко обнаруживается в подземных выработках рудника.

Исследование разрушенного материала стальных труб (гор.-425 м) показало наличие в пробах нитрифицирующих, тионовых, сульфатредуцирующих и железобактерий, обладающих высокой деструктивной активностью в отношении различных материалов.

По результатам микологического анализа выявлено высокое содержание в пробе коррозионного металла микромицетов, обладающих деструктивными свойствами. Всего идентифицировано десять видов грибов, причем пять из них из рода *Aspergillus*, два рода *Penicillium*, а также *Acremonium curvulum*, *Paecilomyces viridis* и *Trichoderma aureoviride*.

Практически каждый фрагмент коррозионного металла (размером всего несколько мм) содержал споры грибов, дающие начало развитию колоний на питательной среде. Все выявленные виды обладают высокой деструктивной активностью в отношении различных материалов.

**Коррозия бетона.** Среди компонентов бетона цементный камень наиболее подвержен развитию коррозионных процессов. Важная роль в процессе бактериальной коррозии бетонов принадлежит тионовым, нитрифицирующим бактериям, аммонифицирующим и денитрифицирующим, а также микромицетам. Разрушение цементного бетона происходит в результате использования отдельными микроорганизмами органических веществ, находящихся на поверхности пористых материалов (например, загрязнения) или таких неорганических субстратов, как  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , поступающих из подземных вод.

Механизм микробной коррозии бетонов объясняется образованием легкорастворимых солей кальция при взаимодействии гидроксида кальция цементного камня бетона с органическими и минеральными кислотами, что согласуется с современной теорией коррозионного разрушения бетона. Различные микроорганизмы, развивающиеся на поверхности кальциевого слоя, разрушают его тем быстрее, чем они больше образуют кислот и тем сильнее изменяют pH водного слоя, прилегающего к слою из кальцита. Нарушение целостности защитной пленки уже не препятствует проникновению воды внутрь бетонного блока, увеличивая его объем и способствуя появлению трещин. В зонах коррозии бетона наблюдается возрастание содержания сульфатов, потерь при прокаливании, а также уменьшение нерастворимого остатка и снижение содержания кремнезема в растворимой части бетона более чем в два раза. Содержание кальция в зонах коррозии практически не изменяется, что объясняется образованием кальцита.

В бетоне на различных стадиях его коррозии в наибольших количествах обнаруживаются гетеротрофные бактерии, которые используют органические вещества, со-

держась в самом бетоне (лигносульфонаты). В процессе образования гетеротрофными микроорганизмами простых органических веществ и снижения pH начинают свою деятельность сульфатредуцирующие бактерии, которые образуют  $\text{H}_2\text{S}$ . Далее сероводород окисляется тионовыми бактериями до образования сульфатов  $\text{SO}_4^{2-}$ , которые принимают участие в образовании гидросульфатоалюмината кальция, ускоряя тем самым разрушение бетона. Тионовые бактерии при слабощелочной реакции способны разрушать силоксанную связь Si-O-Si и выщелачивать кремний.

В частично разрушенных зонах бетона в значительных количествах появляются нитрифицирующие бактерии. В коррозии бетонных конструкций принимает участие сообщество аэробных и анаэробных бактерий, и образуемые ими органические и минеральные кислоты служат основными агентами коррозии бетона.

Особо следует отметить магнитные бактерии, которые обнаруживаются спорадически в отдельных пробах БЖР. Метаболизм этих бактерий в настоящее время изучен весьма слабо. Российские микробиологи изучают искусственно выведенные штаммы этих микроорганизмов с целью их использования в медицине и при решении экологических проблем (санация свалок). Главный вопрос, требующий решения, используют ли магнитобактерии железо и другие металлы в своей жизнедеятельности. Исследования показали, что обычный стальной предмет, вводимый в среду, где обитают магнитные бактерии, приводит к направленному движению этих микроорганизмов в сторону металлического объекта и росту их численности в пределах объекта. Такое движение известно в микробиологии как магнитотаксис.

Магнитные бактерии окисляют органические вещества и способны к восстановлению нитратов. Наличие металлических конструкций в толще БЖР будет приводить к накоплению этих бактерий на поверхности, что, безусловно, будет снижать сцепление металла с рудой и показатели трения. Следует отметить, что такие процессы будут протекать только в водонасыщенной либо

увлажненной среде. В полностью осушенных рудах, как уже было показано ранее, деятельность микроорганизмов подавлена, и их передвижение в сухих БЖР полностью прекращается. Для того, чтобы выяснить их роль в возможном разрушении конструкций, необходимо проведение специальных микробиологических исследований, ориентированных на особенности метаболизма микробного ценоза в целом и магнитных бактерий в частности.

О биологической активности БЖР свидетельствуют опыты по поражению ткани, в которой в течение десяти дней хранились свежие пробы БЖР, имеющие естественную влажность. Еще в 60-х годах прошлого века был предложен тест для оценки биологической активности почв и влажных дисперсных грунтов по скорости разрушения ткани (холста или батиста). Считается, что если признаки разрушения ткани отмечаются через месяц ее взаимодействия с грунтом, то такой грунт должен рассматриваться как коррозионно-активный с точки зрения воздействия микробиоты.

В нашем случае изучался холст, который имел все признаки сильнейшего биологического поражения после десятидневного контакта с рудой.

В результате микологического анализа образца материала выявлено семь видов микромицетов: *Aspergillus nidulans*, *Doratomyces stemonitis*, *Fusarium oxysporum*, *Mucor plumbens*, *Phialophora fastigiata*, *Penicillium verrucosum* var. *cyclopium*, *Sporotrichum pruinosum*.

Полученные данные свидетельствуют о развитии довольно сложного по составу микробного сообщества на исследуемом ма-

териале. Большинство видов считаются обитателями почвы и активными биодеструкторами различных материалов.

Результаты микологического анализа свидетельствуют о значительном разнообразии и своеобразной структуре выявленного микробного сообщества. Высокая численность (около 10000 клеток на 1 г материала) и довольно богатый видовой состав указывают на наличие благоприятных условий для развития микромицетов. Среди выявленных видов отмечены активные биодеструкторы, обитатели дисперсных грунтов и древесины.

Необходимо продолжить исследования влияния микробной деятельности на свойства БЖР и строительных материалов. Кроме того, следует организовать мониторинг в подземных выработках за характером разрушения материала крепей с целью предупреждения аварийных ситуаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. М.: МИЛТА, 2002.
2. Дашко Р.Э. Микробиота в геологической среде: ее роль и последствия / Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2000.
3. Нишарадзе Н.Т. Количественный учет влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-механические свойства оглеенных грунтов: Методическое руководство / Н.Т.Нишарадзе, Е.А.Пушнова, В.М.Кнатко и др. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
4. Современная микробиология. Прокариоты. Под ред. Й.Ленгелера, Г.Древса, Г.Шлегеля. М.: Мир, 2005.
5. Шлегель Г.Г. Общая микробиология. М.: Мир, 1987.
6. Bradford M.M. A Rapid and sensitive method for the Quantitation of microgram Quantities of Protein Utilising the Principle of Protein – dye Binding. Anal. Biochem. 1976. Vol.72. № 1-2.