

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/38NZVN226.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тимофеева, С. С. Фитодобыча золота с использованием технической конопли: современное состояние и перспективы / С. С. Тимофеева, Д. В. Ильков // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/38NZVN226.pdf>.

For citation:

Timofeeva S.S., Ilkov D.V. Phytomining of gold using industrial hemp: current state and prospects. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 38NZVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/38NZVN226.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

Исследования проводили на оборудовании Восточно-Сибирского Центра коллективного пользования научным оборудованием «Техносферная безопасность» ИРНИТУ

УДК 622.7:58.085; 58.085; 622.7-027.32/.33; 622.7:502.174

Тимофеева Светлана Семеновна

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия

Заведующий кафедрой «Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности»

Доктор технических наук, заслуженный профессор ИРНИТУ

E-mail: sstimofeeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=79973

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7003434846>

Ильков Дмитрий Вячеславович

ООО «МЕДАЛ», Челябинск, Россия

Соучредитель

E-mail: ilkov.d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1392-9057>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1140094

Фитодобыча золота с использованием технической конопли: современное состояние и перспективы

Аннотация. В статье рассмотрены современные проблемы развития материально-сырьевой базы и необходимости повышения эффективности комплексного освоения месторождений цветных, черных, редких и драгоценных металлов и отходов недропользования. Особое внимание уделено добыче золота, входящего в перечень стратегического минерального сырья. Обобщены сведения по экономике замкнутого цикла и природоподобным технологиям, основанным на принципах экологического метаболизма. При освоении минерально-сырьевой базы перспективны технологии на основе дублирования в техносфере эффективных процессов, наблюдаемых в природе, т. е. природовоспроизводящие технологии.

Проанализированы достижения в области развития и становления природоподобной технологии — биодобычи тяжелых металлов и прежде всего золота, получившей название фитомайнинг, из отходов золотодобычи самородного и рудного золота с использованием фиторемедиационного потенциала растений, в частности, технической конопли. Представлен обзор по поиску растений гипераккумуляторов золота и результаты реализации технологии фитодобычи. Подробно рассмотрены данные по использованию технической конопли для биодобычи.

Приведены результаты по определению коэффициентов бионакопления меди и никеля разными сортами конопли. Исследовано 6 сортов технической конопли Краснодарской селекции масленистого и волокнистого назначения. Содержание канабеононов меньше 1 %, накопление тяжелых металлов максимальное в корнях. Установлено, что наибольший коэффициент бионакопления у сорта «Надежда». Техническая конопля является перспективной культурой для фитомайнинга и фиторемедиации, сочетая высокую толерантность к загрязнителям с экономической ценностью биомассы.

Ключевые слова: природоподобные технологии; фитомайнинг; фиторемедиация; тяжелые металлы; золотодобыча; техническая конопля; коэффициент бионакопления

Введение

В соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы, утверждённой распоряжением правительства РФ Российской Федерации до 2050 года¹, определена острая необходимость «разработки технологий, направленных на увеличение коэффициентов извлечения минерального сырья и сокращение его потерь при добыче и переработке, а также «разработки и совершенствования эффективных технологий рентабельной добычи и переработки низкокачественного и многокомпонентного минерального сырья, стратегического минерального сырья, техногенных отходов». Приоритетными направлениями являются повышение эффективности комплексного освоения месторождений цветных, черных, редких и драгоценных металлов, нерудного сырья и отходов недропользования путем реализации эффективных доступных технологий, развития комбинированных технологий обогащения и глубокой переработки минерального сырья. Особое внимание обращается на добычу золота², которое входит в России в перечень основных видов стратегического минерального сырья.³ Золото широко применяется в электронной промышленности, медицине, ювелирном деле и является валютным металлом — всеобщим эквивалентом денег.

В 2022 году в России стартовал федеральный проект «Экономика замкнутого цикла», принципиально отличающийся от линейной экономики, которая господствовала на протяжении столетий. Линейная экономика действовала по принципу «взять из природы — произвести — использовать — выбросить».

При таком обращении с ресурсами планеты наступил ресурсный и экологический кризис и для выживания необходимо перейти к принципиально другой парадигме, и организовать экономику потребления ресурсов подобно тому как это происходит в экосистемах, а именно за счет экологического метаболизма. В природной экосистеме все что произведено или использовано, полностью перерабатывается в системе так, что не возникает экологических проблем.

¹ Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 года № 1838-р // Информационная система «Техэксперт: 6 поколение». — URL: <https://xn--e1aaougdegv4f.xn--80aswg/> (дата обращения: 31.03.2026). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

² Золото // Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году / сост. ФГБУ «ВИМС», ФГБУ «ВНИГНИ», ФГБУ «Гидроспецгеология», ФГБУ ЦНИГРИ; Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) — Москва: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2022. — С. 397–423.

³ Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья: утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 года № 2473-р // Информационная система «Техэксперт: 6 поколение». — URL: <https://xn--e1aaougdegv4f.xn--80aswg/> (дата обращения: 31.03.2026). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

В рамках экологического метаболизма отходы, образующиеся на каждой стадии технологического процесса, могут быть переработаны до конечных метаболитов, углекислого газа, воды, оксидов азота, серы согласно схемам круговорота вещества в природе, если это органические вещества, или накоплены в живых организмах, и разумно из них извлечены и повторно использованы, если это металлы и другие неорганические вещества.

В экономике замкнутого цикла все материальные потоки целесообразно рассматривать как биологические материалы, которые беспрепятственно возвращаются в природные циклы биосферы, а металлы, неорганика, полимерные материалы могут быть повторно использованы. Идея создания экономики подобной природной экосистеме, в которой не накапливаются отходы зародилась еще в 60-е годы XX века и только в 20-е годы XXI века стала реализовываться и стали появляться технологии, позволяющие решать проблемы ресурсосбережения и достижения баланса с окружающей средой путем разработки и использования природоподобных технологий и минимизации экологических рисков.

Понятие природоподобные технологии введено в обиход на высшем уровне на 70-й сессии Генассамблеи ООН 28 сентября 2015 года. Президент Путин В.В. заявил, что стратегическим решением проблем будет создание и внедрение природоподобных технологий, позволяющие восстановить баланс между биосферой и техносферой.

С этого момента в России стала интенсивно развиваться данная концепция и вышел ряд нормативных документов, где рассматриваются природоподобные технологии как стратегически важные и интенсивно развивающиеся. Указом президента РФ от 02.07.2021 г. № 400 «Стратегия национальной безопасности», Указом Президента от 02.11.2023 г. № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации» и Указом Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». определены национальные цели экологического благополучия, технологического лидерства и приоритетного развития данных технологий.

Рекомендовано определить основные принципы и критерии отнесения технологий к природоподобным, оценить состояние природоподобных технологий в России, определить приоритеты и перспективы их развития и возложить руководство данным направлением на «Национальный исследовательский центр Курчатовский институт». Местные органы самоуправления должны стимулировать деятельность по разработке и внедрению данных технологий.

Природоподобные технологии — это технологии, воспроизводящие системы и процессы живой природы в виде технических систем и технологических процессов, интегрированных в естественный природный ресурсооборот [1].

В настоящее время при освоении минерально-сырьевой базы предложено разделить природоподобные технологии по признаку наличия или отсутствия у применяемых технологий прямых аналогов в живой природе на:

1. технологии на основе дублирования в техносфере эффективных процессов, наблюдаемых в природе (природовоспроизводящие технологии);
2. технологии с переносом в техносферу эффективных структур обращения вещества и энергии в биологических системах (конвергентные технологии) [2–4].

Целью настоящей работы является обобщение и анализ достижений в области становления и развития природоподобных технологий — биодобычи тяжелых металлов, и прежде всего золота, получившее название фитомайнинг из отходов золотодобычи самородного и рудного золота с использованием фиторемедиционного потенциала растений, в частности технической конопли.

Объекты и методы исследования

Авторы проанализировали научные публикации российских и зарубежных исследователей в области природоподобных технологий — технологий фитомайнинга и фиторемедиации для доизвлечения тяжелых металлов из вторичных ресурсов и загрязненных почв, особое внимание уделено золоту с ретроспективой 10 лет. Репрезентативность выборки позволила осуществить аналитический обзор.

Объектом исследования являлись рекультивированные территории россыпной добычи золота в Иркутской области и посевы технической конопли известных в России сортов в условиях горшечной культуры. Исследования проводили на базе лабораторий ВС ЦКП «Техносферная безопасность» ИРНИТУ, аккредитованных в установленном порядке.

Результаты и их обсуждение

Россия находится в тройке стран-лидеров по добыче и производству драгоценного металла на протяжении уже многих лет. Многолетняя добыча россыпного и рудного золота привела к тому, что запасы его постепенно уменьшаются. Учитывая, что на сегодняшний день очень высокий процент извлечения золота (выше 90 %), этих запасов, расположенных на доступных для добычи глубинах, хватит примерно на 20–25 лет (согласно прогнозам на 2018–2019 гг.) [5]. По данным на 2021 г. запасов золота хватит примерно до 2034 года, т. е. еще на 10 лет, если в последующие годы увеличение объемов добычи золота вернется к уровню 2016 года⁴, как следствие ежегодный прирост будет составлять 4 %.

Интенсивное развитие золотодобывающей промышленности в предыдущие десятилетия привело к накоплению больших объемов техногенных отвалов, в которых содержится 0,5–2,3 г/т золота. Некоторые хвостохранилища в настоящее время можно рассматривать как отдельные месторождения. В обзоре Горловой и др. [6] сообщается, что прогнозные ресурсы золота в техногенных россыпных образованиях оцениваются в 3260 т., а в техногенных отвалах запасы золота составляют не менее 18 % от запасов россыпного золота. Только в техногенных образованиях Читинской области содержится более 150 т золота. Лежалые хвосты Бaleyского месторождения содержат 1,09–1,37 г/т, в среднем 1,17 г/т и эти отходы нужно вовлекать в переработку инновационными технологиями.

Запасы золота в 149 техногенных россыпях Хабаровского края оценены в 124,3 т. [7–9]. Отвалы перемытых песков россыпных месторождений Магаданской области составляют 1,5 млрд м³ и содержат около 500 т золота. В Свердловской области в отвалах некондиционных руд, вскрышных и вмещающих пород, 48,2 т — в хвостах и шлаках обогащения, 19,2 т — в шлаках и шлаках металлургических производств. Всего на Урале в техногенных месторождениях содержится 74 т.

По разным оценкам, в лежалых хвостах золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) ООО «Рудник «Веселый» в Алтайском крае содержится около 3 тонн золота при среднем содержании 1,25–1,35 г/т, 10–12 тонн серебра (содержание 5,0–5,5 г/т), 2700–3200 тонн меди (содержание 0,14–0,15 %), а также 7–14 тонн ртути (среднее содержание 2–9 г/т), находящейся преимущественно в пептизированном состоянии и, частично, в виде амальгамы.⁵

⁴ HGM запускает переработку отходов золотодобычи в Забайкалье // Золото и технологии: электронный журнал. — URL: <https://zolteh.ru/news/hgm-zapuskayet-pererabotku-othodov-zolotodobychi-v-zabajkale/>. — Дата публикации: 03.11.2017.

HGM начала строительство бaleyской кучи // Вестник золотопромышленника: [сайт]. — 2020. — 18 июня. — URL: <https://gold.lprime.ru/20200618/366168.html> (дата обращения: 30.03.2026).

⁵ Робертус Ю.В. О влиянии хвостохранилища ЗИФ рудника «Веселый» на экологическое состояние природных вод / Ю.В. Робертус, А.В. Кивацкая, Р.В. Любимов // Природные ресурсы Горного Алтая. — 2004. — № 2. — С. 83–87.

Айдырлинское техногенное месторождение золота расположено в Кваркенском районе Оренбургской области содержит в эфелях от 0,12 до 1,69 г/т, среднее — 0,50 г/т и рекомендуется к переработкам биотехнологическим способом.

В последние годы разрабатываются программы по извлечению золота из отходов горно-металлургического производства, в частности активационного выщелачивания золота из кеков сорбционного цианирования и хвостов флотации Дарасунской обогатительной фабрики.⁶

Установлено, что в условиях длительного хранения техногенных образований под воздействием атмосферных осадков, перепада температур, влияния гуминовых кислот и попадания пемзованной ртути в отвалы при первичном обогащении песков происходят изменения внешнего облика и внутренней структуры частиц золота. Это создает благоприятные условия для биотехнологической переработки.

Показано, что на объектах Урала в техногенных россыпях происходит укрупнение (агрегация) или уменьшение крупности (диспергация) частиц золота.

Таким образом в настоящее время созданы все предпосылки для разработки новых природовоспроизводящих технологий доизвлечения золота из техногенных образований.

С одной стороны, доказано, что остаточное содержание золота экономически целесообразно извлекать, с другой в техногенных образованиях протекают природные процессы перераспределения вещества и происходит высвобождение, растворение, перенос, регенерация и восстановление золотоносных фаз. Природа подсказывает, как поступать. Надо смотреть, как происходит в природе и пытаться повторить.

Способность микроорганизмов выщелачивать металлы легла в основу природоподобных технологий, которые уже успешно применяются, включая золотодобычу. Существующие методы биодобычи используют ацидофильные хемолитотрофные бактерии, окисляющие сульфидные минералы, железо и серу. Это позволяет извлекать ценные и цветные металлы из руд, концентратов и отходов производства. На практике биодобычу осуществляют тремя методами: отвальным, кучным и чановым выщелачиванием. При этом биовыщелачивание чаще относят к технологиям для основных металлов, а биооксидацию — к переработке труднообогатимых золотоносных руд и концентратов [10].

Еще одно перспективное направление биотехнологии извлечения золота из отходов — фитодобыча (фитомайнинг) — сформировалось относительно недавно. Его теоретической базой стали биогеохимические методы геологов, позволявшие оценивать наличие рудных залежей по способности растений накапливать элементы-индикаторы. Кроме того, важную основу составили технологии фиторемедиации, активно развивавшиеся с 1980-х годов для очистки сточных вод на полях орошения и в биопрудах с использованием водных растений. Данный подход базируется на уникальной способности многих видов растений аккумулировать металлы в тканях в концентрациях, в десятки и тысячи раз превышающих их содержание в окружающей среде. Сегодня ведется масштабная исследовательская работа по оценке фиторемедиационного потенциала растений.

Современные публикации, посвященные фиторемедиации, выделяют несколько ключевых процессов, реализуемых растениями:

- фитодеградация (фитотрансформация) — ферментативное разложение преимущественно органических загрязнителей внутри тканей;

⁶ Разработана программа проведения экспериментов по активационному выщелачиванию золота // Институт горного дела ДВО РАН: сайт. — URL: http://igd.khv.ru/novosti/institute_news/razrabotana-programma-provedeniya-eksperimentov-po-aktivacionnomu-vyshchelachivaniyu-zolota.html. — Дата публикации: 04.03.2021.

- фитоэкстракция — извлечение тяжелых металлов из почвы с помощью растений-гипераккумуляторов и их накопление в вегетативной массе;
- фитоиспарение (фитоволатилизация) — перевод поллютантов в летучую форму с последующим выделением в атмосферу через транспирацию;
- фитостабилизация — иммобилизация загрязнителей в субстрате за счет накопления их в корневой системе.

Фитодобыча оформилась в самостоятельное научное направление в конце XX века. В 2003 году были обнародованы результаты первых полевых испытаний фитомайнинга, проведенных в Новой Зеландии, Бразилии и ряде африканских стран, что положило начало активному поиску растений — гипераккумуляторов золота. Обобщение исследований, проведенных до 2018 года, представлено в работах Тимофеевой С.С. [11–13] Ниже приводятся данные о достижениях в этой области за последние семь лет, а также результаты, полученные автором.

Успех фиторемедиации, как и фитомайнинга, зависит от выбора растений из местной флоры, детального изучения механизмов, с помощью которых растения накапливают и переносят тот или иной металл, а также климатических характеристик, свойств грунтов и уровня содержания металлов в каждом регионе [14; 15]. Расширение списка растений и понимания механизмов фитоэкстракции имеет основополагающее значение для данной технологии.

В концессионных районах золотодобычи в Танзании непосредственно на рудниках Golden Pride (GPGM) и Geita (GGM) были опробованы растения из местной флоры и выявлены растения гипераккумуляторы: спороболус пирамидальный (*Sporobolus pyramidalis*) (до 757,78 мкг г⁻¹ свинца), блефарис ползучий (*Blepharis maderaspatensis*) (до 158,11 мкг г⁻¹), лантана (*Lantana camara*) (68,61 мкг г⁻¹ мышьяка) и леуцеана (*Leucaena leucosephala*) Mn (2734,61 мкг г⁻¹ марганца и 4464,33 мкг г⁻¹ никеля). Эти растения рекомендованы для как перспективные для фиторемедиации.

В Саудовской Аравии в промышленной зоне провинции Аль-Касим выполнены исследования по определению фиторемедиационного потенциала местной флоры. Установлено, что наиболее высокий коэффициент биоаккумуляции (> 1) у *Phragmites australis* и *Chenopodium marale* по кадмию и меди, у *Chenopodium album*, *Lactuca serriola* и *Chenopodium marale* для меди и у *Pulicaria crispa* для марганца. Эти местные растения рекомендованы к практическому использованию для фиторемедиации тяжелых металлов.

На хвостах золотодобывающих рудников испытали в качестве гипераккумуляторов четыре непищевых маслянистых растения *Jatropha curcas*, *Ricinus communis*, *Reutealis trisperma* и *Melia azedarach*. Установлено, что отходы золотодобычи оказывают негативное воздействие на рост растений, снижается высота растений, уменьшается количество листьев и их площадь, а также масса корней. Из всех исследованных растений наиболее устойчивым к отходам золотодобычи оказалась *R. trisperma* и можно рассматривать ее как потенциальный гипераккумулятор.

В России работы по поиску растений гипераккумуляторов для доизвлечения золота ведутся учеными Иркутского национального исследовательского университета, Забайкальского государственного университета, Новайского государственного университета и других в следующих направлениях:

- разработка фитотехнологии доизвлечения золота и других металлов из шламовых вод хвостохранилищ с использованием водной растительности;
- разработка технологии фиторемедиации и фитомайнинга с использованием наземной растительности;
- создание гидропонных очистительных системы и биореакторов.

Ранее Тимофеевой и сотрудниками были разработаны и опробованы технологии фиторемедиации сточных золотоизвлекающих фабрик (Бурятзолото, Балейзолото, Восточная Сибирь; Ангренская ЗИФ, Узбекистан) и предприятий по добыче и переработке медных руд (Карабашский промузел, Южный Урал). Определены показатели бионакопления золота и других металлов, найдены наиболее перспективные виды растений, таковыми оказались харовые водоросли и водное растение — элодея канадская. Применительно к климатическим условиям Узбекистана, конкретно для хвостохранилища Навоийского ГМК опробованы представители местной флоры, обитающей в реке Заравшан. Установлено, что наиболее высоким очистительным потенциалом обладает эйхорния: она накапливает металлы и метаболизирует цианиды. Ранее нами было доказано, что именно это растение характеризуется наличием бета-цианаланинсинтазы и бета-цианаланингидратазы [16]. Пиастия и азола оказались неустойчивыми к высокому уровню солесодержания, поэтому их необходимо адаптировать путем дополнительного внесения органических веществ, в частности овечьего навоза. Из числа испытанных растений наиболее высокие показатели фиторемедиации продемонстрировали эйхорния (*E. Crassipes* Solms.) и ряска (*L. Minor* L.).

Фитодобыча с использованием наземных растений относится сегодня к одной из быстроразвивающихся технологий. Ученые оценивают фиторемедиционный потенциал у широкого круга растений [17; 18]. Одним из перспективным ремедиаторов, испытанных автором, оказалась техническая конопля. На территории России коноплю выращивали для получения волокна (пеньки) начиная с VII века. Волокно использовалось для изготовления веревок, парусины, морских канатов и т. п., она являлась объектом экспорта. Ошибочный запрет на возделывание посевной безнаркотической конопли нанес существенный ущерб коноплеводству России и только с принятием Постановления Правительства производство конопли бурно в настоящее время возрождается. Производство конопли практически безотходно [19–22].

Наиболее перспективными направлениями использования конопли кроме продуктов питания, является производство целлюлозы и углепластика из продуктов переработки конопли. Углепластик отличается высокой прочностью и жесткостью, а по удельным характеристикам превосходит сталь, хотя гораздо легче её по массе. Его используют в космических кораблях, а Боинг-787 на 87 % состоит из этого материала [23; 24].

Сегодня в мире начался настоящий конопляный бум. Во Франции, Нидерландах, Австралии, Китае, Чили площади этой культуры резко растут. Коноплю культивируют в 43 штатах Америки.

Западные страны рассматривают коноплю как новое экологичное, экономичное и имеющее большой коммерческий потенциал растение. На международном совещании в 1998 году в Санкт-Петербурге конопля названа культурой 21-го века наравне с пшеницей и соей.

Техническая конопля рассматривается как одна из наиболее перспективных культур для фиторемедиации и фитомайнинга благодаря ряду уникальных характеристик:

- непищевое использование — позволяет выращивать культуру на загрязненных почвах без риска попадания токсичных веществ в пищевую цепь;
- быстрый рост и высокая биомасса — обеспечивает эффективное извлечение поллютантов за короткий вегетационный период;
- развитая корневая система — способна проникать на значительную глубину, охватывая большой объем почвы;
- толерантность к тяжелым металлам — растение проявляет устойчивость к высоким концентрациям загрязнителей;

- экономическая рентабельность — помимо экологической функции, культура приносит доход за счет использования биомассы в текстильной, строительной и других отраслях.

Исследования подтверждают, что техническая конопля успешно произрастает на почвах с высоким содержанием меди (Cu), мышьяка (As), кадмия (Cd) и свинца (Pb), сохраняя способность к накоплению биомассы. При этом установлено, что накопление тяжелых металлов существенно зависит от сорта растения и типа металла [25].

Ключевой особенностью технической конопли является преимущественное накопление тяжелых металлов в корневой системе. Согласно исследованиям [26], распределение поллютантов в растениях выглядит следующим образом (табл. 1):

Таблица 1

Распределение поллютантов в растениях

Металл	Доля накапливаемая в корнях, %
Медь	32–86
Никель	60–78
Кадмий	76,0–92,9
Хром	60–78
Свинец	43–84

Составлено авторами

Такое распределение имеет важное практическое значение: корни могут быть отдельно собраны и переработаны для извлечения металлов, в то время как надземная часть (стебли, листья, соцветия) остается относительно чистой и может быть использована в промышленных целях.

В исследовании российских ученых [27] была проведена оценка золотоаккумулирующей способности трех культур: подсолнечника, овса и технической конопли. Эксперимент проводился в горшечных культурах на субстрате из перемытых песков россыпных месторождений. Установлено, что наибольший коэффициент биологического накопления (КБН) золота был выявлен у технической конопли; техническая конопля показала максимальный биологический вынос золота среди исследуемых культур; растение продемонстрировало способность вегетировать в условиях, характерных для северных территорий России, где сосредоточены основные золотодобывающие предприятия.

Авторы делают вывод о целесообразности высадки технической конопли на отработанных месторождениях россыпного золота для его доизвлечения.

Полевые испытания по выращиванию технической конопли в условиях Восточной Сибири выполнены сотрудниками сельскохозяйственной академии г. Улан-Уде. Решены вопросы по использованию техники для посева и сбора урожая.

Нами выполнены полевые испытания по оценке аккумулирующей способности растения на отработанных рекультивированных участках под г. Ангарском. Установлено, что при выращивании технической конопли на металлосодержащих почвах коэффициент бионакопления и эффективности извлечения не превышает 1, что указывает на преимущественное накопление металлов в корнях и ограниченный транспорт в надземные органы. Основным механизмом является фитостабилизация — процесс иммобилизации поллютантов в ризосфере и корнях растений.

Исследованиями по выращиванию 6 сортов технической конопли краснодарской селекции на почвах, загрязненных медью, никелем в условиях горшечной культуры, выявлены сортовые различия по ряду параметров (табл. 2).

Таблица 2

Содержание каннабионов в зеленой массе и тяжелых металлов в корнях конопли, выращенной на загрязненных почвах

Наименование сорта	Содержание тетрагидро-каннабиола, %	Содержание каннабидиола, %	Биологический коэффициент накопления меди (числитель) и никеля (знаменатель) в корнях, %
Надежда	0,091	0,604	86/78
Виктория	0,087	0,95	65/74
Мария	0,018	0,604	75/67
Екатеринодарская	0,020	0,38	56/60
Кубанка	0,020	0,602	68/64
Омегадар	0,091	0,604	58/59

Составлено авторами

Характеристики сортов представлены ниже:

Надежда — сорт масличного направления использования с урожайностью семян 1,13–1,17 т/га, массой 1000 семян 18–20 г., содержанием масла в семенах не менее 31 %.

Виктория — двудомный высокоурожайный сорт волокнистого направления использования. Максимальная урожайность стеблей — 16,0 т/га, семян — 1,3 т/га, содержание жира в семенах 31,8 %. Сорт отличается особенно хорошим качеством волокна — прочность его волокна составляет 32,0 кгс.

Мария — раннеспелый однодомный сорт масличного направления использования. Максимальная урожайность стеблей — 11,1 т/га, семян — 1,4 т/га, содержание жира в семенах 31,8 %.

Екатеринодарская — высокоурожайный двудомный сорт южной конопли, волокнистого направления использования, не обладающий наркотической активностью. Максимальная урожайность стеблей — 17,2 т/га, семян — 6,6 т/га, содержание жира в семенах 31,0 %.

Кубанка — однодомный сорт южной конопли, не обладающий наркотической активностью, волокнистого направления использования: Максимальная урожайность стеблей — 13,9 т/га, семян — 1,2 ц/га, содержание жира 31,0 %.

Омегадар — сорт однодомный, масличного направления использования. Максимальная урожайность стеблей — 12,6 т/га, семян — 1,2 т/га, содержание жира в семенах 32,0 %.

Исследования проводили на оборудовании Восточно-Сибирского Центра коллективного пользования «Техносферная безопасность» ИРНИТУ.

Наличие сортов с различной способностью к накоплению металлов открывает возможности для селекции:

- для целей фитомайнинга (извлечения металлов) предпочтительны сорта с повышенной аккумулялирующей способностью (например, Надежда, Мария);
- для фитостабилизации на территориях с последующим использованием биомассы безопаснее сорта с минимальным накоплением металлов в надземной части [28].

Техническая конопля успешно применяется не только для очистки почв, но и для очистки кислых сточных вод горно-металлургических предприятий. Исследования Самодолова А.П. [29] показали:

- конопля эффективно извлекает тяжелые металлы 1-го и 2-го класса опасности из кислых стоков;
- растения сохраняют способность к развитию и размножению в агрессивной среде;
- культура извлекает значительную часть поллютантов из исходного стока.

Исследованиями, выполненными кафедрой экспериментальной биологии и биотехнологий УрФУ, установлено, что листья конопли обладают высокой скоростью фотосинтеза — выше, чем многие сельскохозяйственные культуры — до 70–80 микромолей CO_2 на 1 м^2 листовой поверхности в секунду, что в 3–5 раз выше, чем хвойные древесные растения. Это более 100 литров чистого CO_2 , поглощенного за вегетационный сезон 1 м^2 листьев. При этом на 1 м^2 почвы могут произрастать растения технической конопли, которые в сумме в середине сезона сформируют листовую поверхность более $2\text{--}3 \text{ м}^2$. Коноплю можно рассматривать как потенциальный агрегатор парниковых газов.

Еще в 2009 году ученые из Белоруссии провели ряд экспериментов с коноплей в районах, которые пострадали от загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Площадь посадки конопли занимала примерно 20 га в зоне места катастрофы. Сбранную массу утилизировали сжиганием, примерно 20 га в зоне места катастрофы.

Заключение

Анализ научной литературы за последние пять лет [30–32] и собственные исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Техническая конопля является перспективной культурой для фитомайнинга и фиторемедиации, сочетая высокую толерантность к загрязнителям с экономической ценностью биомассы.
2. Основным механизмом работы с тяжелыми металлами для конопли является фитостабилизация с аккумуляцией металлов в корневой системе.
3. В отношении золота техническая конопля демонстрирует более высокие показатели биологического накопления по сравнению с подсолнечником и овсом, что открывает перспективы для ее использования на техногенных золотосодержащих объектах.
4. Сортовое разнообразие позволяет селекционировать растения как для целей извлечения металлов, так и для безопасного производства промышленной продукции.
5. Новые направления включают комплексное использование биомассы после фитоэкстракции (получение наночастиц) и применение конопли для очистки кислых сточных вод.
6. Практическая реализация технологии фитомайнинга с использованием технической конопли требует дальнейших полевых испытаний в различных климатических условиях, особенно в северных регионах, где сосредоточены золотодобывающие предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Природоподобные технологии как фактор формирования ноосферы в условиях современных вызовов / С.И. Воронов, А.Н. Цедилин, Д.А. Макаренков [и др.]. — DOI 10.56304/S2782375X24010157 // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». — 2024. — Т. 5, № 1. — С. 92–95.
2. Harnessing chemistry for plant-like machines: from soft robotics to energy harvesting in the phytosphere / I. Fiorello, Liu Y., Kamare B [et al.]. — DOI 10.1039/D4CC06661H // Chemical Communications. — 2025. — Vol. 61, Iss. 34. — P. 6246–6259.

3. Sagar A. Flying seed-inspired sensors for remote environmental monitoring on Earth and beyond / A. Sagar, S. Lukáš, Z. Radek. — DOI 10.1016/j.tibtech.2025.08.005 // Trends in Biotechnology. — 2025. — 6 September.
4. Human, or nature-led? A spectrum of nature-based solutions / A. Puttock, R.E. Auster, N. Gatis [et al.]. — DOI 10.1016/j.nbsj.2025.100249 // Nature-Based Solutions. — 2025. — Vol. 8. — P. 100249.
5. Александров А.В. Технологические аспекты извлечения золота из техногенных образований Забайкальского края / А.В. Александров, Р.В. Богомяков, Т.Г. Конарева. — DOI 10.17580/or.2019.05.08 // Обогащение руд. — 2019. — № 5. — С. 48–53.
6. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд / О.Е. Горлова, И.В. Шадрюнова, В.А. Жилина [и др.]. — DOI 10.24412/2218-5194-2020-1-193-210 // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2020. — № 1. — С. 193–210.
7. Лаврик Н.А. Минералого-технологические особенности золота из россыпей южного склона Белой Горы (Хабаровский край) и этапы его формирования / Н.А. Лаврик, Н.М. Литвинова, А.В. Лаврик. — DOI 10.18599/grs.2023.3.23 // Георесурсы. — 2023. — Т. 25 № 3. — С.198–207.
8. Архипов, Г.И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Стратегическая оценка возможностей освоения / Г.И. Архипов. — Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2017. — 820 с. — ISBN 978-5-88570-410-6. — EDN ZHFLVP.
9. Мамаев, Ю.А. Техногенные россыпи благородных металлов Дальневосточного региона России и их рациональное освоение / Ю.А. Мамаев, В.С. Литвинцев, Г.П. Пономарчук. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Горная книга", 2010. — 309 с. — ISBN 978-5-98672-240-5. — EDN QMYZLV.
10. Исследование биотехнологической переработки сульфидной золотосодержащей руды / В.А. Верхозина, Е.В. Верхозина, Л.И. Шкетова [и др.]. — DOI 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2019. — Т. 9, N 1. — С. 109–117.
11. Тимофеева С.С. Фитомайнинг: современное состояние и перспективы / С.С. Тимофеева. — DOI 10.21285/1814-3520-2018-3-112-128 // XXI век: Техносферная безопасность. — 2018. — Т. 3, № 3. — С. 112–128.
12. Timofeeva S.S. Phytomining perspectives in rehabilitation of mining and industrial areas of South Ural / S.S. Timofeeva, D.V. Ulrikh, S.S. Timofeev. — DOI 10.1088/1755-1315/66/1/012030 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — № 66.
13. Тимофеева С.С. Фитомайнинг как технология ревитализации территории меднорудных месторождений Южного Урала / С.С. Тимофеева, Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеев. — DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-6-3-16 // ГИАБ. — 2020. — № 56. — С. 3–16.
14. Role of the rhizosphere bacterial community in assisting phytoremediation in a lead-zinc area / Xiao Yunhua, Chen Liang, Li Chunxiao [et al.]. — DOI 10.3389/fpls.2022.1106985 // Frontiers in Plant Science. — 2022. — Vol. 13.
15. Interference of cultivar and ways of cultivation in lettuce (*Lactuca sativa*) yield and conservation / E.S. Paes, C.S. Pavan, G.M.B. Tonial [et al.]. — DOI 10.5897/AJFS2023.2269 // African Journal of Food Science. — 2023. — Vol. 17, № 10. — P. 223–232.

16. Перспективные технологии биоремедиации сточных вод золотодобывающих предприятий Узбекистана / С.С. Тимофеева, И.В. Дроздова, А.А. Бобоев [и др.]. — DOI 10.21285/2500-1582-2022-4-322-333 // XXI век. Техносферная безопасность. — 2022. — Т. 7, № 4. — С. 322–333.
17. Harnessing Cannabis sativa L. for integrated environmental remediation and circular biomass use / A. Jurga, T. Rodziejewicz, M. Grzegorzec [et al.]. — DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.179976 // Science of the Total Environment. — 2025. — Vol. 992. — P. 179976.
18. Phytoremediation: A Novel Approach of Bast Fiber Plants (Hemp, Kenaf, Jute and Flax) for Heavy Metals Decontamination in Soil / F.N. Cleophas, N.Z. Zahari, P. Murugayah [et al.]. — DOI 10.3390/toxics11010005 // Toxics. — 2023. — Vol. 11, № 5.
19. Руденко В.Е. Мировой рынок производства конопли / В.Е. Руденко. — DOI 10.53988/24136573-2023-04-03 // Управление рисками в АПК. — 2023. — № 4(50). — С. 27–33.
20. Руденко В.Е. Современное состояние отрасли коноплеводства в России / В.Е. Руденко, Т.И. Ашмарина // Естественно-гуманитарные исследования. — 2023. — № 6(50). — С. 414–417. — EDN HFSPXV.
21. Попов Р.А. Состояние, проблемы и возможности для развития отечественного коноплеводства / Р.А. Попов // Агротехника и энергообеспечение. — 2019. — № 4(25). — С. 42–52. — EDN AJDOXA.
22. Серков В.А. Развитие коноплеводства в России и мире / В.А. Серков, М.Р. Александрова, А.Д. Смирнов // Сурский вестник. — 2018. — № 3(3). — С. 29–36. — EDN YLQLCX.
23. Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement / M.R. Ahmad, C. Bing, S.Y. Oderji [et al.]. — DOI 10.1016/j.enbuild.2018.06.007 // Energy and Buildings. — 2018. — Vol. 173. — P. 719–733.
24. Парсанов А.С. Применение конопли в производстве композитных материалов / А.С. Парсанов, М.В. Антонова, И.В. Красина. — DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_292 // Технология текстильной промышленности. — 2021. — № 6(396). — С. 292–297.
25. Elucidating the phytoremediation potentials and ecophysiological mechanisms of indicator plants in the industrial polluted region / U. Ejaz, Sh.M. Khan, N. Khalid [et al.]. — DOI 10.1016/j.jenvman.2024.121821 // Journal of Environmental Management. — Vol. 366. — P. 121821.
26. Cannabis sativa L. Phytoremediation of Heavy Metal Soil Contamination, Followed by Biomass Valorization / G. Picchi, A. Callegari, A.G. Capodaglio [et al.]. — DOI 10.3390/su18062926 // Sustainability. — 2026. — Vol. 18(6). — P.2926.
27. Дроздова И.В. Перспективы фитодобычи золота из перемытых песков россыпных месторождений / И.В. Дроздова, С.С. Тимофеева, С.С. Тимофеев. — DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_99 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 99–111.
28. Industrial hemp (Cannabis sativa L.) can utilize and remediate soil strongly contaminated with Cu, As, Cd, and Pb by phytoattenuation / Y. Guo, L. Wen, X. Zhao [et al.]. — DOI 10.1016/j.chemosphere.2024.142199 // Chemosphere. — 2024. — Vol. 358. — P. 142199.

29. Самодолов А.П. Биоаккумуляция тяжелых металлов из AMD стоков / А.П. Самодолов // Приволжский научный журнал. — 2025. — № 1. — С. 153–159. — EDN LXHOQG.
30. A Critical Review of Industrial Fiber Hemp Anatomy, Agronomic Practices, and Valorization into Sustainable Bioproducts / M. Basak, M. Broadway, J. Lewis [et al.] // BioResources. — 2025. — Vol. 20(2). — P. 5030–5070. — URL: <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/24229> (дата обращения: 30.03.2026).
31. Macronutrients Dynamics in Copper-Contaminated Soils: Implications for Hemp Growth and its Phytoremediation Potential / X. Cheng, L. Guo, C. Liu [et al.]. — DOI 10.1016/j.jafr.2024.101299 // Journal of Agriculture and Food Research. — 2024. — Vol. 18(2). — P. 101299.
32. Cannabis sativa L. Phytoremediation of Heavy Metal Soil Contamination, Followed by Biomass Valorization / G. Picchi, A. Callegari, A.G. Capodaglio [et al.]. — DOI 10.3390/su18062926 // Sustainability. — 2026. — Vol. 18. — P. 2926.

Timofeeva Svetlana Semenovna

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

E-mail: sstimofeeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=79973

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7003434846>

Ilkov Dmitrii Viacheslavovich

LLC «MEDAL», Chelyabinsk, Russia

E-mail: ilkov.d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1392-9057>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1140094

Phytomining of gold using industrial hemp: current state and prospects

Abstract. The article examines modern problems of development of the material and raw material base and the need to increase the efficiency of integrated development of deposits of non-ferrous, ferrous, rare and precious metals and subsoil waste. Particular attention is paid to the extraction of gold, which is included in the list of strategic mineral raw materials. Information on the circular economy and nature-like technologies based on the principles of ecological metabolism is summarized. When developing the mineral resource base, technologies based on duplication in the technosphere of effective processes observed in nature are promising, i.e. nature-enhancing technologies.

The achievements in the field of development and establishment of nature-like technology — bioextraction of heavy metals and, above all, gold, called phytomining, from gold mining wastes of native and ore gold using the phytoremediation potential of plants, in particular industrial hemp, are analyzed. An overview of the search for gold hyperaccumulator plants and the results of the implementation of phytomining technology are presented. The data on the use of industrial hemp for bio-extraction are examined in detail. The results of determining the bioaccumulation coefficients of copper and nickel by different varieties of hemp are presented. 6 varieties of industrial hemp of Krasnodar selection for oily and fibrous purposes were studied. The content of cannabinoids is less than 1 %, the accumulation of heavy metals is maximum in the roots. It has been established that the Nadezhda variety has the highest bioaccumulation coefficient. Industrial hemp is a promising crop for phytomining and phytoremediation, combining high tolerance to pollutants with the economic value of biomass.

Keywords: nature-like technologies; phytomining; phytoremediation; heavy metals; gold mining; industrial hemp; bioaccumulation coefficient