

## БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Бельий А.В.<sup>1</sup>, Алгебраистова Н.К.<sup>2</sup>, Трубников Ю.Н.<sup>3</sup>, Ананенко Е.С.<sup>2</sup>,  
Прокопьев И.В.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Центр Стратегических Разработок –ЦСР «Северо-Запад»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ИЦМ, Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

<sup>4</sup>Горный институт, Северо-Восточный Федеральный Университет, г. Якутск, Россия  
[belyiav52@gmail.com](mailto:belyiav52@gmail.com)

Биотехнологии становятся более значимыми в решении разных технологических задач. Биотехнологии применяются повсеместно, начиная от медицины и фармацевтики и заканчивая нефтяной промышленностью. В ближайшем будущем сфера применения биотехнологий будет расширяться, тем самым создавая условия для перестройки целых отраслей, в том числе и в секторе горной металлургии.

Красноярский край богат запасами металлических полезных ископаемых и энергетических ресурсов. Согласно последним аналитическим данным на территории Красноярского края, в общероссийском масштабе, производится более 70 % никеля, около 40 % меди, более 35 % алюминия, более 20 % золота, более 90 % металлов платиновой группы. За рост объемов и производственных показателей края в металлургическом секторе несут ответственность крупнейшие предприятия, такие как, Норильский Никель, Полюс Красноярск, Красноярский алюминиевый завод, Ачинский глинозёмный комбинат, Горевский горно-обогащительный комбинат.

В последние годы в отрасли добычи полезных ископаемых отмечается истоще-

ние богатых золотосодержащих запасов, а именно россыпных месторождений золота и легкоперерабатываемых окисленных руд. В связи с чем возникает стратегическая необходимость вовлечения в переработку бедных коренных золотосодержащих руд, запасы которых составляют 50-60 % от разведанных запасов золота. В этих условиях вовлечение в промышленную эксплуатацию месторождений упорных золотомышьяковых руд является одной из актуальных проблем в золотодобывающей промышленности.

Технологическая упорность золотосодержащих руд определяется наличием тонковкрапленного золота в сульфидах и присутствием вредных примесей (мышьяк, сурьма, органический углерод). Эти особенности вещественного состава снижают эффективность использования традиционной технологии переработки золотосодержащих концентратов – цианирования. В связи с чем, концентраты, получаемые из технологически упорных золотосодержащих руд, требуют применения специальных методов переработки: обжиг, автоклавное и бактериальное окисление с последующим извлечением вскрытого золота цианированием.

Известно, что в мировой практике переработки упорных золотосодержащих концентратов применяются три: обжиг, автоклавное окисление и биовскрытие. Однако в условиях обострения экологической ситуации во всем мире при разработке и выборе новых эффективных технологических процессов извлечения золота из упорного сырья специалисты отдают предпочтение биогидрометаллургическим методам. Согласно прогнозам, доход мирового рынка биодобычи к 2027 г. составит около 3,6 млрд долл. при среднегодовом темпе роста более 13,2%. Главным преимуществом применения биотехнологий для добычи металлических полезных ископаемых является повышение уровня их извлечения до 90%.

Опыт золотодобывающей компании «Полус Красноярск» является образцовым примером успешного внедрения биотехнологии в горнодобывающую промышленность. Компания стала лидером в биогидрометаллургии не только в России, но и зарубежом, благодаря применению разработанной и постоянно совершенствующейся технологии BIONORD® [1, 2, 3]. Специалисты компании, помимо технологии биовскрытия золота, разработали технологию биодеградациии роданидов и цианидов в промышленных стоках золотоизвлекательных фабрик, а также технологию улучшения качества биокека, позволяющую снизить расход реагентов и увеличить извлечение золота. Опыт компании по внедрению и использованию биотехнологий в металлургии золота может легко тиражироваться на аналогичные месторождения России и мира. Помимо этого, наработанное аппаратурное оформление процесса, опыт в выделении и адаптации микроорганизмов

может эффективно использоваться и в других перспективных научно-технологических разработках на месторождениях Красноярского края, в частности, Порожинского месторождения марганцевых руд, Сейбинского и Телекского месторождений фосфорных руд, Горевского месторождения свинцово-цинковых руд, Сорского месторождения медно-молибденовых руд [4].

Внедрение и развитие биотехнологий в горном деле позволит также решить проблему эксплуатации хвостохранилищ и отвалов, занимающих значительные по площади территории и выступающих в качестве одного из ключевых факторов образования нарушенных земель. В настоящее время площадь земель данного типа в Красноярском крае составляет 17,4 тыс. га, восстановление которых является важной задачей, стоящей перед краем и компаниями, действующими на его территории, в рамках ESG-повестки в целом и регионального проекта «Чистая страна» в частности. В данном контексте биотехнологии могут быть успешно использованы в двух направлениях: для извлечения остатков полезных элементов из хвостов и отвалов, а также для непосредственной рекультивации загрязненных территорий и восстановления нарушенных земель. Кроме того, что биотехнологии имеют неоспоримое преимущество в рамках экологической тематики (минимальное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека), они обеспечивают меньшие операционные расходы за счет простоты аппаратурного оформления, по сравнению с альтернативными технологиями.

Несмотря на многочисленные преимущества биотехнологий, в настоящий момент они занимают крайне ма-

лую долю рынка по двум взаимосвязанным причинам: ввиду отсутствия мотивированного исследовательского интереса и относительно высокой стоимости вложений в технологические разработки. Между тем, потребность в развитии отечественных технологий на фоне ограниченного доступа к иностранным и постепенное истощение богатых руд требуют разработки и внедрения принципиально новых технологических решений в горной биохимии с их последующим трансфером в промышленность. Для преодоления данного вызова необходимо обеспечить разработку собственных биотехнологических решений с последующим масштабированием по вышеперечисленным направлениям для добычи металлов из упорных руд, хвостохранилищ и отвалов, а также для рекультивации загрязненных территорий в условиях Крайнего Севера.

Выбрано несколько перспективных научно-технических направлений развития биотехнологий в добывающем секторе Красноярского края:

### **I. Биотехнологии для горно-металлургической промышленности**

1. Биовыщелачивание цветных и благородных металлов из руд, концентратов и отвалов (месторождения Олимпиадинское, Раздолинское рудного узла, Ведугинское).
2. Селективное разделение полиметаллических руд и концентратов (Горевское месторождение).
3. Подготовка коллективных концентратов к циклу селекции посредством деградации плёнок ПАВ.
4. Повышение качества концентратов (обесцинкование свинцовых кон-

центратов, обессвинцевание цинковых концентратов, обезмеднение молибденовых концентратов).

5. Повышение качества марганцевых концентратов и руд (Порожинское и Усинское месторождение).
6. Повышение качества фосфорных концентратов из фосфоритов Сейбинского и Телекское месторождений.
7. Биосорбция и концентрирование металлов из сточных вод предприятий горнодобывающей промышленности.

### **II. Биотехнологии для угольной и нефтегазовой промышленности**

1. Десульфуризация каменного угля.
2. Биопереработка бурых углей.
3. Извлечение редкоземельных элементов из угольной золы.
4. Извлечение редкоземельных элементов из отвалов Ачинского глиноземного завода.
5. Снижение содержания метана в угольных шахтах.
6. Повышение нефтеотдачи пластов.

### **III. Биотехнологии для экологии**

1. Биоочистка промышленных стоков.
2. Биоочистка газовых выбросов.
3. Ликвидация разливов топлива и нефти.
4. Био и фито регенерация хвостохранилищ и рудных отвалов.

### **IV. Исследование разнообразия микроорганизмов на горно-обогачительных комбинатах с целью выявления их свойств и использования в горной биотехнологии**

## **V. Разработки и синтез флотационных реагентов на основе продуктов обмена веществ микроорганизмов**

Развитие вышеперечисленных исследовательских направлений и кадровых компетенций в этой области является актуальной задачей в контексте повышения эффективности производства и охраны окружающей среды российской добывающей отрасли. С внедрением биотехнологий в деятельность горнодобывающей промышленности могут быть решены проблемы селективного разделения золотосурьмяных и свинцово-цинковых коллективных концентратов, а также повышения концентрации доступного фосфора в фосфоритах местных месторождений, что повысит технологические показатели обогащения и позволит минимизировать последствия их взаимного негативного влияния на экологию края. Крупнейшие компании Красноярского края в секторе горнодобывающей промышленности, такие как «Полус», «Норильский Никель», «Новоангарский ГОК», Сорский молибденовый комбинат, Васильевский рудник, Ачинский глиноземный комбинат, а также Ванкорнефть, СУЭК и др. являются потенциальными заказчиками и потребителями разработок в промышленной биотехнологии.

Создание национального центра биоресурсов для решения проблем горнодобывающей промышленности Красноярского края позволит региону выйти на позиции национального лидера в области исследований биогеохимии в целом и решения проблем переработки упорных золотосодержащих руд, в частности. Трансфер биотехнологий в промышленность повысит рентабельность региональной ресурсной базы, расширит производства и создаст новые ра-

бочие места (от 100 новых рабочих мест для обслуживания одной производственной линии по переработке отходов). С учетом количества предприятий, занятых в добыче полезных ископаемых Красноярского края, может быть создано несколько тысяч рабочих мест для биотехнологов и гибридных специалистов, которые сочетают инженерно-технологические компетенции с навыками в области биотехнологий. Успешное внедрение новых технологических решений в сфере горной металлургии также обеспечит выполнение задач по выходу на безотходное производство, что позволит решить проблему с промышленными отходами и нарушенными территориями и создаст условия для достижения целевых показателей по региональным экологическим проектам, подобным проекту «Чистая страна».

В вузах и институтах Красноярского Края (ИЦМ, КНЦ СО РАН) уже сейчас имеется хороший научный задел по вышеперечисленным направлениям.

Специалисты Института биофизики СО РАН выяснили, что бактериально-химическое выщелачивание марганцевых руд позволяет экономить серную кислоту на 21,4-25%, увеличить извлечение Mn на 22,8-35,7% и сократить время процесса [4]. Таким образом, с внедрением биотехнологических процессов в схему переработки марганцевых руд, содержащих попутные ценные компоненты, можно снизить себестоимость процесса за счет комплексного подхода к перерабатываемому сырью.

Также группа ученых Института биофизики СО РАН получила адаптированный к выщелачиванию Мо-хвостов штамм *T. Ferrooxidans*, с помощью которого производится окисление сульфидов, входящих в состав молибденсодержащего сырья (за 120 ч окисления

удаляется более 60% примесей сульфидных минералов, в основном пирита). За счет окисления концентрация молибдена в кеке бактериального выщелачивания увеличивается более чем в 3 раза, что значительно облегчает и ускоряет последующее получение молибдена [5].

Помимо этого, выполнены исследования по биохимическому обессериванию энергетических и коксующихся углей, а также горючих сланцев с целью предотвращения загрязнения окружающей среды окислами серы и уменьшения содержания серы в выплавляемом чугуна. В эксперименте использовались угли и сланцы с содержанием пиритной серы 3,0-1,8% и культура бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*. По результатам исследования отмечено, что тионовые бактерии способны извлечь от 70 до 90% пиритной серы за 20 часов по схеме двухстадийного бактериально-химического метода обессеривания углей [6, 7].

Также специалистами получен биокоагулянт на основе трехвалентного железа, который по своим свойствам превосходит химически-синтезированный аналог: при одинаковой скорости осаждения примесей в хозяйственно-бытовых и промышленных стоках расход биокоагулянта в 3 раза меньше химического аналога.

Кроме этого, исследован механизм воздействия бактерий на коллективный медно-цинковый концентрат и показана возможность селективного извлечения цинка и меди. Высокая скорость бактериально-химического выщелачивания медно-цинкового концентрата достигается запуском одновременно с прямым механизмом воздействия клеток на твердую фазу сульфидов, косвенного, осуществляемого свободными клетками. С этой целью, в пусковой период процесса, в реактор вводят 3,4-3,8 г/л сырой био-

массы железобактерий, которая адсорбируется на поверхности сульфидных частиц концентрата и ускоряет прямой механизм. Дополнительное внесение железа в концентрации 5 г/л и биомассы в концентрации 2 г/л резко инициирует косвенный механизм окисления [9].

Научный коллектив кафедры ОПИ ИЦМ в своих исследованиях показал, что использование микробиологических приемов для удаления коллекторных плёнок с поверхности сульфидов является одним из обещающих и определенно революционных направлений. Биодegradация обеспечивает высокую эффективность разделения коллективных концентратов за счет предварительного удаления с поверхности минералов большей части собирателя, а также обещает резкое снижение капитальных затрат и снижение выбросов.

Для десорбции ксантогената с поверхности сульфидов коллективного концентрата предлагается применять бактериальную культуру *Pseudomonas japonica*, а для снижения остаточных концентраций дизельного топлива - консорциум микроорганизмов *Ochrobactrum anthropi* и *Pseudomonas aeruginosa* JCM 5962 [11, 12]. В исследованиях показано, что культура бактерий *Pseudomonas japonica* снижает концентрацию ксантогената на поверхности минералов, что приводит к их гидрофилизации, а бактерии *Ochrobactrum anthropi* и *Pseudomonas aeruginosa* JCM 5962 продуцируют биосурфактанты, которые способствуют сольubilизации и поглощению углеводородов дизельного топлива.

Специалисты лаборатории Космических систем и технологий КНЦ СО РАН разрабатывают технологию получения фосфорных удобрений из фосфоритов месторождений Красноярского края

(Сейбинское, Обладжанское, Телекское) с помощью биотехнологий. Вследствие невысокого содержания в местных фосфоритах пятиоксида фосфора, полученная на их основе фосфоритная мука эффективна только в ограниченном диапазоне почвенно-агрохимических условий [13], поэтому использование местных фосфоритов в качестве удобрений предусматривает обязательное обогащение. Микробные технологии, кроме повышения доступного растениям фосфора, позволяют снижать количество сопутствующих вредных элементов - урана, стронция, кадмия и др. [14-15].

Трансфер биотехнологий в промышленность повысит рентабельность региональной ресурсной базы всей Енисейской Сибири, увеличивая тем самым доходности горнодобывающих предприятий и стимулируя рост инвестиций в социальные и инфраструктурные проекты не только Красноярского края, но и восточных регионов России.

### **Выводы**

1. Обозначены основные направления биотехнологического потенциала в Красноярском крае: биотехнологии для горно-металлургической промышленности, биотехнологии для угольной и нефтегазовой промышленности, экологические биотехнологии, исследование разнообразия микроорганизмов на горно-обогажительных комбинатах с целью выявления их свойств и использования в горной биотехнологии, разработки и синтез флотационных реагентов на основе продуктов обмена веществ микроорганизмов.
2. В Красноярском крае имеется богатый опыт по биогидрометаллургии золота, который можно легко тиражировать на аналогичные месторождения как в России, так и за рубежом.
3. Разработанные технологии и аппаратура биогидрометаллургического производства, опыт в выделении и адаптации микроорганизмов может быть использован и в других перспективных научно-технологических биоразработках на месторождениях полиметаллических, марганцевых, фосфоритоносных руд Красноярского края.
4. Развитие биотехнологий для угольной и нефтегазовой промышленности Красноярского края позволит решить проблемы десульфуризации каменного угля, биопереработки бурых углей, извлечения редкоземельных элементов из угольной золы, извлечения редкоземельных элементов из отвалов Ачинского глиноземного комбината, снижения содержания метана в угольных шахтах, повышения нефтеотдачи пластов.
5. С помощью биотехнологий возможно решение ряда проблем загрязнения окружающей среды: биоочистка промышленных стоков и газовых выбросов, ликвидация разливов топлива и нефти, био и фито регенерация хвостохранилищ и рудных отвалов.
6. Необходимо усилить исследования по определению видового разнообразия микроорганизмов на горно-обогажительных комбинатах с целью выявления их свойств и использования в горной биотехнологии.
7. В вузах и институтах Красноярского Края есть задел по этим направлениям, но результаты этих исследований не коммерциализируются. В

крае полностью отсутствует система «масштабирования» научных биотехнологических разработок для целей промышленного производства и другие элементы биоэкономики, необходимые для преобразования научных знаний в коммерческие продукты. Для интенсификации биотехнологических работ в этом направлении необходимо:

- создание национального центра биоресурсов для горнорудной промышленности в Красноярском крае на базе ИЦМ СФУ и

ФИЦ КНЦ СО РАН, который позволит региону выйти в позицию национального лидера в области исследований проблем горной биохимии и переработки упорных руд;

- развитие образования в сфере биогeотехнологий, посредством создания новых образовательных программ в соответствии с кадровыми потребностями, формирование в институтах передовой научно-технологической базы.

### Список литературы

- 1 В.К. Совмен, В.Н. Гуськов, А.В. Белый и др. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего севера, Новосибирск Наука, 2007 – 144 с.
- 2 Белый А.В., Дроздов С.В. Перспективность развития биотехнологии для переработки промпродуктов обогащения упорных сульфидных золотосодержащих месторождений Красноярского края. Сборник тезисов докладов Восьмого международного конгресса. Цветные металлы и минералы. Красноярск 2016. Стр. 464-465.
- 3 Belyi A.V. and Tupikina O.V. *Bio mining Technologies. Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes. Chapter 11. Biooxidation of Gold Ores in Russia and Kazakhstan.* Editors: David Barrie Johnson, Christopher George Bryan, Michael Schlömann, Francisco Figueroa Roberto. Springer, 2023. P. 191-208.
- 4 A.V. Belyi, Yu.L. Gurevich. Bacterial leaching of molybdenum-containing materials. *Metallurgy of nonferrous and rare metals. Proceedings of Russian-Indian Symposium.* Editors: L.I. Leontiev, A.I. Kholkin, V.V. Belova. Moscow, 2002. С. 86-91.
- 5 Белый А.В., Пустошилов П.П., Гуревич Ю.Л., Кадочникова Г.Г., Ладыгина В.П. Бактериально-химическое выщелачивание марганцевых руд. *Прикладная биохимия и микробиология.* Том. 42, номер 3, 2006 г., страницы 327-331.
- 6 Белый А.В., Анисова Л.С., Денисов Г.В., Gladchenko I.A. Бактериальное обессеривание горючих сланцев. *Прикладная биохимия и микробиология.* 1991. т.27, вып.2, стр.222-227.
- 7 Белый А.В., Грасюкова Н.А., Пустошилов П.П., Гуревич Ю.Л. Тионовые бактерии в биотехнологии обессеривания углей и очистке промстоков. *Межд. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды. Тезисы докладов.* 12-16 сентября 1995 г. г. Томск. т.3, с.286.
- 8 Белый А.В., Гуревич Ю.Л., Пустошилов П.П., Кадочникова Г.Г. Тионовые бактерии в биотехнологии очистке промышленных стоков. // *Сибирский экологический журнал.* 1997, 5, С.467-473.
- 9 Белый А.В., Денисов Г.В., Зиненко Г.К., Ковров Б.Г. Бактериальное выщелачивание коллективного медно-цинкового концентрата. *Цветные металлы.* 1987 г. N8, стр. 25-27.
- 10 Абрамов А.А. *Технология переработки и обогащения руд цветных металлов [Текст]: В 2 кн.-М.: МГГУ, 2005.*
- 11 Патент РФ № 2481410 Способ разделения медно-молибденовых руд/ Н.К. Алгебраистова, А.В. Развьязная, Ю.Л. Гуревич, А.В. Макшанин
- 12 Патент РФ № 2639347. Способ флотационного обогащения сульфидных свинцово-цинковых руд / Н.К. Алгебраистова, И.В. Прокопьев, Ю.Л. Гуревич, М.И. Теремова // Опубликовано 21.12.17. Бюллетень № 36.
- 13 Трубников Ю.Н., Крючков А.А. Характеристика фосфоритов и эффективность фосфоритной муки в условиях Приенисейской Сибири // *Агрохимия.* 2018 № 6 С. 44- 52
- 14 Ладыгина В.П., Гуревич Ю.Л., Ладыгин П.П. Изменчивость ассоциации микроорганизмов как фактор поддержания круговорота фосфора // *Журнал проблем эволюции открытых систем.* 2004. Т. 1. Вып. 6. С. 100-105.
- 15 Георгиевский А. Ф. Основные итоги исследований пригодности микробных технологий для обогащения отечественных и зарубежных фосфоритов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия инженерные исследования.* 2003. N 3. С. 149-154.

# BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF THE KRASNOYARSK KRAI IN MINING

*Belyi A.V.<sup>1</sup>, Algebraistova N.K.<sup>2</sup>, Trubnikov Yu.N.<sup>3</sup>, Ananenko E.S.<sup>2</sup>, Prokopyev I.V.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Center for Strategic Research – CSR «North-West», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>ICM, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>FITC KNC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup>Mining Institute, North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

[belyiav52@gmail.com](mailto:belyiav52@gmail.com)

Biotechnology is becoming an increasingly important tool for solving various technological challenges. Biotechnology is used everywhere, from medicine and pharmaceuticals to the oil industry. In the near future, the scope of application of biotechnology will expand, creating conditions for the reorganization of entire industries, including mining and metallurgy.

The Krasnoyarsk krai is rich in metal mineral deposits and energy resources. According to the latest analytical data, the Krasnoyarsk krai is the country's producer of more than 70% of nickel, about 40% of copper, more than 35% of aluminum, more than 20% of gold, and more than 90% of platinum group metals. The largest enterprises such as Norilsk Nickel, Polyus Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Aluminum Smelter, Achinsk Alumina Refinery, Novoangarsky dressing plant are responsible for the growth of volumes and production indicators of the region in the metallurgical sector.

Recently, the decline of rich gold-bearing deposits, namely alluvial gold deposits and lightly processed oxidized ores, has been observed in the mining industry. In this case, there is a strategic need to involve in the processing of poor native gold-bearing ores, the amount of which is 50-60% of the explored gold reserves. Under these

conditions, one of the real problems of the gold mining industry is the inclusion of deposits of refractory gold-arsenic ores into the industrial operation.

Technological refractoriness of gold-bearing ores is characterized by the presence of finely disseminated gold in sulfides and the presence of detrimental impurities (arsenic, antimony, organic carbon). The efficiency of the traditional technology of processing gold concentrates - cyanidation - is reduced by these characteristics of the mineral content. Therefore, special processing methods - roasting, autoclaving and bacterial oxidation with subsequent extraction of free gold by cyanidation - are required for concentrates produced from technologically refractory gold-bearing ores.

It is known that three methods - roasting, autoclave oxidation and bio-processing - are used in the world practice of processing refractory gold concentrates. However, in the context of the aggravation of the environmental situation around the world, when developing and selecting new and effective technological processes for extracting gold from stubborn raw materials, specialists prefer biohydrometallurgical methods. According to forecasts, by 2027 the global biomining market will be worth about \$3.6 billion. The average annual growth rate is more than 13.2%. The

increase in the recovery rate of metallic minerals by up to 90% is the main advantage of using biotechnology for their extraction.

An example of successful integration of biotechnology into the mining industry is the experience of the gold mining company Polyus Krasnoyarsk. Thanks to the application of the developed and continuously improved BIONORD® technology, the company has become a leader in biohydrometallurgy not only in Russia, but also abroad [1, 2, 3]. In addition to the technology of gold biorecovery, the company's specialists have developed a technology for biodegradation of rhodanides and cyanides in industrial effluents of gold recovery plants. They have also developed a technology for improving the quality of bioleaches, which allows to reduce the consumption of reagents and increase gold recovery. Its experience in introducing and using biotechnology in gold metallurgy is readily transferable to similar deposits in Russia and worldwide. In addition, the process equipment and experience in isolating and adapting microorganisms can be effectively used in other promising scientific and technological developments at deposits in the Krasnoyarsk Krai, in particular, the Porozhinskoye manganese ore deposit, the Seibinskoye and Telekskoye phosphate ore deposits, the Gorevsky lead-zinc ore deposit, the Sorsky copper-molybdenum ore deposit [4].

In addition, introduction and development of biotechnology in mining can solve problems of use of tailings pond and dump, occupying large areas and being one of main factors of disturbance of soil. At present, the area of this type of land in the Krasnoyarsk region is 17.4 thousand hectares. Its rehabilitation is an important task for the region and the enterprises operating on its territory

within the framework of the ESG agenda in general and the regional project «Clean Land» in particular. Their restoration is an important task facing the region and companies operating on its territory, within the framework of the ESG agenda in general and the regional project «Clean Country» in particular. In this context, biotechnologies can be successfully used in two directions: for extraction of residual useful elements from tailings and dumps, as well as for direct remediation of contaminated areas and restoration of disturbed lands. Biotechnology is not only environmentally friendly (minimal negative effects on environment and human health), but also has lower running costs than alternative technologies because of its simple equipment.

Despite the many advantages of biotechnologies, they currently occupy an extremely small share of the market due to two interrelated reasons: the lack of motivated research interest and the relatively high cost of investment in technological development. Meanwhile, the need to develop new technologies in Russia requires the development and implementation of fundamentally new technological solutions in mining biochemistry with their subsequent transfer to industry against the background of limited access to foreign technologies and the gradual depletion of rich ores. To meet this challenge, it is necessary to ensure the development of proprietary biotechnological solutions with subsequent scaling up in the above-mentioned areas for the extraction of metals from refractory ores, tailings and dumps, as well as for the remediation of contaminated areas in the Far North.

Several promising scientific-technical directions of biotechnology development in Krasnoyarsk mining were selected:

## **I. Biotechnology for Mining and Metallurgy**

1. Bioleaching of non-ferrous and precious metals from ores, concentrates and tailings (Olimpiada deposit, Razdolinskoye deposit, Veduginskoye deposit).
2. Selective separation of polymetallic ores and concentrates (Gorevskoye deposit).
3. Degradation of surfactant films for preparation of bulk concentrates for selective flotation.
4. Concentrate quality improvement (lead concentrates dezincification, zinc concentrates deleading, molybdenum concentrates deprocessing).
5. Quality improvement of manganese concentrates and ores (Porozhinskoye and Usinskoye deposits).
6. Quality improvement of phosphate concentrates from phosphate rock of Seibinskoye and Telekskoye deposits.
7. Biosorption and concentration of metals from mining waste water.

## **II. Biotechnology for the Coal, Oil and Gas Industries**

1. Hard coal desulphurization.
2. Lignite bioprocessing.
3. Coal ash rare earth recovery.
4. Rare earths recovery from Achinsk alumina refinery waste dumps.
5. Coal mine methane reduction.
6. Reservoir oil recovery improvement.

## **III. Ecological Biotechnology**

1. Industrial wastewater bioremediation.
2. Gas emission bioremediation.
3. Fuel and oil spill remediation.
4. Tailings and ore dumps bio- and phyto-remediation.

## **IV. Research on the diversity of micro-organisms in mining and processing plants for identification of their properties and use in mining biotechnology.**

## **V. Developing and synthesizing flotation reagents based on microbial metabolites.**

In connection with the improvement of production efficiency and environmental protection of the Russian mining industry, the development of the above research areas and human competencies in this field is an urgent task. The use of biotechnology in the mining industry can solve the problems of selective separation of gold-antimony and lead-zinc concentrates, as well as increase the concentration of available phosphorus in phosphate rock from local deposits. This will improve the technological performance of processing and minimize the consequences of their mutual negative impact on the ecology of the region. Potential customers and consumers of industrial biotechnology developments are the largest mining enterprises of the Krasnoyarsk region: Polyus, Norilsk Nickel, Novoangarsky GOK, Sorsk Molybdenum Combine, Vasilievsky Mine, Achinsk Alumina Plant, Vankorneft, SUEK, etc.

The Krasnoyarsk Krai will become a national leader in the field of biogeochemical research in general and in solving the problems of processing refractory gold-bearing ores in particular, due to the establishment of a national bio-resource center for solving the problems of the mining industry in the Krasnoyarsk Krai. The transfer of biotechnology to industry will increase the profitability of the regional resource base, expand production and create new jobs (from 100 new jobs to service a production line for the processing of waste dumps). Several thousand jobs can

be created for biotechnologists and hybrid specialists combining engineering and technological skills with biotechnological skills, taking into account the number of companies involved in mining in the Krasnoyarsk Krai. The successful application of new technological solutions in mining metallurgy will also ensure the achievement of the goals of zero-waste production, which will solve the problem of industrial dumps and disturbed areas, and create conditions for achieving the goals of regional environmental projects, such as the «Clean Country» project.

There is already a good scientific background in the above-mentioned areas in the universities and institutes of Krasnoyarsk region (ICM, KSC SB RAS). Specialists of the Institute of Biophysics of SB RAS have found out that bacterial-chemical leaching of manganese ores allows to save 21.4-25% of sulfuric acid, to increase the extraction of Mn by 22.8-35.7%, and to reduce the time of the process [4]. Thus, it is possible to reduce the costs of the process through an integrated approach to the processed raw materials by introducing biotechnological processes into the scheme of processing manganese ores with associated valuable components.

A group of scientists from the Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences has also obtained a strain of *T. ferrooxidans* that is adapted to the leaching of molybdenum. This strain of *T. ferrooxidans* is used for oxidation of sulfides contained in molybdenum-containing raw materials (over 60% of sulfide mineral impurities, mainly pyrite, are removed during 120 hours of oxidation). As a result of oxidation, the concentration of molybdenum in the bacterial leach cake increases more than 3-fold. This greatly facilitates and

accelerates the subsequent production of molybdenum [5].

Furthermore, studies on biochemical desulfurization of steam and coking coals and oil shale were conducted in order to prevent environmental pollution with sulfur oxides and to reduce the sulfur content in smelted pig iron. Coals and oil shales with pyrite sulfur content of 3.0-1.8% were used in the experiment. *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacterial culture was used. According to the results of the study it was found out that the thione bacteria are able to extract from 70 to 90% of the pyrite sulfur in 20 hours according to the scheme of the two-stage bacterial-chemical method of desulfurization of coal [6, 7].

The specialists have also developed a biocoagulant based on trivalent iron that is superior to its chemically synthesized analog: at the same rate of precipitating impurities in domestic and industrial wastewater, the biocoagulant consumes three times less than its chemical analog [7, 8].

In addition, the possibility of selective extraction of zinc and copper was demonstrated by studying the mechanism of bacterial action on copper-zinc concentrate. The high rate of bacterial-chemical leaching of copper-zinc concentrate is achieved by the simultaneous initiation of the direct mechanism of action of cells on the solid phase of sulfides and the indirect mechanism of action of free cells. For this purpose, in the initial stage of the process, 3.4-3.8 g/l of crude biomass of iron bacteria is introduced into the reactor, which adsorbs on the surface of sulfide particles of the concentrate and accelerates the direct mechanism. The indirect oxidation mechanism is strongly initiated by the additional introduction of iron in the concentration of 5 g/l and biomass in the concentration of 2 g/l [9].

A team of scientists from I.C.M.'s Department of Ore Processing demonstrated that using microbial techniques for removing collector films from sulfide surfaces is a promising and undoubtedly revolutionary development. Biodegradation offers high separation efficiency of bulk concentrates by removing most of the collector from the mineral surface and promises dramatic reductions in capital costs and emissions. It is proposed to use a bacterial culture of *P. japonica* to desorb xanthogenate from the surface of bulk sulphides and to reduce the residual concentration of diesel fuel - a consortium of *O. anthropi* and *P. aeruginosa* JCM 5962 [11, 12]. The research shows that the bacteria *Ochrobactrum anthropi* and *Pseudomonas aeruginosa* JCM 5962 produce biosurfactants that promote the solubilization and absorption of diesel fuel hydrocarbons, and the culture of *Pseudomonas japonica* reduces the concentration of xanthogenate on the surface of minerals, which leads to their hydrophilization.

A technology for the production of phosphate fertilizers from phosphorite from the phosphorite deposits of the Krasnoyarsk Territory (Seibinskoye, Oblajanskoye and Telekskoye) is being developed by the specialists of the Laboratory of Space Systems and Technologies of the FITC KNC SB RAS. The use of local phosphorite as a fertilizer requires enrichment, since the phosphate meal produced on the basis of local phosphorite is effective only in a limited range of soil and agrochemical conditions due to the low content of phosphorus pentoxide in local phosphorite [13]. Microbial technologies make it possible to reduce the amount of associated harmful elements - uranium,

strontium, cadmium, etc., in addition to increasing the amount of phosphorus available to plants [14-15].

The transfer of biotechnology to industry will increase the profitability of the regional resource base of the entire Yenisei Siberia, thus increasing the profitability of mining companies and stimulating the growth of investment in social and infrastructure projects not only in the Krasnoyarsk region, but also in the eastern regions of Russia.

### **Conclusions:**

1. The main directions of biotechnological potential in Krasnoyarsk Krai are described: biotechnology for mining and metallurgical industry, biotechnology for coal and oil and gas industry, environmental biotechnology, research of microorganism's diversity in mining and processing plants for identification of their properties and use in mining biotechnology, development and synthesis of flotation reagents on the basis of metabolic products of microorganisms.
2. The Krasnoyarsk Krai has rich experience in biohydrometallurgy of gold, which can be easily transferred to similar deposits in Russia and abroad.
3. The developed technologies and equipment of biohydrometallurgical production, experience in isolation and adaptation of microorganisms can be used in other promising scientific and technological biodevelopment on deposits of polymetallic, manganese, phosphorus bearing ores of the Krasnoyarsk Krai.
4. The problems of desulfurization of hard coal, bioprocessing of lignite, extraction of rare earth elements

from coal ash, extraction of rare earth elements from the waste dumps of the Achinsk alumina refinery, reduction of methane content in coal mines, enhanced oil recovery will be solved by the development of biotechnology for the coal and oil and gas industries of the Krasnoyarsk Krai.

5. Biotechnology can be used to solve a number of environmental pollution problems: bio-purification of industrial waste water and gas emissions, elimination of fuel and oil leaks, bio- and phyto-remediation of tailings and ore deposits.
6. In order to identify their characteristics and use them in mining biotechnology, it is necessary to intensify research on determining the diversity of microorganisms in mining and processing plants.
7. Specialists of the universities of Krasnoyarsk Krai already have results in these areas, but the results of these

studies are not commercialized. The system of «scaling» of scientific biotechnological developments for industrial production and other elements of bio-economy necessary for transformation of scientific knowledge into commercial products is completely lacking in the region. To intensify biotechnological work in this direction it is necessary to

- Creation of a National Center of Bioresources for Mining in Krasnoyarsk Krai based on ICM SFU and FIC KSC SB RAS, which will allow the region to become a national leader in researching problems of mining biochemistry and processing of refractory ores;
- Developing education in the field of biogeotechnologies by creating new educational programs according to personnel needs, creating an advanced scientific and technological base in institutes.

## References

- 1 V.K. Sovmen, V.N. Guskov, A.V. White et al. Processing of gold-bearing ores using bacterial oxidation in the conditions of the Far North, Novosibirsk Nauka, 2007 - 144 p.
- 2 Bely A.V., Drozdov S.V. Prospects for the development of biotechnology for processing industrial products of enrichment of persistent sulfide gold-bearing deposits of the Krasnoyarsk Territory. Collection of abstracts of the Eighth International Congress. Non-ferrous metals and minerals. Krasnoyarsk 2016. Pp. 464-465.
- 3 Belyi A.V. and Tupikina O.V. Biomining Technologies. Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes. Chapter 11. Biooxidation of Gold Ores in Russia and Kazakhstan. Editors: David Barrie Johnson, Christopher George Bryan, Michael Schlömann, Francisco Figueroa Roberto. Springer, 2023. P. 191-208.
- 4 A.V. Belyi, Yu.L. Gurevich. Bacterial leaching of molybdenum-containing materials. Metallurgy of nonferrous and rare metals. Proceedings of Russian-Indian Symposium. Editors: L.I. Leontiev, A.I. Kholkin, V.V. Belova. Moscow, 2002. C. 86-91.
- 5 Bely A.V., Pustoshilov P.P., Gurevich Yu.L., Kadochnikova G.G., Ladygina V.P. Bacterial and chemical leaching of manganese ores. Applied biochemistry and microbiology. Volume 42, number 3, 2006, pages 327-331.
- 6 Bely A.V., Anisova L.S., Denisov G.V., Gladchenko I.A. Bacterial desulfurization of oil shale. Applied biochemistry and microbiology. 1991. vol.27, issue 2, pp.222-227.
- 7 Bely A.V., Grasyukova N.A., Pustoshilov P.P., Gurevich Yu.L. Thionic bacteria in the biotechnology of desulfurization of coals and purification of industrial effluents. Inter. conf. Fundamental and applied problems of environmental protection. Abstracts of reports. September 12-16, 1995, Tomsk. vol.3, p.286.
- 8 Bely A.V., Gurevich Yu.L., Pustoshilov P.P., Kadochnikova G.G. Thion bacteria in biotechnology treatment of industrial wastewater. //Siberian Ecological Journal. 1997, 5, pp.467-473.
- 9 Bely A.V., Denisov G.V., Zinenko G.K., Kovrov B.G. Bacterial leaching of a collective copper-zinc concentrate. Non-ferrous metals.1987 N8, pp. 25-27.
- 10 Abramov A.A. Technology of processing and enrichment of non-ferrous metal ores [Text]: In 2 books- Moscow: MGSU, 2005.

- 11 RF Patent No. 2481410 Method of separation of copper-molybdenum ores/ N.K. Algebraistova, A.V. Swashbuckling, Y.L. Gurevich, A.V. Makshanin
- 12 RF Patent No. 2639347. Method of flotation enrichment of sulfide lead-zinc ores / N.K. Algebraistova, I.V. Prokopyev, Y.L. Gurevich, M.I. Teremova // Published on 21.12.17. Bulletin No. 36.
- 13 Trubnikov Yu.N., Kryuchkov A.A. Characteristics of phosphorites and the effectiveness of phosphorite flour in conditions of Yenisei Siberia // Agrochemistry. 2018 No. 6 p. 44- 52
- 14 Ladygina V.P., Gurevich Yu.L., Ladygin P.P. Variability of the association of microorganisms as a factor in maintaining the phosphorus cycle // Journal of problems of evolution of open systems. 2004. Vol. 1. Issue 6. Pp. 100-105.
- 15 Georgievsky A. F. The main results of studies on the suitability of microbial technologies for the enrichment of domestic and foreign phosphorites //Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Engineering research series. 2003. N 3. Pp. 149-154.