

На правах рукописи



**БЕЛЫХ
Марина Петровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ БАКТЕРИАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ
В ДЕТОКСИКАЦИИ ЦИАНИДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ КУЧНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД**

03.02.08 – экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Иркутск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутском государственном университете» и Иркутском научно-исследовательском институте редких и благородных металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»)

Научный руководитель: **Чикин Андрей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор Педагогического института ФГБОУ ВО Иркутского государственного университета.

Научный консультант: **Белькова Наталья Леонидовна**, кандидат биологических наук, доцент, с.н.с. лаборатории аналитической биоорганической химии ФГБУН Лимнологический институт СО РАН.

Официальные оппоненты: **Кондратьева Любовь Михайловна**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрогеологии ФГБУН Института водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск.

Булаев Александр Генрихович, кандидат биологических наук, и.о. заведующего лабораторией хемолитотрофных микроорганизмов Федерального государственного учреждения ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский.

Защита состоится 30 марта 2018 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.074.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, Иркутск, ул. Сухэ-Батора, 5, Иркутский государственный университет, аудитория 219.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» им. В.Г. Распутина по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124, и на сайте Иркутского государственного университета: <http://isu.ru/ru/science/boards/dissert/dissert.html?id=133>.

Отзыв просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, биолого-почвенный факультет ИГУ. Тел. / факс: (3952) 241855; e-mail: dissovet07@gmail.com.

Автореферат разослан « ____ » января 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент



А.А. Приставка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В технологическом процессе кучного выщелачивания (КВ) золота, реализуемом на открытых площадках промышленных объектов, образуются потенциально опасные цианидсодержащие отходы – отработанный рудный штабель и технологический раствор [Дементьев и др., 2004]. Они выступают как негативные факторы воздействия природно-техногенных комплексов на воздух, почву, поверхностные, подземные воды [Караганов, Ужкенов, 2002] и создают большую опасность для экосистемы в целом и для здоровья человека, в частности. Отработанный технологический раствор обезвреживается и сбрасывается в окружающую среду с учетом норм Нормативно допустимых сбросов (НДС), а рудный штабель промывается оборотными растворами или водой и подвергается рекультивации.

На сегодняшний день в России мероприятия по детоксикации отходов КВ преимущественно основаны на химических методах, которые являются эффективными, но не исключают повторного загрязнения окружающей среды используемыми реагентами, а также требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат. За рубежом большое внимание исследователей направлено на изоляцию активных бактериальных штаммов-деструкторов и использование их в биодетоксикации цианидсодержащих отходов. Проведение подобных мероприятий для обезвреживания отходов КВ, расположенных на территории РФ, сталкивается с проблемами поддержания активности бактерий при резких сезонных колебаниях температур и преодоления их ограниченности в деструкции высоких концентраций цианидов.

Для решения экологических задач детоксикации отходов КВ золота, продолжительность обезвреживания которых не является лимитирующей, особый интерес представляют технологии пассивного обезвреживания (*passive treatment technologies*) или так называемые «системы пассивного обезвреживания» («*passive treatment systems*») [Alvarez et al., 2005]. Они основаны на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества. Внедрение такой безреагентной технологии биодетоксикации отработанных установок КВ позволит снизить экологическую нагрузку на районы размещения промышленных объектов и достичь значимого экономического эффекта.

Изучению вопросов биологической детоксикации, в том числе пассивного обезвреживания цианидсодержащих отходов, посвящено большое количество работ, таких зарубежных ученых как: Т. Mudder, А. Smith, С.А. Young, М. Botz, L. Simovic, S.A. Ndur, R. Alvarez, N. Gupta, R. Harris, С. J. Knowles, J. Baxter, М.М. Figueira, V. Kumar, V.M. Luque-Almagro, P.L. Younger, L. Mekuto, R. Cipollone, K.I. Karamba, R. Huddy, S. Zyl, S.T.L. Harrison и др. В проведенных исследованиях изолированы и идентифицированы бактериальные штаммы, обладающие биотехнологическим потенциалом к деструкции цианидов и их производных; изучены ферментативные пути биодеструкции цианидов и тиоцианатов, а так же рассмотрены основные принципы пассивного обезвреживания отходов горнодобывающей промышленности и разработаны полупассивные системы обезвреживания (*semi-passive systems*) – ASTER,

Homestake и Biopass, основанные на введении дополнительных источников энергии для стимулирования активности автохтонного сообщества [Whitlock, 1990; Mudder et al., 1995; Zyl et al., 2011; Huddy et al., 2015 и др.].

Несмотря на большое количество этих работ они преимущественно направлены на изучение детоксикации высоких концентраций тиоцианатов и мало применимы к деструкции высоких концентраций цианидов. В нашей стране работы по биообезвреживанию цианидсодержащих отходов немногочисленны и представлены в публикациях Г.И. Каравайко, Д.Ю. Сорокина, Г.В. Седельниковой, Н.В. Григорьевой, А.В. Белого, С.С. Тимофеевой и Н.Ю. Антониновой. Относительно недавно исследовательским центром ОАО «Полюс Золото» (Красноярск) был предложен подход, который является аналогом технологии ASTER. Он позволяет обезвреживать высокие концентрации тиоцианатов (с 1800 до 0.02 мг/дм³) в жидких пульпах после биовыщелачивания золота и имеет ограничения в деструкции высоких концентраций цианидов (до 20–30 мг/дм³). Для стимуляции биотехнологической активности консорциума микроорганизмов, осуществляющих детоксикацию, применяют дополнительные источники углерода, азота и фосфора [Belyi et al., 2017]. С.В. Петровым разработана технология пассивного обезвреживания отходов КВ золота под действием природных факторов [Петров, 2003]. Однако роль автохтонного бактериального сообщества в данном процессе не изучена.

Цель исследования – изучить разнообразие, состав, структуру и функциональную роль автохтонных бактериальных сообществ в детоксикации цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания золотосодержащих руд.

Для успешной реализации цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать основные закономерности и определить роль биотического фактора в процессе пассивной детоксикации рудного штабеля КВ.

2. Определить структуру и разнообразие бактериальных сообществ, развивающихся в естественных и модельных условиях зонирования рудного штабеля КВ.

3. Выявить основные функциональные группы бактерий, выступающих маркерами процесса деструкции цианидсодержащих соединений в отходах КВ, и определить влияние на их развитие различных экологических факторов.

4. Разработать технологию биодетоксикации отходов КВ золота с учетом региональных экологических условий и оценить ее экономическую эффективность.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Автохтонные бактериальные консорциумы играют значительную роль в процессе пассивной детоксикации рудного штабеля КВ золота.

2. В условиях зонирования рудного штабеля КВ бактериальные сообщества имеют невысокое разнообразие. Доминирующие представители (*Achromobacter* и *Serratia*) адаптированы к широким диапазонам температур и могут выступать маркерами процессов деструкции цианидсодержащих соединений в отходах КВ золота.

3. Автохтонные бактериальные сообщества отходов КВ месторождений, расположенных на территории РФ, имеют большое сходство. Минеральный и

химический состав руд не оказывает влияние на состав основных функциональных групп бактерий, способных осуществлять детоксикацию цианидсодержащих соединений.

Научная новизна. Установлены основные закономерности биодетоксикации токсичных соединений в основных слоях рудного штабеля КВ при сезонных вариациях температур в аэробных и анаэробных условиях. Подтверждено преимущественное влияние биотического фактора на интенсивность деструкции цианидов, включая цианидные комплексы меди и никеля, и тиоцианатов в штабеле КВ по сравнению с химическим окислением. С использованием молекулярно-генетических методов в единых методических условиях получены наиболее полные данные о структуре и разнообразии бактериальных сообществ, развивающихся в естественных и модельных условиях штабеля КВ. С помощью непараметрического многомерного статистического анализа показано влияние экологических факторов (температуры и аэрации), а также степени утилизации токсичных соединений на разнообразие, состав и структуру бактериальных сообществ. Дополнены и расширены сведения об основных участниках деструкции цианидсодержащих соединений в отходах золотодобывающей промышленности, расположенных на территории РФ. Впервые проведено комплексное изучение доминирующих представителей автохтонных бактериальных сообществ различных месторождений, направленное на выявление особенностей развития основных функциональных групп бактерий, выступающих маркерами процессов деструкции цианидсодержащих соединений в отходах КВ.

Практическая значимость полученных результатов. Оптимизированы условия проведения молекулярно-генетических исследований на технологических растворах и рудной массе КВ золота. Выявлены основные функциональные группы бактерий в составе сообществ, развивающихся *in situ* в объектах КВ четырех различных месторождений, которые могут выступать маркерами процессов деструкции цианидсодержащих соединений в рудном штабеле КВ. Полученные результаты могут быть использованы в курсах лекций по геоэкологии, биотехнологии и молекулярной экологии, а также для инженерных расчетов технологии обезвреживания отходов КВ. Рассчитаны аппроксимирующие уравнения и вычислены константы скорости биодegradации основных токсичных соединений при различных температурах и условиях аэрации, позволяющие прогнозировать продолжительность детоксикации реальных отходов КВ. Разработана технология биодетоксикации отходов КВ золота с учетом региональных экологических условий на примере месторождения «Подголецное» и оценена ее экономическая эффективность.

Реализация и внедрение результатов исследования. По результатам исследования для промышленного комплекса КВ разработана эффективная безреагентная технология биодетоксикации отходов КВ золота, которая позволяет существенно снизить экологическую нагрузку на район размещения предприятия, а также уменьшить эксплуатационные и капитальные затраты на проведение природоохранных мероприятий. Аппаратурная и технологическая схемы разработанной технологии рекомендованы в дополнение к

технологическому регламенту о НИР «Разработка технологического регламента по извлечению золота из руд месторождения «Подгольное» методом КВ» Договор № 380/7-11.

Работа выполнена в рамках НИР АО «Иргиредмет» по теме «Исследование биохимической деструкции токсичных соединений в цианидсодержащих отходах кучного выщелачивания золота» Договор № 112 от 20.11.2012 (2012–2016 гг.).

Степень обоснованности и достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов обеспечивается достаточной сходимостью данных теоретических и экспериментальных исследований, а также применением комплекса современных физико-химических и молекулярно-генетических методов, аттестованных методик и сертифицированного оборудования. При анализе данных использовали метод главных компонент (PCA) и непараметрический многомерный статистический анализ дисперсии (PERMANOVA, Bray-Curtis), онлайн сервисы FASTA, BLAST и пакеты программ Mothur 1.31.1, Mega v. 6.06, BioEdit, Pyrosequencing pipeline. Полученные нуклеотидные последовательности гена 16S рРНК депонированы в базы данных European Nucleotide Archive (ENA) и Sequence Read Archives (SRA).

Апробация полученных результатов. Материалы диссертации были представлены на VI, VII Всероссийском с международным участием Конгрессе «Симбиоз–России 2013, 2014» (Иркутск, 2013; Екатеринбург, 2014); III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Развитие физико-химической биологии и биотехнологии на современном этапе» (Иркутск, 2013); IV Региональной научно-практической конференции «Экологические проблемы Байкальского региона» (Улан-Удэ, 2014); VIII Московском Международном Конгрессе «Биотехнология: состояние и перспективы развития» (Москва, 2015); Международном совещании «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатительного минерального сырья (Плаксинские чтения 2015)» (Иркутск, 2015); The 21st, 22nd International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2015, 2017) (Indonesia, Bali, 2015; Germany, Freiberg, 2017); Международной научно-практической конференции «Биотехнологии в комплексном развитии регионов» (Москва, 2016); Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения 2016)» (Санкт-Петербург, 2016).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в определении цели и задач диссертации, анализе и обобщении имеющейся литературы по теме и обсуждении полученных результатов. Автор участвовал во всех экспедиционных работах, планировании и проведении экспериментальных исследований. По результатам проведенных работ в соавторстве подготовлены материалы и тезисы конференций, статьи в рецензируемых изданиях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 статей в рецензируемых российских изданиях, входящих в список ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста, состоит из введения, 3 глав, заключения.

Список литературы включает 166 работ, из которых 118 – на английском языке. Работа иллюстрирована 27 рисунками, 29 таблицами и 5 приложениями.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессор Чикину А.Ю. (ФГБОУ ВО «ИГУ») за руководство научной работой; научному консультанту к.б.н., доценту Бельковой Н.Л. (ЛИН СО РАН) за помощь при проведении молекулярно-генетических исследований, в обсуждении результатов и рукописи; начальнику отдела ООС (АО «Иргиредмет») к.т.н. Петрову В.Ф. и заведующему лабораторией к.т.н. Петрову С.В. за возможность проведения исследований и помощь в обсуждении рукописи; коллективу Группы химического анализа природных и сточных вод отдела ООС за качественное и своевременное выполнение химико-аналитических исследований. Особую благодарность приношу своим родным и близким за моральную поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В первой главе представлен обзор мирового опыта по детоксикации отходов КВ золота. Дана характеристика основных применяемых методов обезвреживания цианидсодержащих отходов, оценены их положительные и отрицательные стороны. Обосновано, что наиболее перспективными и экологически выгодными являются технологии биообезвреживания, основанные на использовании не отдельных штаммов-деструкторов, а автохтонного микробного сообщества. Данный подход изучался исследователями на примере полупассивных систем обезвреживания (Biopass, Homestake, ASTER и ее аналог) и на сегодняшний день в полном объеме не рассмотрен.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Геолого-географическая характеристика объектов исследования

Объектами исследования выступали четыре месторождения, расположенные на территории Красноярского края («Бабушкина Гора»), Республики Хакасия («Чазы Гол») и Республики Саха (Якутия) («Самолазовское», «Подгольное»). Районы размещения месторождений характеризовались резко континентальным климатом с отрицательной среднегодовой температурой от -2 до -9°C . Все анализируемые месторождения отнесены к низкотемпературным местам обитания.

В качестве предметов исследования использовали цианидсодержащие отходы КВ золота: технологический раствор и рудную массу штабеля КВ исследуемых месторождений. Отбор технологических проб осуществляли в 2012 и 2014 гг. в стерильные емкости, транспортировали и хранили при температуре $+4^{\circ}\text{C}$ до проведения исследований. Химический и минеральный анализ жидкой и твердой фазы отходов КВ проводила аттестованная в системе ГОСТ ИСО/МЭК Группа химического анализа природных и сточных вод отдела ООС АО «Иргиредмет» с использованием стандартных методик анализа.

2.2 Модельный эксперимент по детоксикации отходов КВ золота

В складированном рудном штабеле КВ условно выделяют четыре слоя,

которые различаются по температурному режиму, наличию или отсутствию аэрации. Для моделирования процесса пассивной детоксикации отходов КВ золота, исходную рудную массу, увлажненную технологическим раствором, хранили в четырех разных модельных условиях – слой 2 (летний период: +20°C, +O₂) и (зимний период: -18°C, +O₂), слой 3 (+4°C, +O₂) и слой 4 (+4°C, -O₂). Из-за незначительной мощности и незначительного влияния на деструкцию токсичных соединений слой 1 был исключен из анализа. Образцы рудной массы инкубировали в течение 593 суток независимо друг от друга, чтобы исключить миграцию токсичных соединений между слоями. Содержание токсичных веществ во влаге рудной массы оценивали в водных и щелочных вытяжках с помощью стандартных физико-химических методик.

Роль автохтонных бактериальных сообществ в детоксикации цианидсодержащих отходов КВ оценивали в нестерильной рудной массе. Предварительно простерилизованные образцы использовали в качестве абиотического контроля. Контроль их стерильности проводили при каждом пробоотборе, он показал отсутствие бактериального роста на протяжении всего эксперимента, следовательно, деструкция токсичных соединений была обусловлена только химическими процессами.

2.3 Молекулярно-генетические методы

Для изучения бактериальных сообществ были оптимизированы и подобраны условия проведения молекулярно-генетического анализа на выбранных предметах исследования. Методы, основанные на анализе гена малой субъединицы рибосомной РНК (16S рРНК), включали выделение тотальной ДНК, проведение полимеразной цепной реакции (ПЦР), молекулярного клонирования, секвенирования по Сэнгеру и метагеномного секвенирования ампликонов (технология пиросеквенирования на платформе 454-GS Junior System (Roche, США)). Биоинформационную обработку данных проводили с помощью онлайн сервисов FASTA, BLAST и пакетов программ Mothur 1.31.1, Mega v. 6.06, BioEdit, Pyrosequencing pipeline. Для оценки видового богатства были рассчитаны индексы разнообразия (Chao1 и Шеннона), построены кривые накопления видов (<https://pyro.cme.msu.edu>). Для определения различий между бактериальными сообществами строили диаграммы Венна, а также применяли метод главных компонент (PCA) и непараметрический многомерный статистический анализ дисперсии (PERMANOVA, Bray-Curtis).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Исследование роли автохтонных бактериальных сообществ в пассивной детоксикации отходов КВ золота

Процесс КВ золота проводится на открытых площадках производства в течение длительного времени в естественных условиях окружающей среды. Очевидно, что в штабеле КВ активно развиваются бактерии, с одной стороны устойчивые к цианидсодержащим соединениям и тяжелым металлам, с другой стороны способные использовать их в своих метаболических реакциях. Предполагается, что результат деятельности бактериальных сообществ в детоксикации отходов КВ золота может быть более значим по сравнению с

простым химическим окислением. Моделирование пассивного обезвреживания и развернутая, полная характеристика развивающихся бактериальных сообществ позволят разработать экологически выгодный и экономически эффективный подход в биодетоксикации отходов КВ.

3.1.1 Химический и минеральный состав технологических проб исследуемых месторождений

Известно, что экологические факторы существенно влияют на выбор методов обезвреживания отходов КВ золота, поэтому для оценки их влияния на эффективность биодетоксикации были исследованы четыре объекта КВ месторождений («Бабушкина Гора», «Чазы Гол», «Самолазовское» и «Подголецное»), отличающиеся территориальной расположенностью, а также химическим и минеральным составом руд. Сравнительный анализ показал, что месторождение «Подголецное» характеризовалось средним содержанием основных компонентов в технологических растворах и рудных массах (цианидов, тиоцианатов, сульфатов, меди, никеля, кальция, алюминия, железа и марганца). Рудную массу КВ именно этого месторождения использовали в длительном эксперименте (593 сут) для определения роли автохтонных бактериальных сообществ в процессе пассивной детоксикации рудного штабеля.

В рудной массе месторождения «Подголецное» к основным токсичным соединениям были отнесены **цианиды, тиоцианаты, медь и никель**, концентрации которых на начальной стадии модельного эксперимента составили 81.63, 13.3, 20.3 и 0.50 мг/дм³ соответственно.

3.1.2 Детоксикация отходов КВ золота на примере месторождения «Подголецное»

В модельных экспериментах было показано, что наиболее интенсивная деструкция **цианидов** (на 98.9 и 99.3%) проходила при положительных температурах и наличии аэрации – слой 2 (летний период) и слой 3 (рис. 1, А). При этом в присутствии автохтонных бактериальных сообществ скорость деструкции цианидов (с 81.63 мг CN⁻/дм³ до значений ниже предельно допустимых концентраций (ПДК)) в 4 и 6 раз превышала химическое окисление (рис. 1, Б).

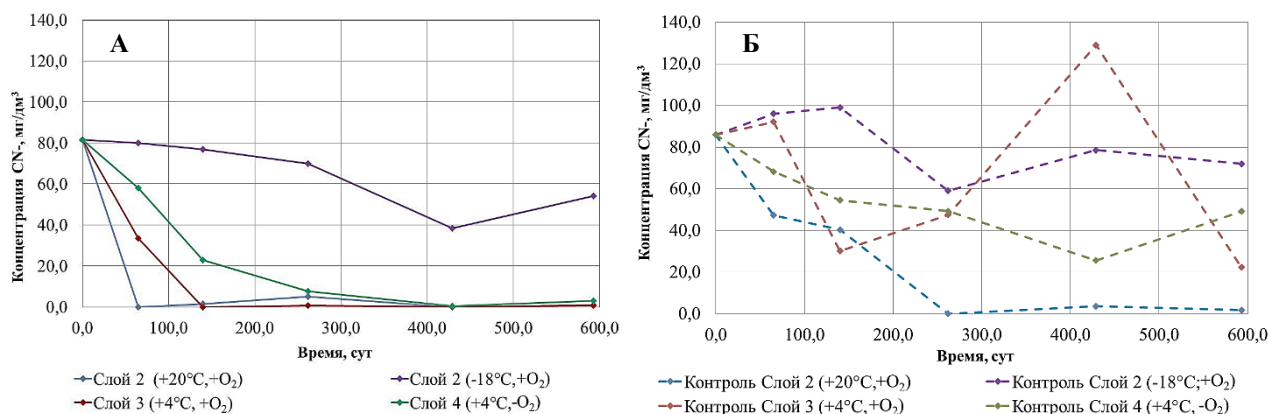


Рисунок 1. Изменение концентраций цианидов при моделировании условий зонирования рудного штабеля КВ золота в нестерильной (А) и предварительно простерилизованной рудной массе (Б)

В мировой литературе механизмы деструкции цианидов хорошо изучены, предполагается, что в аэробных условиях при положительных температурах биодеструкция может протекать по реакциям окислительного и/или гидролитического путей с участием ферментов цианидмонооксигеназы, цианазы, цианиддиоксигеназы, цианидгидратазы и формамидгидратазы [Knowles, 1976; Gupta et al., 2010 и др.].

Снижение концентраций *меди* отмечали при положительной температуре в условиях 2, 3 и 4 слоев на 98.9, 98.8 и 94.4% (рис. 2). Следует отметить, что также как и для цианидов, снижение концентрации меди в нестерильной рудной массе было на порядок выше, чем в предварительно простерилизованной. Сходная закономерность отмечена для соединений *никеля*.

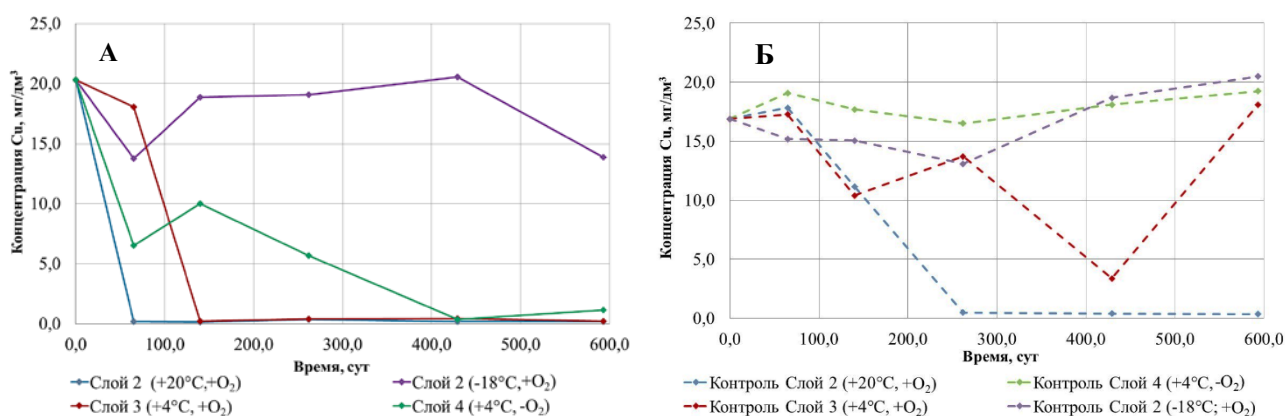


Рисунок 2. Изменение концентраций меди при моделировании условий зонирования рудного штабеля КВ золота в нестерильной (А) и предварительно простерилизованной рудной массе (Б)

Совпадение деструкции цианидов со снижением концентраций меди и никеля свидетельствует о том, что в рудной массе данные металлы преимущественно находятся в виде растворимых цианидных комплексов. Удаление таких комплексов осуществляется по механизму перехода в менее координационно насыщенное состояние и образования, в конечном итоге, нерастворимых гидроксидов и карбонатов:



Предполагается, что более интенсивная деструкция цианидных комплексов меди и никеля в нестерильной рудной массе происходит за счет сдвига равновесия вправо (реакции 1, 2, 3) и интенсивного разложения при участии автохтонного бактериального сообщества. Кроме того, в процессе дыхания цианидрезистентных бактерий образуется углекислый газ, что влияет на увеличение скорости реакции и переход цианидных комплексов в нерастворимые карбонаты.

Уменьшение концентрации *тиоцианатов* происходило только в условиях отрицательных температур слоя 2 (зимний период). При этом в нестерильной рудной массе интенсивность деструкции была выше (67.7%), чем

в предварительно простерилизованной (9.2%). При положительных температурах и аэрации в нестерильной рудной массе концентрация тиоцианатов оставалась практически на исходном уровне, в контроле – отмечали ее рост (с 15.6 до 25.9 и 37.2 мг/дм³). Это свидетельствует о химическом преобразовании цианида в тиоцианат. Отсутствие увеличения содержания тиоцианатов в нестерильной рудной массе дополнительно подтверждает доминирование биохимических процессов над химическим окислением при деструкции цианидов.

Дополнительно в ходе модельного эксперимента было установлено, что изучаемый рудный материал обладал высокой буферностью даже при наличии окислительных процессов, что исключает образование кислых дренажных вод при разработке технологии биодетоксикации.

Ранее в работах С.В. Петрова и О.М. Мурашовой были разработаны математические модели пассивной детоксикации отходов КВ и показано, что деструкция цианидсодержащих соединений в рудном штабеле КВ при естественных условиях подчиняется экспоненциальной зависимости. Поэтому в настоящей работе не была предусмотрена разработка математической модели, а полученные в ходе укрупненных лабораторных исследований кинетические данные детоксикации общего цианида, тиоцианата, меди и никеля (рис. 1, 2) были описаны уравнениями первого порядка и рассчитаны константы скорости реакций при различных температурах и условиях аэрации. При положительной температуре константы скорости реакции биодеструкции общего цианида составляли 0.013 и 0.012 1/сутки и были значительно выше констант скорости реакции химического окисления (0.007 и 0.002 1/сутки). Аналогичные данные получены при детоксикации меди и никеля. Для тиоцианатов константа скорости биодетоксикации была равна 0.002 1/сутки.

Таким образом, оптимальные условия для биодетоксикации цианидов создаются при положительных температурах и аэрации, тиоцианатов – при отрицательных температурах. Аппроксимирующие уравнения, полученные для этих условий (табл. 1), использованы для расчета продолжительности обезвреживания отходов КВ при разработке технологии биодетоксикации.

Таблица 1. Аппроксимирующие уравнения биодетоксикации основных токсичных соединений

Токсичные соединения	Период	k, 1/сутки	Уравнение биодетоксикации	Достоверность аппроксимации
Общий вид аппроксимирующего уравнения $C = C_0 \times e^{kt}$				
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni)	Летний период	0.012	$C = 81.63 \times e^{-0.012t}$	0.7125
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni)	Зимний период	0.001	$C = 81.63 \times e^{-0.001t}$	0.7729
Тиоцианаты	Зимний период	0.002	$C = 13.3 \times e^{-0.002t}$	0.8673

Примечание: С – концентрация цианидов или тиоцианатов в заданной точке, мг/дм³; С₀ – исходная концентрация цианидов или тиоцианатов, мг/дм³; k – константа скорости реакции при заданной температуре и аэрации, 1/сутки; t – скорость деструкции цианидов или тиоцианатов, сутки.

3.1.3 Изменение разнообразия бактериального сообщества при детоксикации складированных отходов КВ

Разнообразие и структуру бактериальных сообществ, развивающихся в естественных и модельных условиях рудного штабеля КВ, определяли с помощью молекулярно-генетического анализа, для некоторых лимитирующих стадий которого была проведена оптимизация условий их проведения на рудной массе и технологическом растворе. Разнообразие бактериальных сообществ анализировали метагеномным секвенированием V4–V8 переменных районов фрагмента гена 16S рРНК. Для каждого образца было получено 3894–6685 последовательностей (табл. 2), с длиной от 500 до 550 пар нуклеотидов.

Таблица 2. Основные показатели разнообразия бактериальных сообществ, развивающихся в естественных условиях рудного штабеля КВ и в модельном эксперименте

Слой штабеля КВ	Модельные условия	Количество последовательностей, шт.	ОТЕ, шт.		Индексы разнообразия			
			1-65 сут	65-593 сут	ChaoI		Шеннона	
					1-65 сут	65-593 сут	1-65 сут	65-593 сут
Рудный штабель	естественные условия	6685	51	-	79.9	-	1.5	-
Слой 2	летний период (+20°C, +O ₂)	4098–6108	32	198	41.0	295.5	0.8	2.7
Слой 2	зимний период (-18°C, +O ₂)	3894–6366	40	127	55.2	224.7	1.1	2.1
Слой 3	(+4°C, +O ₂)	5895–6417	41	134	56.0	182.8	1.3	2.6
Слой 4	(+4°C, -O ₂)	4231–5807	29	92	45.5	178.8	1.0	1.9

Бактериальное сообщество, развивающееся в естественных условиях рудного штабеля, характеризовалось невысоким видовым разнообразием. Количество фило типов (операционных таксономических единиц – ОТЕ) составило 51, видовое богатство по индексу обилия ChaoI – 79.9, а видовое разнообразие по индексу Шеннона – 1.5 (табл. 2). После хранения в модельных условиях с 1 по 65 сутки происходило уменьшение показателей видового обилия и разнообразия по сравнению с исходным (ОТЕ до 29–41, индекса ChaoI до 41.0–56.0 и индекса Шеннона до 0.8–1.3). Это было связано с адаптацией бактериальных сообществ к модельным условиям и в некоторых случаях с активной детоксикацией цианидов. Далее с 65 по 593 сутки показатели видового богатства и разнообразия значительно увеличивались (ОТЕ до 92–198, индекса ChaoI до 178.8–295.5 и индекса Шеннона до 1.9–2.7), после снижения концентраций токсичных соединений наблюдали развитие тех представителей, которые способны выживать и проявлять свою активность при определенных физико-химических параметрах окружающей среды.

Анализ *разнообразия бактериальных сообществ* методом главных компонент (РСА) показал, что значимые различия по составу и представленности ОТЕ существуют между двумя кластерами (рис. 3, А), первый из которых сформирован бактериальным сообществом исходной рудной массы и сообществами, формирующимися на начальных стадиях деструкции цианида.

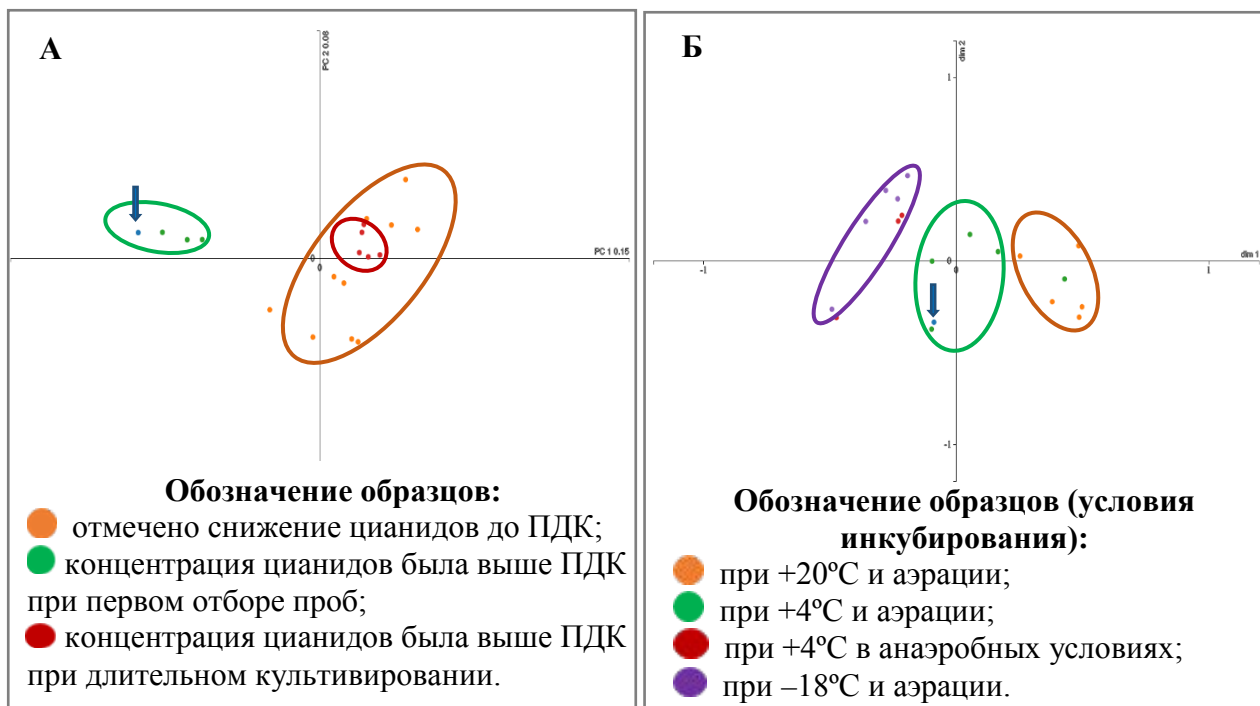


Рисунок 3. Сравнительный анализ автохтонных бактериальных сообществ исходной рудной массы и культивируемых в модельном эксперименте методом главных компонент (PCA) (А) и методом PERMANOVA (Б). Синей стрелкой обозначен исходный образец, кластеры обозначены кругами разного цвета

Второй кластер представлен бактериальными сообществами, которые формировались при более длительном инкубировании рудной массы. Интересно отметить, что бактериальные сообщества, развивающиеся при относительно высокой концентрации цианида при отрицательных температурах и в отсутствие аэрации, также попали в этот кластер (рис. 3, А). Можно предположить, что на начальных этапах деструкция цианида связана с вовлечением углерода и азота из цианидных комплексов в круговорот этих элементов и развитием органогетеротрофных микроорганизмов, осуществляющих различные стадии метаболизма органических соединений.

Оценка значимости видового богатства по такому критерию как количество ОТЕ выявила низкую достоверность кластеризации бактериальных сообществ (p -value = 0.12, PERMANOVA, Bray-Curtis). Однако оценка влияния экологических факторов (температуры и аэрации), а также степени утилизации токсичных соединений на изменение разнообразия, состава и структуры бактериальных сообществ показала высокую достоверность (p -value = 0.05) формирования трех кластеров в зависимости от условий культивирования рудной массы (рис. 3, Б). Таким образом, полученные результаты подтверждают влияние экологических условий, таких как температура и аэрация, а также содержание токсичных соединений на состав и структуру бактериальных сообществ.

Показано, что **структура бактериальных сообществ**, развивающихся в естественных условиях рудного штабеля КВ и в модельном эксперименте, была сходна. Доминирующие филоциты отнесены к 4 филумам (*Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes* и *Bacteroidetes*), самой крупной из которых выступала

Proteobacteria (от 92.9 до 98.2% в суммарном микробиоме). Доминирующие флотипы бактериального сообщества, развивающегося в естественных условиях рудного штабеля КВ идентифицированы на уровне рода как *Serratia* (43.5% в сообществе), *Hydrogenophaga* (25.6%), *Achromobacter* (24.3%), *Malikia* (1.8%), *Bordetella* (1.6%) и *Silanimonas* (1.4%). Доля флотипов *Sphingomonas* и *Microcella* в бактериальном сообществе составляла от 0.9 до 0.01%, поэтому они были отнесены к минорным.

Изучение разнообразия бактериальных сообществ в условиях зонирования рудного штабеля КВ показало, что при положительных температурах и аэрации в бактериальных сообществах преимущественно развивались представители рода *Hydrogenophaga* (22.9–86.0%), а также отмечали увеличение доли минорного флотипа *Microcella* (рис. 4, А и Б). При отрицательных температурах и без аэрации представленность флотипов была сходной, преобладали представители *Serratia* (35.2–61.0%) и *Achromobacter* (35.1–49.2%), и увеличивалась доля *Sphingomonas* (рис. 4, А и В).

Данные результаты свидетельствуют, что представители родов *Serratia* и *Achromobacter* обладают широким адаптационным температурным диапазоном и способны проявлять свою метаболическую активность в условиях резко-континентального климата.

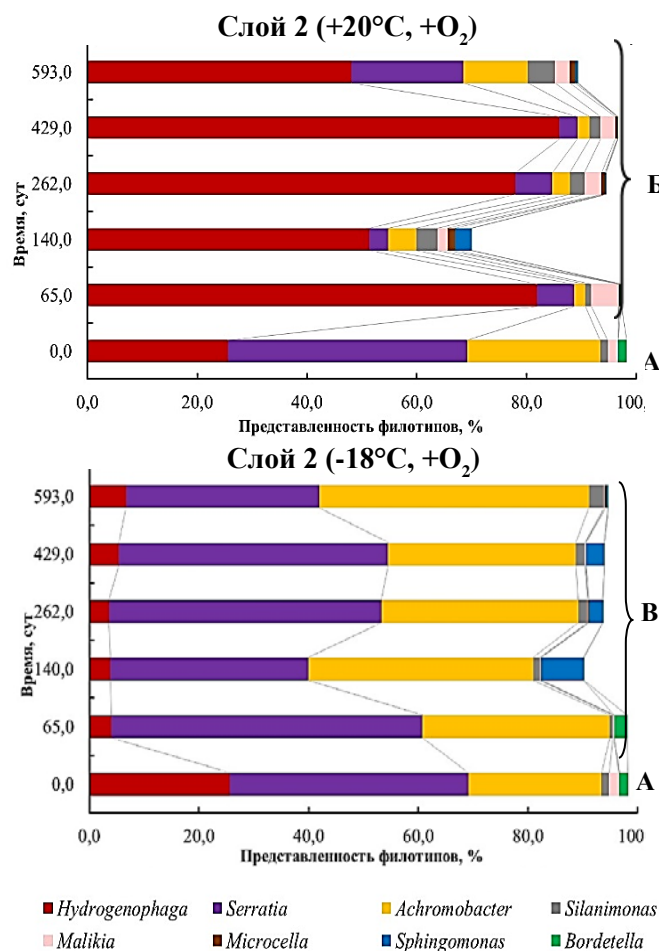


Рисунок 4. Доля основных флотипов в сообществах, развивающихся в естественных (А – исходная рудная масса) и модельных условиях (Б – слой 2 (летний период); В – слой 2 (зимний период))

3.1.4 Выявление бактерий, выступающих маркерами процессов деструкции цианидсодержащих соединений в складированных отходах КВ золота

Учитывая более эффективную деструкцию цианидов в модельных условиях слоя 2 (летний период) и слоя 3 при участии микроорганизмов, а также положительную корреляцию уменьшения концентрации цианидов и снижения доли представленности *Serratia* и *Achromobacter* в бактериальном сообществе (рис. 5), выдвинуто предположение, что развитие этих представителей связано с присутствием цианидов в составе рудной массы. Повидимому, бактерии родов *Achromobacter* и *Serratia* способны использовать цианиды в своих биохимических реакциях и с уменьшением концентрации CN⁻

в среде происходит существенное снижение их доли в сообществе. Незначительное увеличение их доли к концу эксперимента можно объяснить высокой адаптационной способностью этих микроорганизмов (рис. 5).

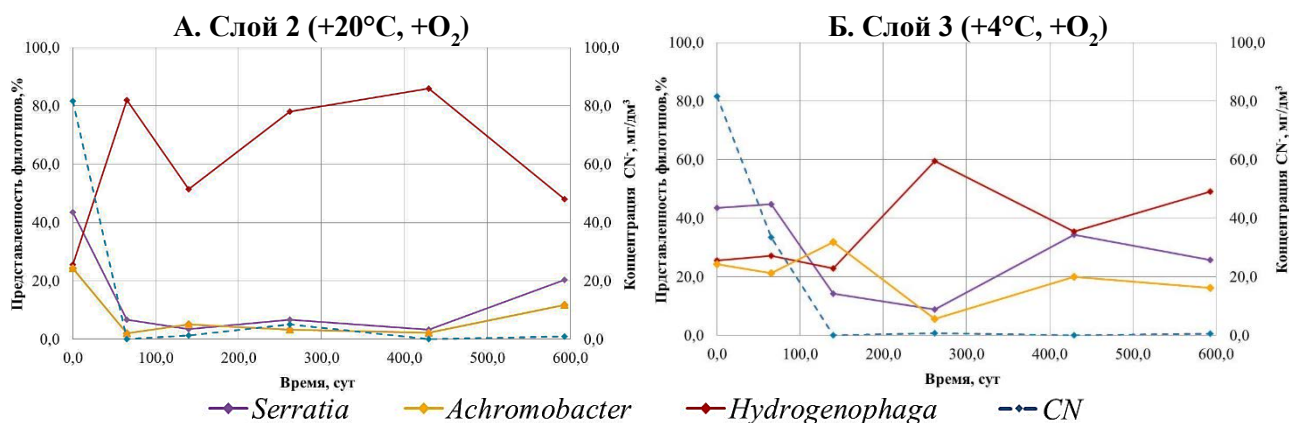


Рисунок 5. Зависимость изменения концентраций цианидов и представленности филотивов *Serratia*, *Achromobacter* и *Hydrogenophaga* определенных в естественных условиях и развивающихся в модельном эксперименте рудного штабеля КВ (А – слой 2 (летний период), Б – слой 3)

Аналогичная зависимость прослеживалась и для представителей рода *Bordetella*. На основании полученных результатов и литературных данных [Fuji et al., 1973; Kumar et al., 2013; Huddy et al., 2015 и др.], представители родов *Achromobacter*, *Serratia* и *Bordetella* отнесены к маркерам процессов деструкции цианидсодержащих соединений в складываемых отходах КВ золота.

Другой тип зависимости наблюдали для фило типа *Hydrogenophaga*. Его представленность возрастала после деструкции цианидов (рис. 5). Это свидетельствовало об использовании данными бактериями для реализации своей жизнедеятельности не цианидов, а их метаболитов, образующихся в результате деструкции. Литературные данные [Huddy et al., 2015; Kantor et al., 2015] так же подтверждают этот факт. Учитывая, что для фило типов *Microcella*, *Silanimonas* и *Sphingomonas* отмечено увеличение доли в бактериальном сообществе при снижении концентрации цианидов, они отнесены к цианидрезистентным бактериям и совместно с представителями *Hydrogenophaga* – к сопутствующим участникам деструкции цианидов.

3.2 Влияние экологических факторов на разнообразие автохтонных бактериальных сообществ природно-техногенных комплексов КВ золота

Учитывая, что основными участниками деструкции цианидсодержащих соединений выступают доминирующие представители бактериальных сообществ, проводили анализ их разнообразия в технологических растворах и рудном штабеле КВ, отобранных на месторождениях «Бабушкина гора» (Красноярский край), «Чазы Гол» (Республика Хакасия) и «Самолазовское» (Республика Саха (Якутия)) с помощью молекулярного клонирования генов 16S рРНК. Это позволило выявить влияние таких экологических факторов, как территориальной расположенности, разнофазности природно-техногенных комплексов КВ, а также химического и минерального состава руд на развитие функционально значимых групп бактерий.

Сравнительный анализ бактериальных сообществ всех четырех природно-технологических комплексов КВ показал наличие трех общих ОТЕ (рис. 6), доля которых варьировала от 26.7 до 76.0%. Уникальные ОТЕ выявлены только для месторождения «Чазы Гол» – 4 ОТЕ.

Среди общих фило типов для всех четырех месторождений доминировали *Achromobacter* и *Serratia*, которые ранее определены как маркеры деградации цианидсодержащих соединений. Это подтверждает их важную функциональную роль в составе бактериальных сообществ независимо от территориального расположения месторождений, а также химического и минерального состава руд. Сопутствующие участники деградации цианидов (*Hydrogenophaga*, *Silanimonas* и *Sphingomonas*) были идентифицированы в бактериальных сообществах двух или трех месторождений (рис. 6).

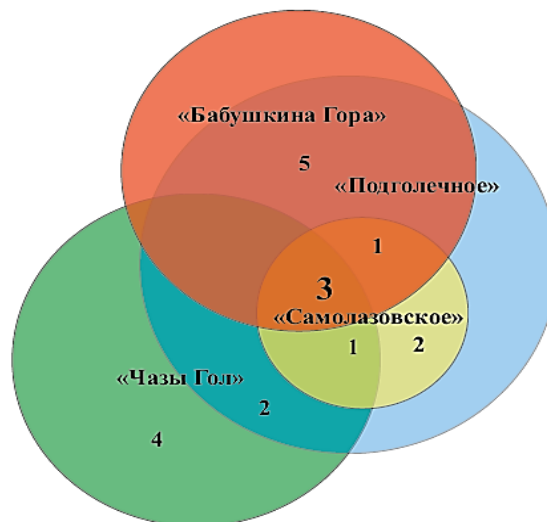


Рисунок 6. Диаграмма Венна, демонстрирующая число общих и уникальных ОТЕ в бактериальных сообществах исследуемых месторождений

Их представленность может быть обусловлена особенностями химического и минерального состава руд изучаемых месторождений.

В связи с тем, что отходы КВ золота представляют собой разнофазную систему: рудный штабель и технологический раствор, разнообразие доминирующих представителей бактериальных сообществ оценивали отдельно в технологическом растворе и рудной массе штабеля КВ.

Результаты показали, что представители бактериальных сообществ в технологическом растворе отнесены к трем филумам (*Actinobacteria*, *Proteobacteria* и *Firmicutes*), а представители рудного штабеля – к двум (*Actinobacteria* и *Proteobacteria*). Представленность фило типов в технологическом растворе составила 5 ОТЕ, а в рудном штабеле – 6 ОТЕ (рис. 7), при этом существенно варьировала доля каждого фило типа в структуре сообществ.

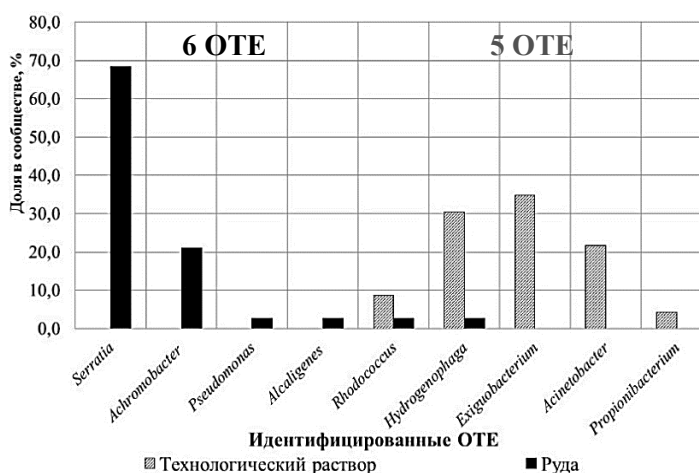


Рисунок 7. Разнообразие доминирующих представителей (ОТЕ) бактериальных сообществ, развивающихся в технологическом растворе и рудной массе штабеля КВ

В бактериальном сообществе технологического раствора она составляла от 5 до 34.8%, а в рудной массе отмечалось явно выраженное преобладание представителей рода *Serratia*, доля которых составила 68.4% (рис. 7).

Таким образом, несмотря на то, что в процессе КВ рудный штабель и технологический раствор тесно связаны между собой в системе непрерывного цикла, структура их бактериальных сообществ различалась. При орошении технологическим раствором рудного штабеля происходит уменьшение разнообразия и изменение структуры сообществ. Бактерии, выступающие маркерами деструкции цианидов (*Serratia* и *Achromobacter*), преимущественно развиваются в рудном штабеле. Дополнительно филогенетическим анализом определено, что независимо от различия в структуре сообществ природно-техногенных комплексов КВ, для их представителей прослеживалась экологическая обособленность. Эта особенность заключается не только в их резистентности к определенному фактору среды, но и в генетическом сходстве географически отдаленных штаммов микроорганизмов.

3.3 Разработка технологии биодетоксикации отходов КВ золота на примере месторождения «Подгольное»

По результатам проведенных исследований была разработана технология биодетоксикации промышленного комплекса КВ месторождения «Подгольное», которая базируется на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества. Данная технология исключает применение химических реагентов, позволяет оптимизировать водный баланс и использовать метод испарения излишков вод из отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду. Для интенсификации процесса биодетоксикации токсичных соединений, рудный штабель КВ рекомендовано орошать технологическими растворами и образующимися дренажными водами при обезвоживании рудной массы. В целях модернизации отделения орошения необходимо использовать оросительную систему с вращающимися эмиттерами типа Wobbler (Senninger Irrigation Inc., США). Дополнительно рекомендовано введение мероприятий по уборке и вывозу снега за пределы промышленной площадки КВ.

На основании полученных результатов для промышленной площадки КВ (с четырьмя рудными штабелями по 200000 т) были рассчитаны основные технологические параметры предлагаемой технологии: плотность орошения 1 м² поверхности штабеля – 190 л/сут; периодичность орошения при импульсном режиме – 1–6 сут; продолжительность обезвреживания – 1095.0 сут; продолжительность операции испарения технологических растворов и дренажных вод за первый теплый сезон обезвреживания – 150 сут. Разработанные технологическая и аппаратурная схемы процесса биодетоксикации отходов КВ, а также основные представители автохтонного бактериального сообщества, осуществляющие деструкцию цианидсодержащих соединений и выявленные в ходе лабораторных исследований на реальных отходах КВ, приведены на рисунках 8 и 9.

Процесс биодетоксикации предлагается начинать в теплый период на следующий год после прекращения операции выщелачивания золота. В соответствии с аппаратурной схемой (рис. 9), технологические растворы и

дренажи испаряются в системе, состоящей из рудного штабеля и прудов-накопителей. Подача промывных вод на рудный штабель осуществляется насосом, а орошение рудного штабеля происходит с помощью системы с эмиттерами типа Wobbler. Сбор дренажей проводится дренажной системой, по которой воды поступают в пруд-накопитель (рис. 9). В процессе проводимых мероприятий необходимо обеспечить уборку и вывоз снега, контроль за ходом процесса и мониторинг состояния окружающей среды.

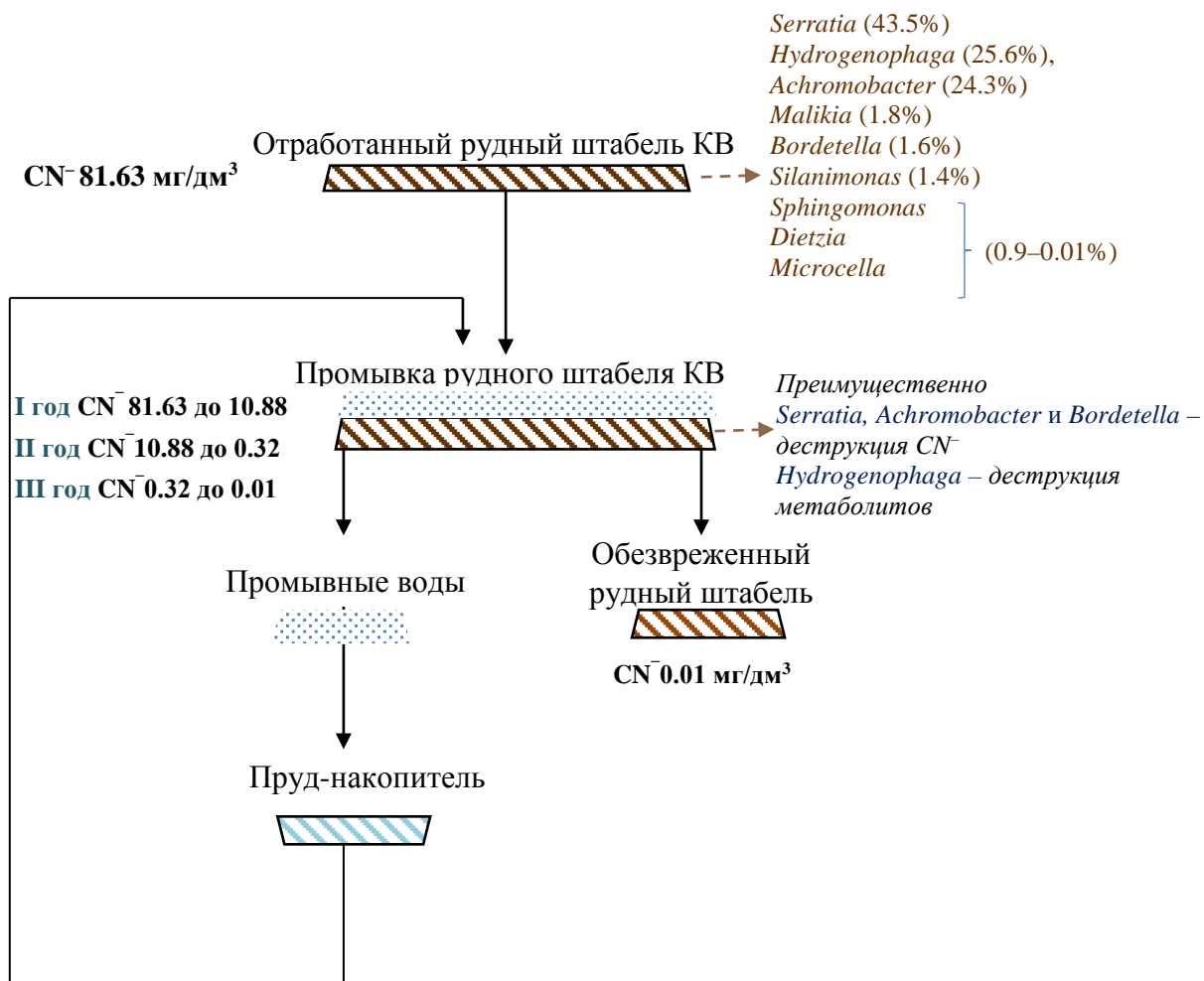


Рисунок 8. Технологическая схема процесса биодетоксикации рудного штабеля КВ с модернизированным отделением орошения

Биодетоксикация основных токсичных соединений рудного штабеля КВ обеспечивает снижение концентраций цианидов с 81.63 до 0.05 мг/дм^3 , тиоцианатов – с 13.3 до 0.17 мг/дм^3 , меди и никеля – с 20.3 и 0.5 мг/дм^3 до менее 0.05 и менее 0.03 мг/дм^3 соответственно. Это свидетельствует о том, что состав отходов после трех лет биодетоксикации является экологически безопасным и удовлетворяет нормам НДС для района расположения предприятия месторождения «Подголецное». После завершения биодетоксикации на четвертый год рекомендуется провести рекультивацию рудного штабеля КВ.

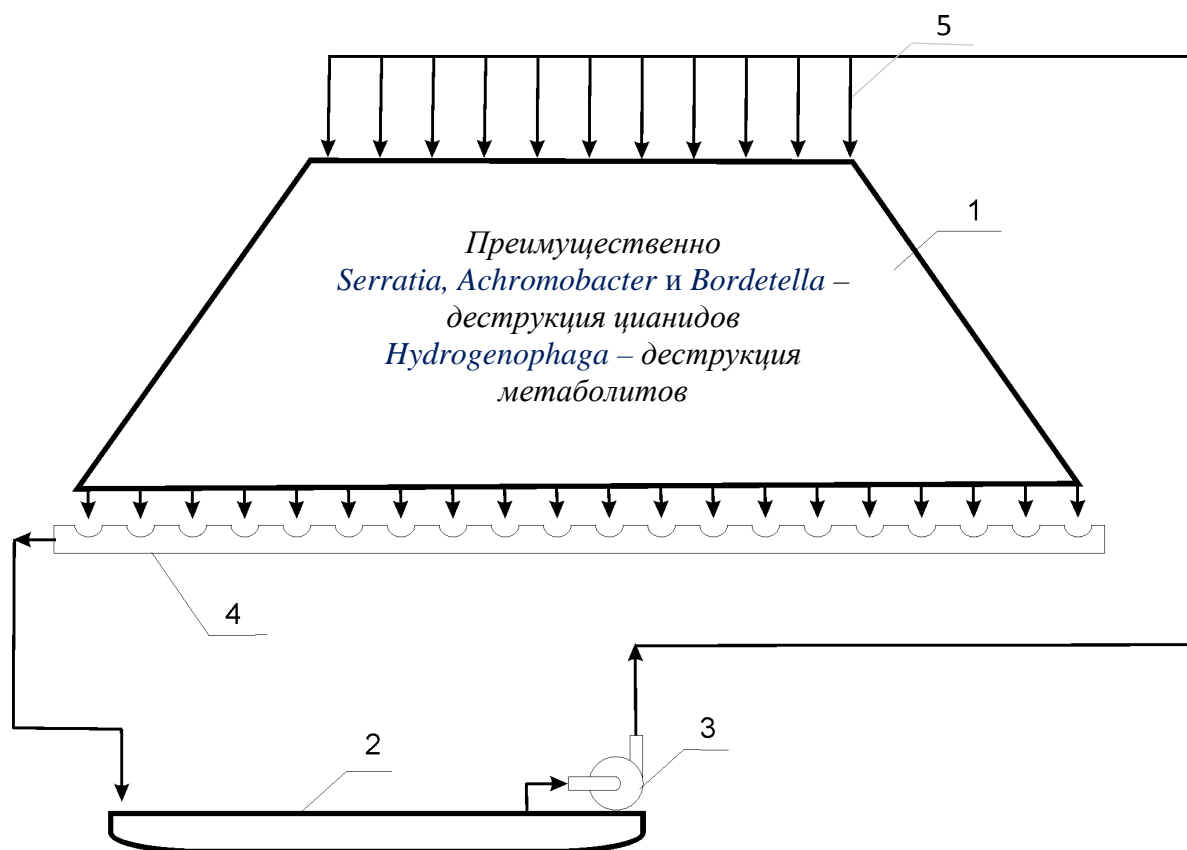


Рисунок 9. Аппаратурная схема процесса биодетоксикации рудного штабеля КВ золота с модернизированным отделением орошения. 1 – рудный штабель; 2 – пруд-накопитель; 3 – насос; 4 – система сбора дренажа; 5 – оросительная система с эмиттерами типа Wobblers

Разработанные технологическая и аппаратурная схемы процесса биодетоксикации предполагают отсутствие реагентов и использование существующей инфраструктуры предприятия КВ. Это обеспечивает снижение эксплуатационных и капитальных затрат на проведение природоохранных мероприятий по сравнению с классической технологией обезвреживания (щелочное хлорирование с последующей обработкой сульфатом двухвалентного железа). Ожидаемый экономический эффект применения технологии биодетоксикации площадки КВ золота месторождения «Подгольское» составляет 151429.7 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование разнообразия, состава, структуры и функциональных особенностей автохтонных бактериальных сообществ, развивающихся в цианидсодержащих отходах КВ как в естественных условиях разных природно-техногенных комплексов, так и в модельных экспериментах. Комплексное использование физико-химических, современных молекулярно-генетических и статистических методов позволило выявить значимые функциональные группы в составе автохтонных бактериальных сообществ и определить их потенциальное участие в детоксикации токсичных соединений.

Впервые изучена роль автохтонного бактериального сообщества в пассивной детоксикации рудного штабеля КВ с учетом его зонирования и неоднородности с точки зрения температурного режима и условий аэрации. Показано, что биотический фактор играет преимущественную роль в деструкции цианидов, включая цианидные комплексы меди и никеля, и тиоцианатов по сравнению с химическим окислением. Выявленные закономерности пассивной детоксикации отходов КВ золота на примере месторождения «Подголецное» позволили рассчитать кинетические параметры биодетоксикации.

Впервые показано, что в модельных условиях складываемых отходов КВ золота экологические факторы (температура и аэрация), а также степень утилизации токсичных соединений влияют на изменение разнообразия, состава и структуры бактериальных консорциумов. Доминирующие представители бактериального сообщества – представители родов *Achromobacter* и *Serratia* выступают как маркеры деструкционных процессов. При этом данные представители идентифицированы в естественных условиях в складываемых отходах различных объектов КВ золота независимо от территориального расположения, а также минерального и химического состава руд.

По результатам проведенных исследований была разработана технология биодетоксикации промышленного комплекса КВ месторождения «Подголецное», которая базируется на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества. Данная технология исключает применение химических реагентов. Модернизация отделения орошения и рекомендуемые мероприятия по уборке и вывозу снега с площадки КВ позволяют использовать метод испарения излишков вод из отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду. На основании технологических параметров состав отходов после трех лет биодетоксикации станет экологически безопасным и будет удовлетворять нормам НДС для района расположения месторождения «Подголецное». Разработанные технологическая и аппаратная схемы процесса биодетоксикации рудного штабеля КВ с использованием существующей инфраструктуры предприятия позволяют минимизировать эксплуатационные и капитальные затраты на проведение природоохранных мероприятий.

Таким образом, настоящее диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой, в которой определена роль автохтонных бактериальных сообществ в детоксикации цианидсодержащих отходов КВ золота и решена актуальная экологическая проблема по их обезвреживанию.

ВЫВОДЫ

1. В модельных экспериментах показано, что интенсивная биодеструкция цианидов происходит при положительных температурах и аэрации, тиоцианатов – при отрицательных температурах. В присутствии биотического фактора скорость деструкции цианидов в 4 и 6 раз превышает химическое окисление, цианидных комплексов меди и никеля – в 10 раз. Для прогноза

поведения токсичных соединений в реальных отходах КВ рассчитаны аппроксимирующие уравнения первого порядка и константы скорости реакции детоксикации при различных температурах и условиях аэрации. Установлено, что в присутствии биотического фактора рудный материал обладает высокой буферностью, что в дальнейшем исключает образование кислых дренажных вод.

2. Непараметрическим многомерным статистическим анализом показана достоверность влияния таких экологических факторов как температура и аэрация, а также степени утилизации токсичных соединений на разнообразие, состав и структуру бактериальных сообществ, развивающихся в рудной массе в условиях модельного эксперимента.

3. Установлено, что в рудном штабеле КВ бактериальные сообщества имеют невысокое видовое разнообразие с доминированием представителей филы *Proteobacteria*. Представители данной филы – рода *Achromobacter* и *Serratia* адаптированы к широким диапазонам температур и выступают маркерами процессов деструкции цианидов, в том числе цианидных комплексов меди и никеля. Бактерии рода *Hydrogenophaga* потенциально способны к деструкции метаболитов, образующихся при деградации цианидов.

4. Определено, что автохтонные бактериальные сообщества месторождений, расположенных на территории Красноярского края («Бабушкина Гора»), Республики Хакасия («Чазы Гол») и Республики Саха (Якутия) («Самолазовское», «Подгоlechное») имеют большое сходство. Во всех развиваются представители родов *Achromobacter* и *Serratia*, которые являются маркерами деструкции цианидсодержащих соединений. На их развитие не влияет территориальная расположенность месторождений, а также химический и минеральный состав их руд.

5. Показано, что разнофазность природно-техногенных комплексов КВ влияет на структуру бактериальных сообществ. Бактерии родов *Serratia* и *Achromobacter* преимущественно развиваются в рудном штабеле КВ. Представители автохтонных бактериальных сообществ рудного штабеля КВ и технологического раствора имеют экологическую обособленность, которая заключается не только в их резистентности к определенному фактору среды, но и в генетическом сходстве географически отдаленных штаммов микроорганизмов.

6. Разработана технология биодетоксикации площадки КВ золота, которая исключает применение химических реагентов и обеспечивает снижение концентраций цианидов с 81.63 до 0.05 мг/дм³, тиоцианатов – с 13.3 до 0.17 мг/ дм³, меди и никеля – с 20.3 и 0.5 мг/ дм³ до менее 0.05 и менее 0.03 мг/ дм³ соответственно. Она позволяет оптимизировать водный баланс и использовать метод испарения излишков вод из отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду. Ожидаемый экономический эффект применения разработанной технологии биодетоксикации площадки КВ месторождения «Подгоlechное» составляет 151429.7 тыс. руб.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Белых, М.П.** Разработка технологии биопассивной детоксикации складированных отходов кучного выщелачивания золота / М.П. Белых, А.Ю. Чикин, С.В. Петров, Н.Л. Белькова // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук (Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых). – 2017. – Т. 40, №3. – С. 107–117.
2. **Белых, М.П.** Технология биопассивной детоксикации цианидсодержащих соединений в отходах кучного выщелачивания золота / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Вестник Забайкальского государственного университета. Научное направление: «Науки о Земле». – 2017. – Т.23, №10. – С.4–13.
3. **Белых, М.П.** Детоксикация цианидов микробными консорциумами из природно-техногенных комплексов кучного выщелачивания золота / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Р.В. Адельшин, Н.Л. Белькова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2017. – Т. 53, №3. – С. 291–298.
4. **Белых, М.П.** Генетическое разнообразие бактерий, адаптированных к цианидсодержащим соединениям в техногенных экосистемах, выделенное по последовательностям 16S рДНК / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Сибирский экологический журнал. – 2016.– № 5. – С. 684–696.
5. **Белых, М.П.** Автохтонные микробные сообщества из отходов кучного выщелачивания золотосодержащих руд: путь к решению проблемы загрязнения окружающей среды / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, И.Н. Стоянов, Н.Л. Белькова // Известия Иркутского государственного университета. Серия: «Биология. Экология». – 2014. – Т. 9. – С. 55–67.

Прочие публикации

6. **Belykh, M.P.** Detoxification of heap after gold leaching using biodegradation / M.P. Belykh, S.V. Petrov, A.Yu. Chikin, G.I. Voiloshnikov, N.L. Belkova // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 262. – P. 587–590.
7. **Белых, М.П.** Скрининг и изоляция бактериальных штаммов, обладающих биотехнологическим потенциалом к деструкции цианидсодержащих соединений в условиях резко-континентального климата / М.П. Белых, В.Ф. Петров, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Золотодобыча. – 2015. – №11 (204). – P. 14–18.
8. **Belykh, M.P.** Screening and isolation of bacterial strains with the biotechnological potential to destruct cyanide-bearing compounds under the conditions of extreme continental climate / M.P. Belykh, S.V. Petrov, V.F. Petrov, A.Yu. Chikin, N.L. Belkova // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1130. –P. 19–22.
9. **Белых, М.П.** Роль бактериального фактора в детоксикации отходов кучного выщелачивания золота / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения 2016)». – Санкт-Петербург, 2016. – С. 416–419.
10. **Белых, М.П.** Биотехнологический потенциал автохтонных бактериальных сообществ в детоксикации отходов кучного выщелачивания золота / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы Международной научно-практической конференции «Биотехнологии в комплексном развитии регионов». – Москва, 2016. – С. 11.
11. **Белых, М.П.** *Pseudomonas stutzeri* – перспективный штамм для решения экологических задач переработки техногенного сырья предприятий

золотодобывающей промышленности, расположенных в условиях резко-континентального климата / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю.Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы Международного совещания «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатительного минерального сырья (Плаксинские чтения 2015)». – Иркутск, 2015. – С. 496–499.

12. **Белых, М.П.** Разнообразие и биотехнологический потенциал микроорганизмов, устойчивых к цианидсодержащим соединениям / М.П. Белых, В.Ф. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы VIII Московского Международного Конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития». – Москва, 2015. – Часть. 3 – С. 17–18.

13. **Белых, М.П.** Способ выделения в чистую культуру микроорганизмов, утилизирующих цианид и тиоцианат / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы VII Всероссийского с международным участием конгресса молодых ученых биологов «Симбиоз-России 2014». – Екатеринбург, 2014. – С. 92–94.

14. **Белых, М.П.** Разнообразие микробных сообществ, адаптированных к цианидсодержащим соединениям в системе рудный штабель – технологический раствор / М.П. Белых, С.В. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы IV Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Экологические проблемы Байкальского региона». – Улан-Удэ, 2014. – С. 65–69.

15. **Белых, М.П.** Биотехнологический потенциал микробных сообществ отходов кучного выщелачивания золотосодержащих руд / М.П. Белых, В.Ф. Петров, А.Ю. Чикин, Н.Л. Белькова // Материалы VI Всероссийского с международным участием конгресса молодых ученых биологов «Симбиоз-России 2013». – Иркутск, 2013. – С. 58–60.

БЕЛЫХ Марина Петровна

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ БАКТЕРИАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ В ДЕТОКСИКАЦИИ
ЦИАНИДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Подписано к печати 12.01.2018 г.

Формат 60*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 799.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.

664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.

