

УДК 33.7:622.7:66.0

DOI: 10.34670/AR.2025.81.33.019

Экономические перспективы использования биотехнологий в добыче и обогащении твёрдых полезных ископаемых

Попов Сергей Михайлович

Доктор экономических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории геолого-структурного моделирования,
Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук,
117997, Российская Федерация, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32-1;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Олевинская Екатерина Владимировна

Кандидат экономических наук,
заместитель директора центра стратегического
менеджмента и конъюнктуры сырьевых рынков,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
119049, Российская Федерация, Москва, Ленинский просп., 4;
e-mail: olevinskaia.ev@misis.ru

Аннотация

В статье представлены инновационные технологические возможности и опыт применения биотехнологий в горнодобывающей промышленности. Анализируются экономические преимущества и ограничения, возникающие при сравнении капитальных и эксплуатационных затрат на использование традиционных и биотехнологических методов добычи, переработки руд и обеспечения сохранности потенциала окружающей среды. Инновационные решения в области биотехнологий позволяют повысить селективность и эффективность биовыщелачивания и биосорбции. Отмечается растущий интерес к биологическому обогащению как к экономически эффективной и устойчивой альтернативе, особенно в условиях развития циклической экономики. Анализируются мировые тенденции, связанные с ростом спроса на критические металлы и усилением экологических требований. Сформулирован вывод о целесообразности расширения научных поисков и практики применения биотехнологий для добычи и переработки бедных руд, хвостов и электронных отходов.

Для цитирования в научных исследованиях

Попов С.М., Олевинская Е.В. Экономические перспективы использования биотехнологий в добыче и обогащении твёрдых полезных ископаемых // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 9А. С. 193-202. DOI: 10.34670/AR.2025.81.33.019

Ключевые слова

Биотехнологии, биомайнинг, твёрдые полезные ископаемые, экономика, перспективы, устойчивое развитие, инновации, экономическая эффективность.

Введение

Развитие мировой экономики сопровождается ростом потребности в стратегических и редких металлах, используемых в энергетике, транспорте и высокотехнологичных отраслях.

В современных условиях традиционные методы добычи, обогащения и переработки минерального сырья часто оказываются нерентабельными в связи с истощением месторождений с высоким содержанием извлекаемого полезного ископаемого, снижением качества добываемых ресурсов, ростом затрат на добычу и экологических издержек [Абрамов, 2005; Watling, 2020; Головин, 2021].

В связи с этим при добыче металлов из руд и отходов в мире все больше внимания уделяется подходу, основанному на использовании микроорганизмов (биомайнинг) [Belyi, Tepikina, 2023; Хайнасова, 2019]. На сегодняшний день около 5 % от мировой добычи золота и 15 % меди получают с использованием биотехнологий.

Основная часть

Одним из наиболее распространённых и коммерчески эффективных способов биомайнинга является биовыщелачивание (дамповое, кучное, подземное, чановое) – это биотехнология извлечения металлов с помощью микроорганизмов. Дамповое и кучное биовыщелачивание особенно актуально для извлечения золота, меди из труднообогатимых руд и рудного материала (хвостов и отходов металлургических производств), непригодного для использования в биореакторных установках. Чановое выщелачивание с использованием каскада биореакторов отличается скоростью извлечения металла (от нескольких часов до нескольких суток) и экологичностью (из-за замкнутости процесса вредные выбросы практически отсутствуют) [Хайнасова, 2019].

Широко применяются, дополняя и расширяя возможности биомайнинга такие специализированные биотехнологии как:

– биобенефициация – метод обогащения и улучшения качества рудного сырья.

Микроорганизмы воздействуют на химико-физические свойства минералов, что способствует извлечению, дальнейшей переработке и увеличению концентрации извлекаемого металла в сырье;

– биорековери – метод восстановления металлов их растворов после выщелачивания.

Данный биотехнологический метод, как правило, используют при переработке смешанного рудного сырья, что позволяет обеспечить селективное выделение металлов, увеличить их выход и снизить потери на последующих этапах разработки.

Совместно с биотехнологиями по извлечению металлов из руд, минеральных и электронных отходов для восстановления природной среды используют такие методы как:

– биоремедиация – очистка загрязнённых территорий с помощью микрорганизмов, которые расщепляют и нейтрализуют вредные вещества;

– биосорбция – извлечение загрязняющих веществ из растворов или горных пород с помощью микроорганизмов.

В мировой практике проводились теоретические, экспериментальные и опытно-промышленные исследования, подтверждающих преимущества приведенных выше биотехнологических методов по сравнению с традиционными. Среди примеров успешных реализованных исследовательских проектов особое внимание вызывают:

1. Проект по биовыщелачивание меди из низкосортных хвостов в США. Исследование

продемонстрировало извлечение 84-90% меди с помощью микробного консорциума, обогащенного элементарной серой, для получения органических кислот, подобных биосурфактантам. Биовыщелачивание проводилось непосредственно на хвостах рудника, что позволило извлекать металлы и одновременно устранять загрязнения. Процесс проходил при почти нейтральном pH, что снижало коррозию оборудования и проблемы с его обработкой. Этот проект продемонстрировал значительные экологические и экономические преимущества, включая сокращение отходов и энергопотребления по сравнению с традиционными методами.

2. Пилотный проект по извлечению редкоземельных металлов, реализуемый в Великобритании под руководством Кентского университета и его партнеров. Исследования проводились с разным уровнем масштабирования от лабораторных до промышленных. Для извлечения и очистки критически важных редкоземельных элементов кобальта, лития и индия из промышленных, техногенных отходов и загрязненных территорий в проекте интегрированы методы биовыщелачивания, бирековери и биоремедиации. Параллельно исследовалась возможность применения метода фитодобычи с использованием растений, аккумулирующих редкоземельные металлы из почвы.

Интеграция различных биотехнологий позволяет создавать комплексный биотехнологический цикл, расширяющий возможности ресурсного потенциала и минимизирующий негативное экологическое воздействие на окружающую среду.

В последнее время биотехнологические достижения направлены на извлечение металлов из нетрадиционного сырья, включая электронные отходы. Эти инновации используют модифицированные микроорганизмы для повышения селективности и эффективности биовыщелачивания и биосорбции, предлагая устойчивые пути поставок критически важных минералов.

Исследовательские и пилотные проекты демонстрируют повышение показателей извлечения полезных ископаемых, обеспечивая доступность ресурсов и продлевая срок службы рудника, наряду с экономической выгодой за счет изменения структуры затрат, что позиционирует биотехнологии как устойчивую и экономически привлекательную альтернативу для современных горнодобывающих предприятий [Седельникова, 2017; Башлыкова и др., 2015].

На формирование объема и структуры затрат при применении биологического метода обогащения, главным образом, влияет сокращение капитальных, материально-технических затрат и затрат на охрану окружающей среды.

Для биологического обогащения часто требуется более длительное время обработки, что увеличивает длительность производственного цикла, но при этом, благодаря более простым технологическим схемам, используется менее сложные оборудование и инфраструктура, что позволяет снизить капитальные вложения.

Сокращение затрат связано с:

- энергопотреблением – процесс биовыщелачивания осуществляется при температуре и давлении окружающей среды, что позволяет сократить потребление энергии до 50%, по сравнению с традиционными методами. Это снижает эксплуатационные расходы, делая процесс более экономически выгодным;
- используемым сырьем – агрессивные химикаты заменяются природными микробными агентами, такими как микроорганизмы или ферменты, что может снизить затраты на химические реагенты, но требует затрат микробных культур, мониторинга процесса и поддержания оптимальной микробной активности. Хотя они, как правило, ниже, чем затраты на энергию и химикаты при традиционной добыче, текущие эксплуатационные расходы зависят от типа руды, эффективности микроорганизмов и времени обработки,

которое, как правило, больше, чем при традиционном способе. Тем не менее, более низкие трудоемкость и требования к инфраструктуре способствуют росту общей рентабельности.

Ввиду минимального количества токсичных побочных продуктов и более щадящих условий обработки требуются значительно более низкие затраты на предупреждение и ликвидацию загрязнения окружающей среды и переработку отходов.

Результаты

анализа

[Абрамова, Благовидов, 2017; Сараев, 2023; Белоброва, Диденко, 2021; Сачковидр., 2025; Седельникова, 2019] позволяют сделать вывод о том, что биологическое обогащение обеспечивает значительные преимущества в плане энергосбережения, соблюдения экологических норм и снижения капитальных затрат, хотя может потребовать более длительного процесса и расходов на устранения микробиологического загрязнения. Напротив, традиционные методы характеризуются более высокой скоростью извлечения полезного ископаемого, но более высокими затратами на сырье, энергию и охрану окружающей среды, что часто компенсируется достигнутой эффективностью. Этот экономический компромисс обуславливает растущий интерес к биологическому обогащению как к экономически эффективной и устойчивой альтернативе, особенно для переработки бедных руд и в регионах, где экологические нормы и стоимость энергии являются критически важными факторами [Кусковидр., 2019; Ленская, 2025].

К наиболее успешным примерам применения биотехнологий в реальном секторе экономики при освоении минерально-сырьевых ресурсов в мировой практике можно отнести ряд крупных проектов, подтверждающих возможность экономически эффективно перерабатывать бедные руды и отходы:

- биовыщелачивание применяют для извлечения черных и цветных металлов на крупнейших месторождениях медных руд в Чили (Escondida, Chuquicamata) и Перу (Cerro Verde); в Австралии – для извлечения никеля и кобальта на месторождении Мурин-Мурин; в Мексике – для извлечения меди и цинка в условиях ограниченных энергетических ресурсов, что позволило снизить расходы на электроэнергию и топливо; в ЮАР – для извлечения золота из упорных сульфидных руд, что дало возможность значительно повысить коэффициент извлечения золота и снизить экологический ущерб по сравнению с использованием цианидных технологий. Эти проекты показали, что технологии биовыщелачивания способны обеспечивать промышленный масштаб переработки руд с низким содержанием металлов, что ранее было экономически невозможно.
- биовыщелачивание редкоземельных и благородных металлов из электронных отходов применяют в Японии и ЕС. Данный подход позволяет снизить токсичность утилизации электронных отходов и вовлечь в оборот вторичные ресурсы, востребованные для высокотехнологичных отраслей.

Приведённые примеры показывают, что биотехнологии находят применение в различных климатических и экономических условиях. Их эффективность особенно высока в случаях переработки бедных руд; извлечения металлов из хвостов и вторичного сырья; разработки руд, в которых полезное ископаемое находится в трудноизвлекаемой форме.

Эти примеры наглядно иллюстрируют то, как биотехнологии обеспечивают экономически выгодное и экологически устойчивое извлечение ценных металлов, поддерживая циклическую экономику и критически важное минеральное обеспечение для современных технологий.

В настоящее время наблюдается последовательный рост экономической значимости биотехнологий для инновационного развития горнодобывающей промышленности. Это

сопровождается комплексом следующих условий и обстоятельств.

Первое. Глобальное развитие промышленности и технологии чистой энергии стимулируют спрос на минеральные ресурсы, традиционные богатые руды становятся дефицитными. Около 60% мировых запасов полезных ископаемых приходится на бедные руды, добыча которых традиционными методами, как правило, нерентабельна. Биотехнологии, такие как биовыщелачивание, биосорбция и др. позволяют рентабельно извлекать металлы из этих бедных ресурсов. Это создает мощный экономический стимул для горнодобывающих компаний внедрять биотехнологические решения для сохранения конкурентоспособности и устойчивого развития.

Второе. Биотехнологии снижают затраты на переработку, сводя к минимуму необходимость в энергоемких и химически агрессивных методах. Например, микробное выщелачивание позволяет растворять металлы без высоких температур, тем самым снижая потребление энергии и эксплуатационные расходы. Кроме того, такие биотехнологические методы, как биологическое удаление примесей, позволяют снизить затраты на последующую переработку примерно на 30%, что приводит к повышению производительности и сокращению выбросов. Эта экономия средств положительно влияет на показатели финансово-экономической деятельности, что особенно важно для удаленных рудников с дорогостоящей логистикой.

Третье. Биотехнологии значительно снижают воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду. Микроорганизмы облегчают извлечение и очистку металлов, одновременно сокращая вредные выбросы и токсичные отходы. Эти экологические преимущества не только повышают соответствие нормативным требованиям, но и улучшают ESG-профили горнодобывающих компаний (экологические, социальные и управлочные), которые становятся все более важными для доступа к капиталу и позиционирования на рынке. Аспект устойчивого развития является мощным долгосрочным экономическим драйвером, поскольку соблюдение строгих экологических стандартов станет более дорогостоящим при использовании традиционных методов.

Четвертое. Доля продукции полученной биологическими методами растет. Технологические инновации, включая синтетическую биологию, генную инженерию и биоинформатику, повышают микробную эффективность и скорость извлечения металлов, делая биотехнологию конкурентоспособной и масштабируемой для сложных руд и хвостов. Эти достижения ещё больше продвигают биотехнологию из нишевого в основное экономическое решение в секторе добычи полезных ископаемых.

Пятое. Внедрение биотехнологий стимулирует создание высококвалифицированных рабочих мест и поток инвестиций в инфраструктуру в горнодобывающих регионах. Разработка новых биотехнологических процессов способствует развитию местных предприятий в смежных сферах услуг, транспорта и производства оборудования, тем самым способствуя диверсификации региональной экономики. Страны, богатые твердыми полезными ископаемыми, могут использовать биотехнологии для продвижения «вверх» по цепочке создания стоимости, участвуя в промежуточных и конечных этапах, таких как переработка и производство минерального сырья, что приводит к росту экономической активности направленной на получение более высокой добавленной стоимости и увеличение источников дохода.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о росте потенциала и экономической значимости расширения использования биотехнологий в горнопромышленном комплексе.

Экономические перспективы использования биотехнологий при добыче и обогащении твердых полезных ископаемых обусловлены, главным образом, ростом мирового спроса на

минеральные ресурсы, дефицитом первичных природных ресурсов и необходимостью внедрения инновационных методов добычи [Стоянова, 2011; Гончарова, Олевинская, 2025].

Биотехнологии способны революционно изменить добычу полезных ископаемых и открыть масштабные экономические перспективы, что позволит сделать горнодобывающую промышленность более эффективной, устойчивой и экономически выгодной в условиях меняющихся глобальных вызовов и перемен.

Экономические преимущества и факторы, влияющие на стоимость наиболее распространенной среди биотехнологий – технологии биовыщелачивания, включают:

1. Снижение затрат: биопроцессы менее капиталоёмки, чем плавильные мощности, особенно в варианте кучного выщелачивания.
2. Использование низкосортных руд и хвостов: метод позволяет вовлекать в переработку ранее нерентабельное сырьё.
3. Снижение экологических расходов за счет уменьшения выбросов и токсичных отходов, что приводит к сокращению штрафов и затрат на рекультивацию.
4. Доступ к зелёному финансированию, так как проекты с низким углеродным следом имеют преимущество при привлечении инвестиций.

В то же время применение биотехнологий сопряжено с рядом ограничений и рисков, включающих: низкие скорости извлечения металлов увеличивают срок окупаемости; чувствительность к климатическим условиям затрудняет применение в северных регионах; растут сложности реализации пилотных проектов в промышленных масштабах; отсутствует нормативная база и т.д. [Belyi idr., 2018].

К экономическим перспективам масштабирования биотехнологий в добыче и обогащении твёрдых полезных ископаемых, особенно в развивающихся странах, следует отнести:

1. Инвестиции в исследования и разработки: государственное финансирование для поддержки инфраструктуры и инноваций в области биотехнологических исследований; гранты и субсидии университетам, исследовательским центрам и биотехнологическим стартапам, специализирующимся на применении биотехнологий в горнодобывающей промышленности.
2. Наращивание потенциала и развитие человеческого капитала: программы обучения для подготовки квалифицированных ученых, инженеров и техников в области биотехнологий и горнодобывающей промышленности; поддержка технопредпринимателей в коммерциализации биотехнологических инноваций; создание центров или кластеров биотехнологических инноваций для содействия сотрудничеству и обмену знаниями.
3. Финансовые стимулы и налоговая политика: налоговые льготы, сниженные тарифы или освобождение от пошлин на биотехнологическое оборудование и материалы; льготные кредиты и кредитные линии для проектов и стартапов в области биотехнологической добычи; инвестиционные стимулы, связанные с устойчивыми и экологически безопасными технологиями добычи.

4. Нормативно-правовая поддержка и оптимизация. Разработка четкой нормативно-правовой базы для применения биотехнологий в горнодобывающей промышленности: ускоренное получение разрешений и согласований для проектов в области биотехнологической добычи; гармонизация политики для содействия трансграничному сотрудничеству и распространению технологий.

5. Содействие государственно-частному сотрудничеству: поощрение партнерских отношений между правительством, промышленностью и научными кругами; содействие созданию совместных предприятий и заключению соглашений о передаче технологий с мировыми лидерами в области биотехнологий; поддержка инновационных кластеров,

объединяющих опыт в области наук о жизни и горнодобывающей промышленности.

6. Укрепление инновационных экосистем: создание инкубаторов, опытно-промышленных установок и демонстрационных площадок для биотехнологической добычи; инвестиции в платформы в области биоинформатики, синтетической биологии и системной биологии; создание механизмов защиты интеллектуальной собственности и содействия коммерциализации.

7. Стимулирующие меры в области экологического и социального управления: политика поощрения горнодобывающих компаний, внедряющих устойчивые биотехнологии, посредством льготного лицензирования или доступа к рынку; социальные программы, направленные на обеспечение принятия и участия сообщества в инициативах в области биотехнологической добычи полезных ископаемых.

Приведенные выше стимулирующие меры способствуют внедрению и масштабированию биотехнологических решений в горнодобывающей промышленности, помогая развивающимся странам устойчиво использовать местные ресурсы, одновременно наращивая научный и экономический потенциал.

Мировые и российские перспективы масштабирования биотехнологий в минерально-сырьевом комплексе сопряжены с ожидающимся ростом мирового рынка биомайнинга – до 2,5 млрд долларов США к 2032 году. При этом основными целями развития биотехнологий являются: добыча меди в Латинской Америке, золота – в Африке, редкоземел – в Китае и переработка электронных отходов в Европе и Японии. В России потенциал биотехнологий связан с переработкой хвостов золотодобычи и вовлечением в эксплуатацию бедных руд Восточной Сибири [Белый и др., 2023].

Заключение

Биотехнологии обладают значительным экономическим потенциалом инновационного обновления горнодобывающей отрасли. Их внедрение позволяет снизить капитальные и операционные расходы, расширить ресурсную базу и сократить экологические издержки. Несмотря на ряд ограничений, связанных с технологической скоростью и масштабированием, в ближайшие десятилетия ожидается расширение применения биопроцессов особенно в переработке бедных руд, хвостов добычи и отходов.

Библиография

1. Абрамов, А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. – М.: Горная книга, 2005. – ISBN 5-7418-0346-8.
2. Абрамова, Н. А. Перспективы применения биотехнологий в горнодобывающей промышленности / Н. А. Абрамова, А. С. Благовидов // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 74–79. – DOI 10.17580/gzh.2017.07.14.
3. Башлыкова, Т. В. Повышение качества магнетитового концентрата с помощью биотехнологии / Т. В. Башлыкова, Е. А. Ашираева, М. В. Пинясов, Ю. Ю. Фищенко // Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы VIII Московского Международного Конгресса, Москва, 17–20 марта 2015 года. Ч. 2. – М.: Экспо-биохим-технологии, 2015. – С. 264–265.
4. Белоброва, А. С. Биовыщелачивание металлов из труднообогатимых сульфидных металлических руд / А. С. Белоброва, В. А. Диденко // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 14–15 мая 2021 года. – Омск: ОмГТУ, 2021. – С. 133–138.
5. Белый, А. В. Биотехнологический потенциал Красноярского края в горнодобывающей промышленности / А. В. Белый, Н. К. Алгебраистова, Ю. Н. Трубников [и др.] // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сборник докладов XVI международной конференции имени члена-корреспондента РАН Г. Л. Пашкова, Красноярск, 05–08 сентября 2023 года. – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, 2023. – С. 17–30. – DOI 10.47813/sfu.mnfpm.2023.17-30.

6. Головин, А. В. Биотехнологии в горной промышленности // Горный журнал. – 2021. – (номер не указан в исходных данных).
7. Гончарова, А. Р. Наилучшие доступные технологии как инструмент повышения ресурсной эффективности предприятия / А. Р. Гончарова, Е. В. Олевинская // Охрана окружающей среды и заповедное дело. – 2025. – Т. 6, № 3(19). – С. 54–60.
8. Кусков, В. Б. О возможности применения бактериальных методов в процессах переработки минерального и техногенного сырья / В. Б. Кусков, Я. В. Кускова, А. С. Сидорович // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 1(131). – С. 36–43. – DOI 10.26730/1999-4125-2019-1-36-42.
9. Ленская, К. В. Оценка эффективности применения железо-, серо- и марганецокисляющих бактерий для извлечения железа из руд / К. В. Ленская // Экологические проблемы региона и пути их разрешения: материалы XIX Международной научно-практической конференции, Омск, 15–17 мая 2025 года. – Омск: ОмГТУ, 2025. – С. 256–259.
10. Сачков, В. И. Биовыщелачивание золота из отходов горнодобывающей промышленности / В. И. Сачков, И. В. Лушаева, Е. Б. Дайбова [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2025. – № 37. – С. 84–99. – DOI 10.17223/24135542/37/6.
11. Сараев, Б. Н. Биологическое выщелачивание золота из сульфидных руд: исследования, результаты, перспективы // Рациональное освоение недр. – 2023. – № 2(70). – С. 68–70. – DOI 10.26121/RON.2023.64.55.004.
12. Седельникова, Г. В. Достижения в области исследования и промышленной биотехнологии переработки минерального сырья цветных и благородных металлов // Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы IX международного конгресса, Москва, 20–22 февраля 2017 года. Т. 1. – М.: Русские Экспо Дни Групп, 2017. – С. 430–432.
13. Седельникова, Г. В. Использование микроорганизмов в решении проблемы XXI века – освоения техногенных месторождений минерального сырья // Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы международного конгресса, Москва, 25–27 февраля 2019 года. Вып. 17. – М.: Русские Экспо Дни Групп, 2019. С. 445–447.
14. Стоянова, Е. В. Инновационные возможности развития современных природоохранных технологий в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. № 10. – С. 198–200.
15. Хайнасова, Т. С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 47–54. – DOI 10.31897/PMI.2019.1.47.
16. Belyi, A. V., & Tupikina, O. V. (2023). Biooxidation of Gold Ores in Russia and Kazakhstan. In D. B. Johnson, C. G. Bryan, M. Schrömann, & F. F. Roberto (Eds.), *Biomining Technologies. Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes* (pp. 191–208). Springer.
17. Belyi, A. V., Solopova, N. V., & Chernov, D. V. (2018). Development of BIONORD technology on Olimpiada deposit refractory arsenic-gold ores treatment in conditions of Extreme North. *Hydrometallurgy*, 179, 188–191. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.04.010>
18. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation / A. K. Koizhanova, D. R. Magomedov, E. A. Tastanov [et al.] // Metalurgija (Zagreb, Croatia). – 2022. – Vol. 61, No. 3-4. – P. 789–792.
19. Watling, H. (2020). Microbiological achievements in the field of biological leaching: trends and prospects. *Minerals Engineering*.

Economic Prospects for the Use of Biotechnologies in the Extraction and Processing of Solid Minerals

Sergei M. Popov

Doctor of Economics,
Leading Researcher at the Laboratory of Geological and Structural Modeling,
Institute for Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences,
117997, 84/32–1, Profsoyuznaya str., Moscow, Russian Federation;
e-mail: s.popov@inbox.ru

Ekaterina V. Olevinskaya

PhD in Economics,

Deputy Director of the Center for Strategic Management and Commodity Markets,
 National University of Science and Technology MISIS,
 119049, 4, Leninsky ave., Moscow, Russian Federation;
 e-mail: olevinskaya.ev@misis.ru

Abstract

The article presents innovative technological capabilities and experience in the application of biotechnologies in the mining industry. The economic advantages and limitations that arise when comparing the capital and operating costs of using traditional and biotechnological methods of mining, processing ores and preserving the potential of the environment are analyzed. Innovative solutions in the field of biotechnology make it possible to increase the selectivity and efficiency of bio-leaching and biosorption. There is a growing interest in biological enrichment as a cost-effective and sustainable alternative, especially in a cyclical economy. The global trends related to the growing demand for critical metals and increasing environmental requirements are analyzed. The conclusion is formulated on the expediency of expanding scientific research and the practice of using biotechnologies for the extraction and processing of poor ores, tailings and electronic waste.

For citation

Popov S.M., Olevinskaya E.V. (2025) Ekonomicheskie perspektivy ispol'zovaniya biotekhnologii v dobyche i obogashchenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Economic Prospects for the Use of Biotechnologies in the Extraction and Processing of Solid Minerals]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (9A), pp. 193-202. DOI: 10.34670/AR.2025.81.33.019

Keywords

Biotechnology, biomining, solid minerals, economics, prospects, sustainable development, innovation, economic efficiency.

References

1. Abramov, A. A. (2005). *Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya rud tsvetnykh metallov* [Technology of processing and enrichment of non-ferrous metal ores]. Gornaya kniga.
2. Abramova, N. A., & Blagovidov, A. S. (2017). Perspektivy primeneniya biotekhnologii v gornodobyvayushchey promyshlennosti [Prospects for the application of biotechnology in the mining industry]. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], (7), 74–79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.07.14>
3. Bashlykova, T. V., Ashirbaeva, E. A., Pinyasov, M. V., & Fishchenko, Yu. Yu. (2015). Povyshenie kachestva magnititovogo kontsentrata s pomoshch'yu biotekhnologii [Improving the quality of magnetite concentrate using biotechnology]. In *Biotekhnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy VIII Moskovskogo Mezhdunarodnogo Kongressa* [Biotechnology: State and prospects of development: Proceedings of the VIII Moscow International Congress] (Part 2, pp. 264–265). Expo-biokhim-tehnologii.
4. Belobrova, A. S., & Didenko, V. A. (2021). Biovyshchelachivanie metallov iz trudnoobogatimykh sulfidnykh metallicheskikh rud [Bioleaching of metals from difficult-to-process sulfide metal ores]. In *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezdunarodnym uchastiem* [Current issues of energy: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation] (pp. 133–138). OmGTU.
5. Belyi, A. V., Algebraistova, N. K., Trubnikov, Yu. N., [et al.]. (2023). Biotekhnologicheskii potentsial Krasnoyarskogo kraya v gornodobyvayushchey promyshlennosti [Biotechnological potential of the Krasnoyarsk Territory in the mining

- industry]. In *Metallurgiya tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov: sbornik dokladov XVI mezdunarodnoi konferentsii imeni chlena-korrespondenta RAN G. L. Pashkova* [Metallurgy of non-ferrous, rare and noble metals: Proceedings of the XVI International Conference named after Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences G. L. Pashkov] (pp. 17–30). Krasnoyarskii kraevoi Dom nauki i tekhniki RosSNIO. <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.17-30>
6. Belyi, A. V., & Tupikina, O. V. (2023). Biooxidation of Gold Ores in Russia and Kazakhstan. In D. B. Johnson, C. G. Bryan, M. Schrömann, & F. F. Roberto (Eds.), *Biomining Technologies. Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes* (pp. 191–208). Springer.
 7. Belyi, A. V., Solopova, N. V., & Chernov, D. V. (2018). Development of BIONORD technology on Olimpiada deposit refractory arsenic-gold ores treatment in conditions of Extreme North. *Hydrometallurgy*, 179, 188–191. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.04.010>
 8. Golovin, A. V. (2021). Biotehnologii v gornoi promyshlennosti [Biotechnology in the mining industry]. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal].
 9. Goncharova, A. R., & Olevinskaya, E. V. (2025). Nailuchshie dostupnye tekhnologii kak instrument povysheniya resursnoeffektivnosti predpriyatiya [The best available technologies as a tool for improving the resource efficiency of an enterprise]. *Okhrana okruzhayushchey sredy i zapovednoe delo* [Environmental Protection and Conservation], 6(3(19)), 54–60.
 10. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation / A. K. Koizhanova, D. R. Magomedov, E. A. Tastanov [et al.]. (2022). *Metalurgija* (Zagreb, Croatia), 61(3-4), 789–792.
 11. Kuskov, V. B., Kuskova, Ya. V., & Sidorovich, A. S. (2019). O vozmozhnosti primeneniya bakterial'nykh metodov v protsessakh pererabotki mineral'nogo i tekhnogenного syr'ya [On the possibility of using bacterial methods in the processing of mineral and technogenic raw materials]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], (1(131)), 36–43. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-1-36-42>
 12. Lenskaya, K. V. (2025). Otsenka effektivnosti primeneniya zhelezo-, sero- i mangantsokislyayushchikh bakterii dlya izvlecheniya zheleza iz rud [Evaluation of the effectiveness of using iron-, sulfur- and manganese-oxidizing bacteria for extracting iron from ores]. In *Ekologicheskie problemy regiona i puti ikh razresheniya: materialy XIX Mezdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Environmental problems of the region and ways to solve them: Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference] (pp. 256–259). OmGTU.
 13. Sachkov, V. I., Lushchaeva, I. V., Daibova, E. B., [et al.]. (2025). Bivoshchelachivanie zolota iz otkhodov gornodobivayushchey promyshlennosti [Bioleaching of gold from mining waste]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya* [Bulletin of Tomsk State University. Chemistry], (37), 84–99. <https://doi.org/10.17223/24135542/37/6>
 14. Sarayev, B. N. (2023). Biologicheskoe vyshchelachivanie zolota iz sulfidnykh rud: issledovaniya, rezul'taty, perspektivy [Biological leaching of gold from sulfide ores: research, results, prospects]. *Ratsional'noe osvoenie nedr* [Rational Subsoil Development], (2(70)), 68–70. <https://doi.org/10.26121/RON.2023.64.55.004>
 15. Sedelnikova, G. V. (2017). Dostizheniya v oblasti issledovaniya i promyshlennoi biotehnologii pererabotki mineral'nogo syr'ya tsvetnykh i blagorodnykh metallov [Achievements in the field of research and industrial biotechnology of processing mineral raw materials of non-ferrous and noble metals]. In *Biotehnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy IX mezdunarodnogo kongressa* [Biotechnology: State and prospects of development: Proceedings of the IX International Congress] (Vol. 1, pp. 430–432). Russkie Expo Dni Grupp.
 16. Sedelnikova, G. V. (2019). Ispol'zovanie mikroorganizmov v reshenii problemy XXI veka – osvoeniya tekhnogennykh mestorozhdenii mineral'nogo syr'ya [The use of microorganisms in solving the problem of the XXI century – the development of technogenic mineral deposits]. In *Biotehnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy mezdunarodnogo kongressa* [Biotechnology: State and prospects of development: Proceedings of the International Congress] (Issue 17, pp. 445–447). Russkie Expo Dni Grupp.
 17. Stoyanova, E. V. (2011). Innovatsionnye vozmozhnosti razvitiya sovremennykh prirodoobhrannykh tekhnologii v ugo'lnoi promyshlennosti [Innovative opportunities for the development of modern environmental technologies in the coal industry]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* (nauchno-tehnicheskii zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], (10), 198–200.
 18. Watling, H. (2020). Microbiological achievements in the field of biological leaching: trends and prospects. *Minerals Engineering*.
 19. Khainasova, T. S. (2019). Faktory, vliyayushchie na bakterial'no-khimicheskie protsessy pererabotki sulfidnykh rud [Factors affecting bacterial-chemical processes of sulfide ore processing]. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 235, 47–54. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.1.47>