ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(7):5-20
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 502.64;58.085 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_5

ОПЫТ ФИТОДОБЫЧИ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ РЕСУРСОВ

С.С. Тимофеева[1], И.В. Дроздова[1]

[1] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, e-mail: drozdovaiv@istu.edu

Аннотация: В настоящее время на территории Сибири и Дальнего Востока, где на протяжении многих лет велась золотодобыча, накоплены миллиарды кубических метров отходов переработки природных россыпей – галечные, эфельные отвалы, торфы и перебуторы – и хвостов обогатительных фабрик. Среднее содержание золота в отвалах колеблется в диапазоне от 0,5 до 1 г/т и сегодня их рассматривают как техногенные ресурсы и разрабатывают инновационные технологии их переработки. Проведен анализ биотехнологических способов добычи золота и детально рассмотрена технология фитодобычи. Представлены результаты опробования технологии фитодобычи золота из техногенных ресурсов, накопленных на отработанных территориях, где не проводилась рекультивация. Выполнена инвентаризация отработанных территорий Бодайбинского района и определен накопленный ущерб. Установлено, что площади нарушенных земель в период с 1863 по 2020 гг. составили 194,66 км^2, а в период по 2023 г. – 214,85 км^2. Технологию опробовали на эфельных отходах участка добычи россыпного золота. Изучена фитотоксичность цианидов, уровни цианиднейтрализующих ферментов и найдены оптимальные условия реализации фитомайнинга. Сделан вывод, что для условий Бодайбинского района наиболее эффективным является выращивание технической конопли на техногенных месторождениях. Установлено, что для повышения эффективности фитоэкстракции следует однократно вносить в почву цианид натрия в количестве 0,1–0,5 мг/кг грунта в конце вегетационного периода. Извлечение мелкодисперсного золота данным методом может достигать 99%.

Ключевые слова: золотосодержащие отходы, фитодобыча, фитомайнинг, растения-гипераккумуляторы, техническая конопля, биотехнологии, золото, эфельные отвалы.

Для цитирования: *Тимофеева С. С., Дроздова И. В.* Опыт фитодобычи золота из техногенных ресурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_5.

Experience of gold phytoextraction from manmade resources

S.S. Timofeeva[1], I.V. Drozdova[1]

[1] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, e-mail: drozdovaiv@istu.edu

Abstract: The areas of long-term gold mining in Siberia and in the Far East of Russia have accumulated billions of cubic meters of mining waste at natural gold placers–dredge and sluice tailings dumps, black dirt and debris–and tailings at concentration plants. Such waste contains from 0.5 to 1.0 g/t of gold and is considered today as the manmade resources processible

using innovative technologies. The bio-technologies of gold mining are reviewed, and the phytoextraction technology is examined in detail. The testing results of phytoextraction of gold from the manmade resources accumulated in the mined-out and unreclaimed areas are presented. The mined-out land inventory in the Bodaibo region is carried out, and the cumulative damage is assessed. It is found that the disturbed land areas were 194.66 km^2 in the period from 1863 to 2020 and reached 214.85 km^2 over the period up to 2023. The technology was applied to sluice tailings in the site of placer gold mining. The phytotoxicity of cyanides and the effects of cyanide-neutralizing enzymes are investigated, and the optimal phytomining conditions are determined. It is concluded that for the conditions of the Bodaibo region, the most effective approach is cultivation of industrial hemp at manmade deposits. It is found that for enhancing phytoextraction, it is required to introduce soil with sodium cyanide in an amount of 0.1–0.5 mg/kg at the end of a vegetation period. Finely dispersed gold recovery using this method may reach 99%.

Key words: gold-bearing waste, phytoextraction, phytomining, hyperaccumulators, industrial hemp, gold, sluice tailings dumps.

For citation: Timofeeva S. S., Drozdova I. V. Experience of gold phytoextraction from manmade resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):5-20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_5.

Введение

Среднее содержание золота в отвалах на территории Сибири и Дальнего Востока, где на протяжении многих лет велась золотодобыча, колеблется в диапазоне от 0,5 до 1 г/т, и сегодня их рассматривают как техногенные ресурсы, для разработки которых требуются инновационные технологии [1,2].

По данным разных источников в общей структуре ресурсов и запасов золота России на долю техногенных отходов приходится 7—12% [3]. Золото в отработанных техногенных россыпях находится в самородной форме, в тесном срастании с глинистой матрицей, и при длительном хранении под действием физико-химических и биохимических преобразований образуются новые формы золотин, появляются более мелкие частицы пластинчатого золота, которые накапливаются на геохимических барьерах, их содержание может достигать от 0,1 до 65,9 г/т. Размеры частиц варьируются от 5 до 500 мкм [4—5].

В настоящее время предлагается множество технологий извлечения золота из техногенных отходов [1], таких как обогатительные, основанные на гравитационном и флотационном обогащении; пирометаллургические (обжиг и плавление); гидрометаллургические с использование разных технологий выщелачивания, в том числе и биологического. Имеется множество публикаций, где описаны конкретные технологии (например, кучное, аммиачно-сульфатное выщелачивание [6—9]) и оборудование, рекомендованное для этих целей (отсадочные машины, центробежные концентраторы, винтовые сепараторы, диспергаторы, промывочные приборы и т.д. [10—12]).

В последнее время существенное внимание уделяется биотехнологическим способам добычи полезных ископаемых, повсеместно внедряются процессы экологизации производств, развиваются и внедряются такие направления, как биогеотехнология и природоохранные (экологические) биотехнологии [13—15].

Микробное выщелачивание сегодня признано как альтернативная энергосберегающая и экологически чистая технология. В обзоре [16] А.Г. Булаев утверждает, что в области биогидрометаллургических технологий в настоящее время достигнут существенный прогресс, и необходимо шире внедрять биоокисление ацидофильными микроорганизмами, применение грибов, гетеротрофных бактерий и окислительно-восстановительных процессов с участием живых организмов.

Среди живых организмов, перспективных для биодобычи золота, следует обратить особое внимание на растительные организмы и интенсивно разрабатываемую технологию фитодобычи или фитомайнинга. Технология фитодобычи имеет ряд существенных преимуществ перед микробиологическими технологиями, так как не требует выделения и поддержания коллекции специфических микроорганизмов и создания оптимальных параметров (температура, pH и др.). Данная технология основана на подборе растительных организмов, адаптированных к климатическим рискам территории добычи, и можно доизвлекать золото из техногенных ресурсов (лежалых хвостов, эфелевых отвалов и т.д.). Технология внешне мало отличается от сельскохозяйственного производства. По завершении вегетации растений собирают растительную массу, подвергают сушке, термической обработке и из зольного остатка, не содержащего серы, выделяют золото [19].

Как отдельное направление фитодобыча появилась в 1997 г. с открытием явления накопления золота в растениях, и в 1998 г. уже сформировалась концепция фитодобычи золота. В 2003 г. были проведены фундаментальные полевые исследования в Новой Зеландии и Бразилии, подтверждающие правомерность данной концепции. Растения, способные аккумулировать высокие концентрации тяжелых металлов, называются гипераккумуляторами. Причем было установлено, что концентрация тяжелых металлов в таких растениях может быть в 100 раз больше в сравнении с обычными растениями — не аккумуляторами [17 — 20].

Сущность фитодобычи заключается в использовании естественной способности растений аккумулировать тяжелые металлы в собственной биомассе с последующей утилизацией этих растений (компостирование, сжигание и др.) с целью получения металлов.

Фитотехнологию добычи золота и других металлов можно представить следующей схемой (рис. 1).

За рубежом данная технология интенсивно применяется и считается перспективной [21 — 25], отработаны условия выращивания растений и подобраны виды растений гипераккумуляторов для разных географических зон. Установлено, что для получения 100 мг/кг сухой массы растений требуется приблизительно 2 мг золота на кг почвы, учитывая профиль почвы глубиной 20 см.

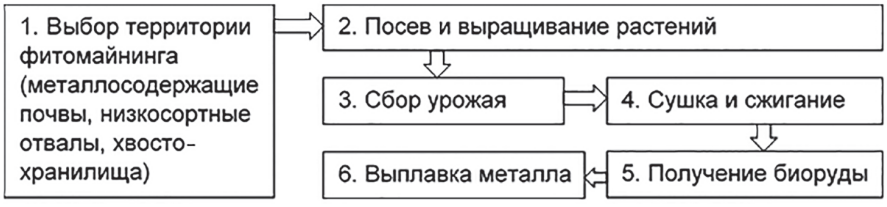

Рис. 1. Технологическая схема фитомайнинга металлов
Fig. 1. Technological scheme of metal phytomining

Для условий Восточной Сибири авторами проводились исследования по накоплению золота в растениях, которые могли бы быть использованы в условиях Бодайбинского района [26, 27].

Целью настоящей работы являлось опробование технологии фитодобычи золота из техногенных ресурсов, накопленных на отработанных территориях, где не проводилась рекультивация.

Материалы и методы исследования

В работе выполнена инвентаризация отработанных территорий Бодайбинского района и определен накопленный ущерб. Установлено, что площади нарушенных земель в период с 1863 по 2020 гг. суммарно составили 194,66 км^2 (рис. 2), а в период по 2023 г. (действовало 22 недропользователя) составили 214,85 км^2. Объем нарушенных земель составил 0,5% от всей площади Бодайбинского района. При опробовании эфельных отвалов отработанных россыпей установлено, что содержание золота в них колеблется от 100 до 500 и более мг/м^3. Золото в эфельных отвалах мельче, чем в первичной россыпи, так как крупные частицы извлечены.

Таблица 1

Минеральный состав эфельных отвалов месторождения «Руч. Джалагун, правый приток р. Чаянгро»
Mineral composition of the deposit's dumps placer gold mining site «Riv. Dzhalagun»

Кристаллическая фаза	Весовое содержание, %	Погрешность измерения
Кварц	88 – 90	0,72
Карбонат	3,2	0,16
Пирит	4,5	0,54
Ильменит	0,05	0,02
Гранат	0,15	0,03
Магнетит	2,25	0,34
Гематит	1,4	0,32
Рутил	0,15	0,09
Лимонит	0,15	0,06
Золото г/т	0,09	0,001

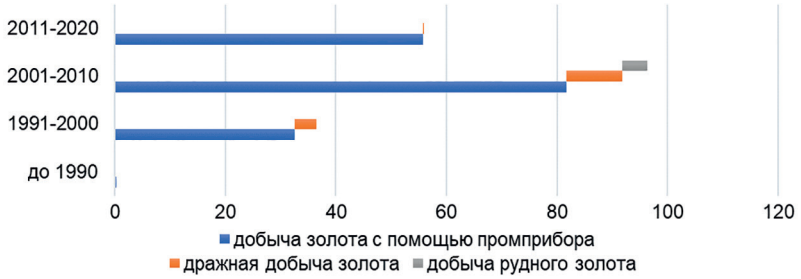

Рис. 2. Площади отработанных золотоносных месторождений Бодайбинского района, измененных в результате хозяйственной деятельности золотодобывающего предприятия (км^2)

Fig. 2. Areas of mined gold deposits in the Bodaibo region changed because of activities of a gold mining enterprise (km^2)

Рис. 3. Пробоподготовка высушенной биомассы растений, измельчение до крупности 0,05 мм
Fig. 3. Sample preparation of dried plant biomass, grinding to fineness 0,05 mm

Опытно-промышленные испытания технологии фитомайнинга проводили с эфельными отходами, отобранными на участке добычи россыпного золота «Руч. Джалагун, правый приток р. Чаянгро» (ООО «Сибирь Недра»), методом конверта с площади 100×100 м в объеме 0,35 м^3.

В табл. 1 приведен минералогический состав исследуемых эфельных отвалов и содержание золота по данным аккредитованной лаборатории Иргиредмета.

Опробование технологии фитомайнинга выполняли по следующей схеме: в контейнеры помещали эфельные отходы в количестве 4,5 кг, производили посадку семян исследуемых растений из расчета 1 растение на 40 см^2 в предварительно смоченный эфельный песок, размешивали в теплице при освещенности 500 лк и температуре 18 — 25 °С. Периодически поливали и фиксировали фазы развития растений, биохимические параметры культур в течение 4 месяцев от посадки до технической спелости. По завершении вегетации срезали наземную часть растений, выбирали и промывали корни, высушивали при температуре 105 °С, в образцах определяли содержание золота по методике НСАМ № 512-МС «Методика измерений. Определение элементарного состава растительного происхождения (травы, листья) атомно-эмиссионным и масс-спектральными методами анализа» в аккредитованной лаборатории Иргиредмета. Пробоподготовку проводили в специальном измельчителе (рис. 3). Предел обнаружения золота составлял от 0,0030 до 100 мкг/г (г/т).

В работе выполняли две серии экспериментов. В первой серии растения поливали водой, а во второй серии экспериментов для интенсификации процессов накопления золота и перевода золота в ионную форму растения поливали растворами цианида натрия разных концентраций.

Фитотестирование проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22030-2009, идентичному международному стандарту ИСО 22030:2005* «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность высших растений» (ISO 22030:2005 «Soil quality. Biological methods. Chronic toxicity in higher plants», IDT), а также с методическими рекомендациями МР 2.1.7.2297-07.

Протоколом фитотестирования предусмотрено использование набора семян разных культур. Основываясь на российских и международных нормативных документах, в работе проводили тестирование на наборе видов, состоящих из однодольных и двудольных растений, а именно: однодольные — подсолнеч-

ник (Helianthus), сорт «Казачий», техническая конопля (Cannabis sativa L), сорт «Надежда»; двудольные — семена овса (Avena sativa), сорт «Ровесник», кукуруза (Zea mays), сорт «Белое облако».

Фитотоксический эффект определяли путем сопоставления показателей тест-функции (всхожести, энергии прорастания, длины корней и длины побегов) опытных и контрольных семян [28, 29]. Сначала по формулам (1) определяли величину тест-параметра как среднюю величину из полученных в трех параллелях эксперимента ($ТП_{оп}$). Аналогично рассчитывали тест-параметры для контрольных опытов ($ТП_{контр}$).

$$ТП_{оп} = \frac{\sum ТП_{ік}}{n};\ ТП_{контр} = \frac{\sum ТП_{ік}}{n}, \quad (1)$$

где $ТП_{ік}$ — исследуемый параметр; n — общее количество семян.

Величина показателя фитотоксического эффекта ($ТЭ$) на выбранные тест-параметры вычислялась по формулам (2) для совокупности длины корней ($ТЭ_К$) и побегов ($ТЭ_{ПР}$):

$$ТЭ_К = \frac{ТП_{контр.К} - ТП_К}{ТП_{контр.К}} \cdot 100;$$
$$ТЭ_{ПР} = \frac{ТП_{контр.поб} - ТП_{поб}}{ТП_{контр.поб}} \cdot 100, \quad (2)$$

Способность растений метаболизировать цианиды оценивали по уровню активности фермента β-цианоаланинсинтазы по методике.

Опыты проводили в 5-кратной повторности и обрабатывали статистически с применением пакета программ «Статистика».

Результаты и их обсуждение

Непосредственное воздействие цианидов на жизнедеятельность растений сильно разнится в зависимости от вида растения. У некоторых видов высокие концентрации цианида могут подавлять дыхание и влиять на способность растения поглощать питательные вещества из почвы, в некоторых случаях вызывая гибель растения. В меньших концентрациях цианид может замедлять новый рост и влиять на прорастание семян; однако для некоторых растений цианид может фактически способствовать прорастанию семян и интенсивному росту.

Цианид существует в природе в виде цианогенных гликозидов более чем у 2000 видов растений и используется в качестве механизма самозащиты от хищников. Установлено, что цианогенные гликозиды являются вторичными метаболитами, хранящимися в клеточных вакуолях растительных тканей, и состоят

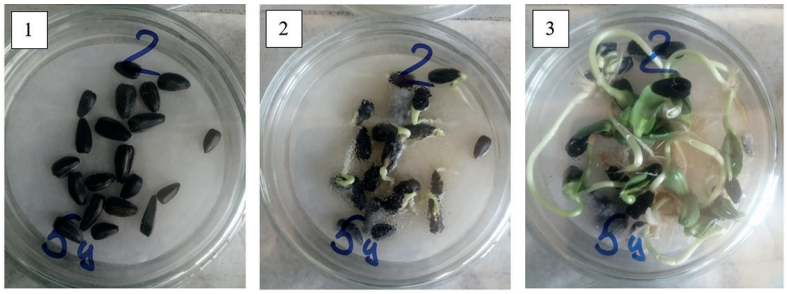

Рис. 4. Фитотестирование однодольных семян (подсолнечник) в растворе цианида натрия с концентрацией 5 мг/л: 1 — 0 день; 2 — 3 день (оценка схожести семян); 3 — 7 день (оценка энергии прорастания, длины корней и ростков)

Fig. 4. Phytotesting of monocotyledonous seeds (Helianthus) in a solution of sodium cyanide with a concentration of 5 mg/l: 1 — 0 day; 2 — 3rd day (seed germination assessment); 3 — 7th day (germination energy, length of roots and sprouts assessment)

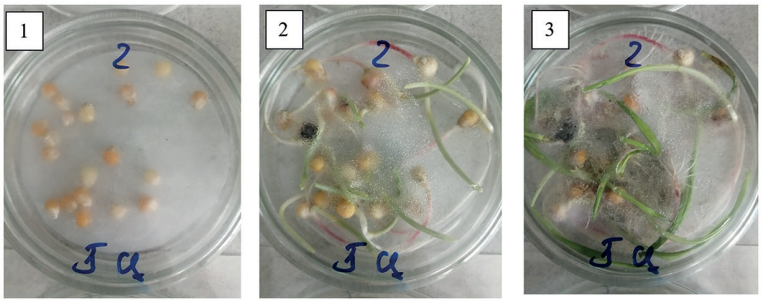

Рис. 5. Фитотестирование двудольных семян (кукуруза) в растворе цианида натрия с концентрацией 5 мг/л: 1 — 0 день; 2 — 3 день (оценка всхожести семян); 3 — 7 день (оценка энергии прорастания, длины корней и ростков)

Fig. 5. Phytotesting of dicotyledonous seeds (Zea mays) in a solution of sodium cyanide with a concentration of 5 mg/l: 1 — 0 day; 2 — 3rd day (seed germination assessment); 3 — 7th day (germination energy, length of roots and sprouts assessment)

из α-гидроксинитрила типа агликона и сахара, подобного D-глюкозе. Когда ткани разрушаются механическим воздействием (дробление, жевание), гликозиды вступают в контакт с эндогенными ферментами — лиазами, и освобождается HCN, защищающий растения от атак, микробов, грибов, насекомых и травоядных животных [30].

Фитотоксичность оценивали по изменению всхожести, энергии прорастания, длины корней и побегов у проростков семян двудольных (см. рис. 4) и однодольных (см. рис. 5) растений при их проращивании в чашках Петри в лабораторных условиях.

При токсикометрических исследованиях установлено, что выбранные нами

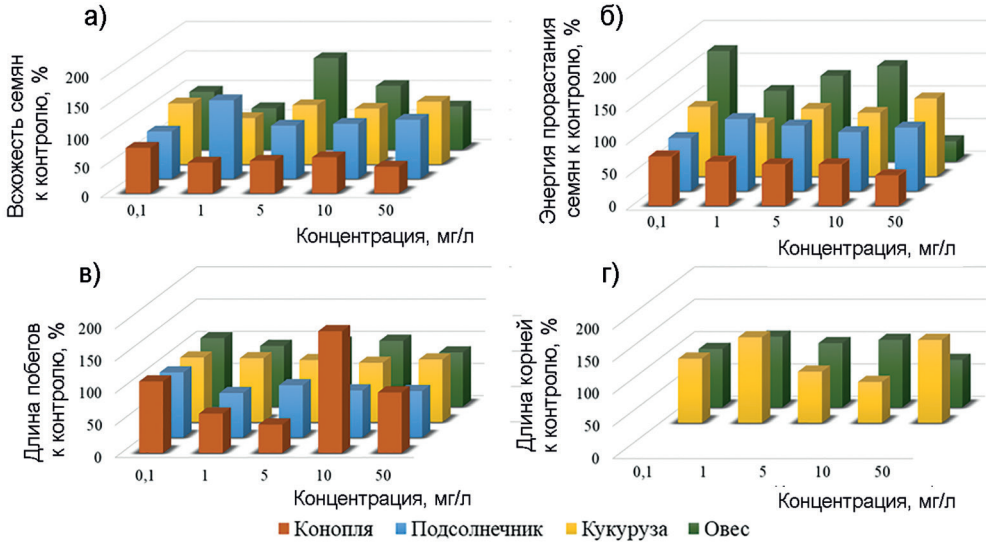

Рис. 6. Результаты фитотестирования: всхожести (а); энергии прорастания (б); длины побегов (в) и длины корней растений (г), экспонированных в растворах цианида натрия различных концентраций, выраженные в процентах к контролю

Fig. 6. Phytotest results: germination (a); germination energy (b); length of assessment (v) and length of roots of plants (g) exposed to sodium cyanide solutions of various concentrations expressed as a percentage of control

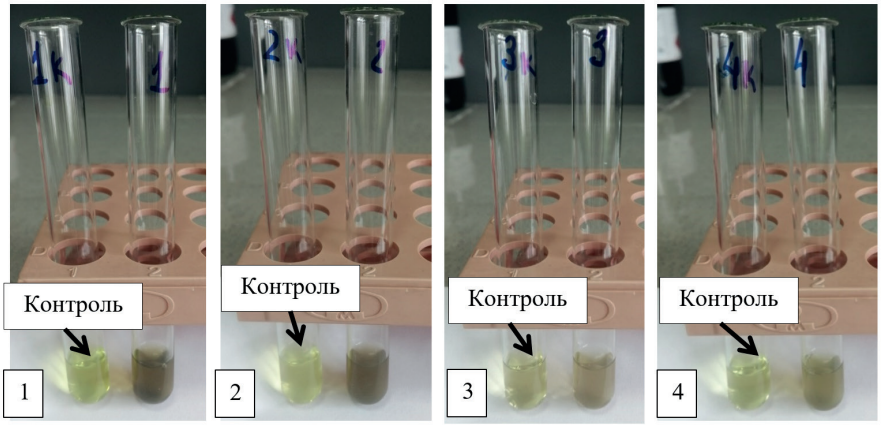

Рис. 7. Результаты тестирования растений на β-ЦАС в белковых фракциях: 1 — овес; 2 — конопля; 3 — подсолнечник; 4 — кукуруза

Fig. 7. Results of testing plants for the presence β-CAS in protein fractions: 1 — Avena sativa; 2 — Cannabis sativa L; 3 — Helianthus; 4 — Zea mays

растения — перспективные для фитодобычи золота, отличаются высокой токсикорезистентностью к цианидам по 4 исследованным тест-параметрам — всхожести семян, энергии прорастания, длине корней и побегов в области концентраций от 0,1 до 50 мг/л (см. рис. 6).

Оптимальными концентрациями, не оказывающими существенного влияния на ростовые реакции растений, являются для однодольных растений (конопли и подсолнечника) 0,1—5 мг/л, двудольных (овса и кукурузы) 0,1—10 мг/л. При концентрациях 50 и более мг/л наблюдается токсическое воздействие.

Как показали ранее выполненные исследования [29, 31, 32], свободные цианиды не накапливаются в растениях,

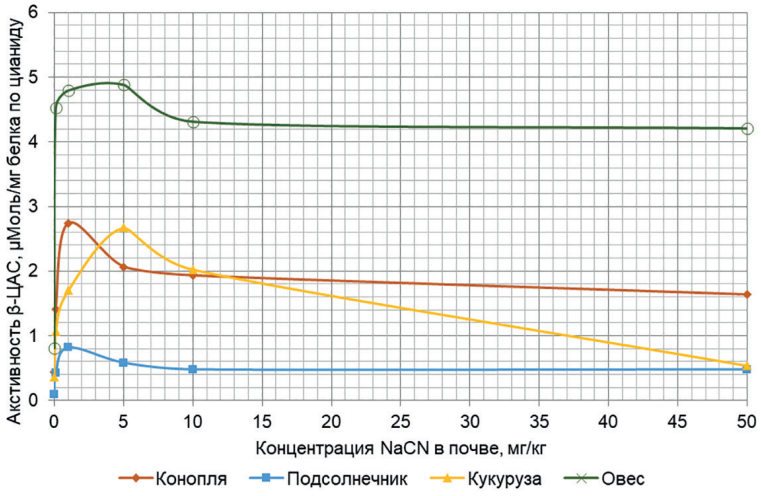

Рис. 8. Изменение активности β-цианоаланинсинтазы (β-ЦАС) в зеленой биомассе опытных растений через 1 сутки после добавления в почву различных концентраций NaCN, μмоль/мг белка по цианиду

Fig. 8. Changes in β-cyanoalanine synthase (β-CAS) activity in green biomass of experimental plants 1 day after adding various concentrations of NaCN to the soil, μmol/mg protein by cyanide

Таблица 2

Сырой вес биомассы растений, выращенных на золотоносных песках после обработки водным раствором цианида натрия различных концентраций, кг
Wet weight of plant biomass grown on gold sands after treatment with an aqueous solution of sodium cyanide of various concentrations, kg

Образец	Концентрация цианида натрия, мг/кг почвы					
	0	0,1	1	5	10	50
Конопля	18,33	25	18,33	12,22	9,44	16,11
Подсолнечник	54,42	53,95	53,49	65,58	48,84	48,84
Кукуруза	88,89	80	94,81	85,19	82,22	66,67
Овес	95	110	171,25	130,63	146,88	135,63

а могут подвергаться метаболическим превращениям под действием трех специфических ферментов: β-цианоаланинсинтазы, тиосульфатсульфидтрансферазы (роданазы) и цианидгидратазы (формамидгидролазы).

При катализе β-цианоаланинсинтазой цианид взаимодействует с цистеином с образованием β-цианаланина и сероводорода, а далее при участии β-цианаланингидратазы превращается в аспарагин. Аспарагин при катализе аспарагиназой путем гидролиза может быть преобразован в аспартат и аммоний. Этот механизм свойственен всем сосудистым растениями и детально изучен нами у водных растений, предложена и реализована технология очистки сточных вод ЗИФ посадками харовых водорослей [29].

На рис. 7 приведены результаты тестирования исследованных растений на наличие β-цианоаланинсинтазы в белковой фракции.

На рис. 8 приведены уровни активности β-ЦАС в растениях при внесении разных концентраций цианида в почву. Максимальное возрастание уровня ферментативной активности отмечается при воздействии цианидов в концентрации 1—5 мг/л у однодольных растений и 10 мг/л у двудольных. Таким образом, подтверждена высокая цианиддетоксицируюшая функция у конопли, кукурузы и овса.

На рис. 9 показаны фазы роста растений гипераккумуляторов на золотоносных эфелевых песках в условиях апробации технологии фитодобычи. По завершении вегетации биомасса растений была срезана, высушена, и в ней оценено накопление золота (табл. 2, 3, рис. 10).

Как следует из приведенных данных, наибольшей золотоаккумулирующей

Таблица 3

Массовая доля золота, мкг/г сухого веса растения (г/т)
Mass fraction of gold, μg/g dry weight of plants (g/t)

Образец	Концентрация цианида натрия, мг/кг почвы					
	0	0,1	1	5	10	50
Подсолнечник	0,018	0,014	0,013	0,016	0,050	0,046
Конопля	0,028	0,014	0,02	0,09	0,12	0,15
Овес	<0,003	<0,003	<0,003	0,019	0,020	0,034
Кукуруза	0,030	0,019	0,018	0,031	0,38	0,53

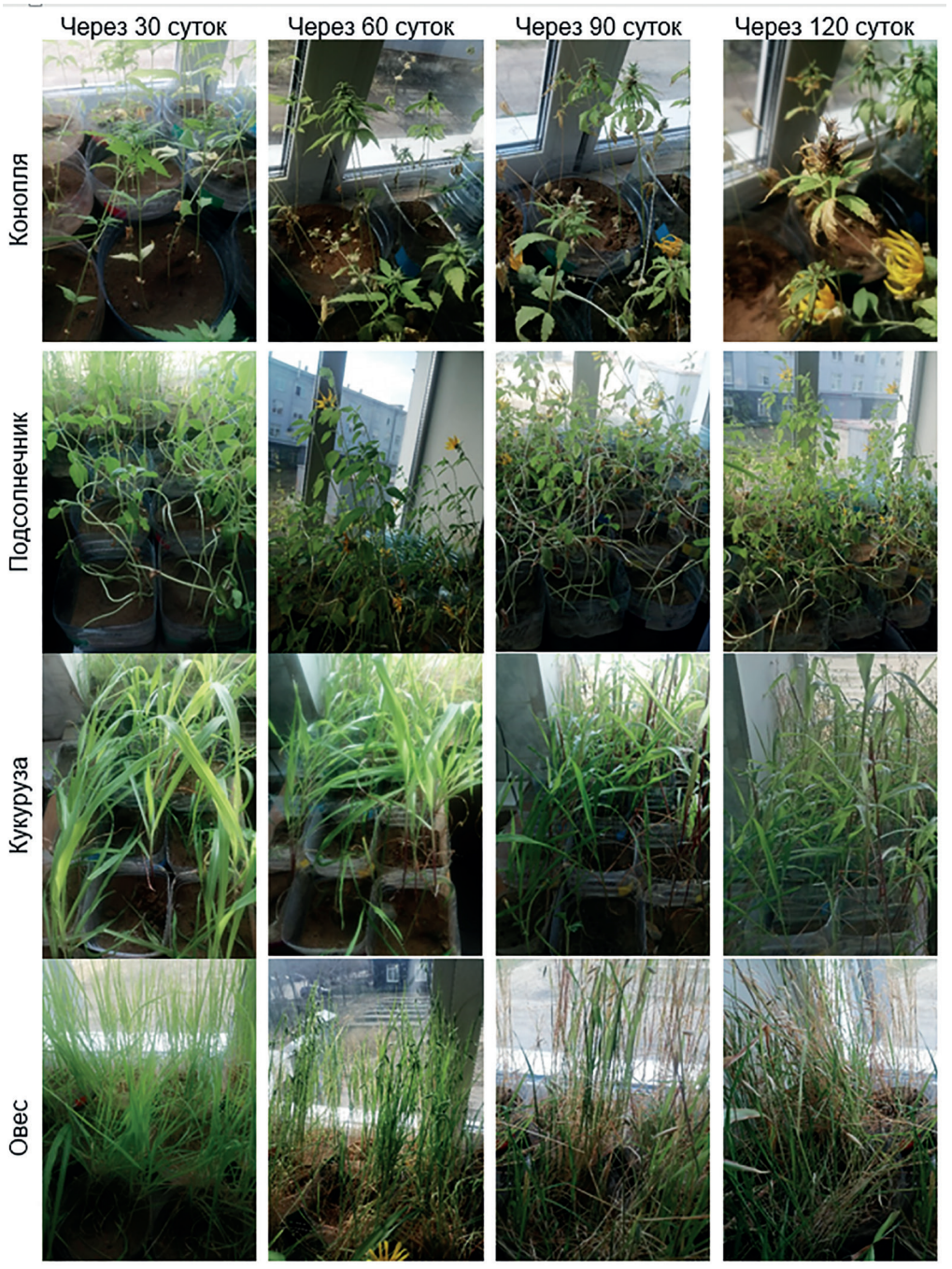

Рис. 9. Фазы развития растений гипераккумуляторов золота в течение 4 месяцев от посадки до технической спелости

Fig. 9. Phases of development of gold hyperaccumulator plants during 4 months from planting to technical ripeness

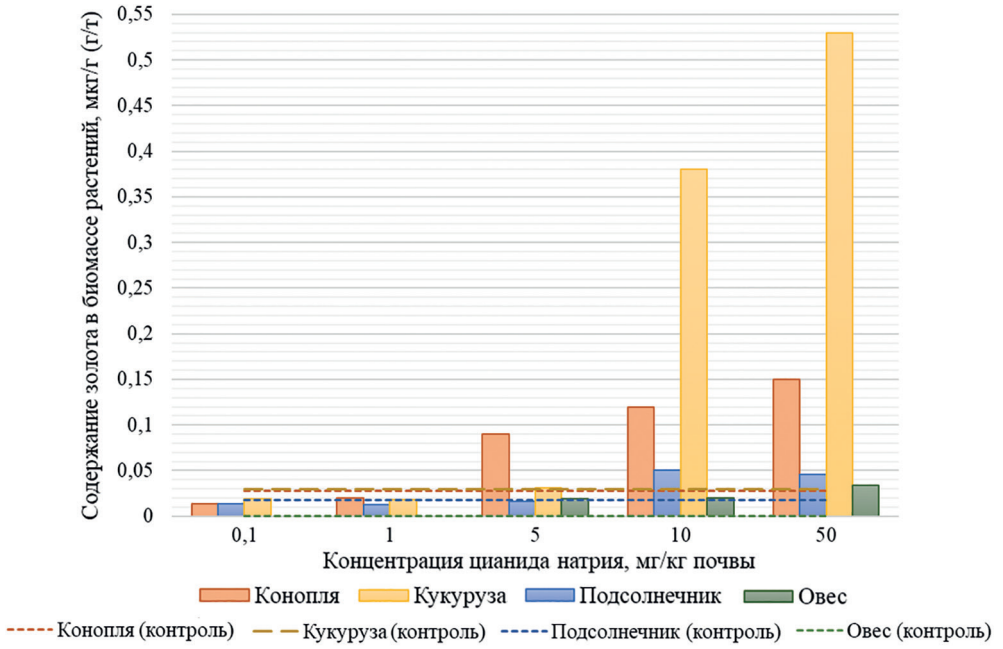

Рис. 10. Содержание золота в биомассе растений при обработке растворами цианида натрия и без обработки (пунктирная линия)

Fig. 10. Gold content in plant biomass when treated with sodium cyanide solutions and without treatment (dashed line)

способностью из исследованных растений обладает кукуруза, техническая конопля. Установлено, что цианид натрия оказывает стимулирующее действие на ростовые и аккумулирующие характеристики исследуемых растений. При воздействии малых концентраций цианида натрия (0,1 — 10 мг/кг почвы) на золотосодержащие почвы, способность всех исследуемых растений аккумулировать золото была выше, чем в контрольных образцах (без обработки водным раствором цианида натрия).

Заключение

Проведенные укрупненные полупромышленные испытания показали, что для условий Бодайбинского района наиболее эффективным является выращивание технической конопли на техногенных месторождениях. Установлено, что для повышения эффективности фитоэкстракции следует однократно вносить в почву цианид натрия в количестве 0,1 — 0,5 мг/кг грунта в конце вегетационного периода. Извлечение мелкодисперсного золота данным методом может достигать 99%.

В качестве растворителя золота целесообразно опробовать тиосульфат натрия в слабощелочной среде и найти оптимальные условия.

Агротехника выращивания технической конопли проста: требуется сеялка СЗС-2,1 в агрегате с трактором Т-150, семена заделываются на глубину 4-6 см, после посева прикатываются сцепом катков 3-ККШ-6.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 06.02.2020 № 101 «Об установлении сортов наркосодержащих растений, разрешенных для культивирования для производства используемых в медицинских целях и (или) ветери-

нарии наркотических средств и психотропных веществ, для культивирования в промышленных целях, не связанных с производством или изготовлением наркотических средств и психотропных веществ, а также требований к сортам и условиям их культивирования» сегодня каждый недропользователь (артель) имеет право производить посевы технической конопли на своих уже отработанных участках и доизвлекать золото, как это делают за рубежом.

Себестоимость извлечения золота из такого отходного сырья будет значительно ниже, чем при его извлечении из россыпей, так как содержание мелкодисперсного золота в эфельных отходах значительное. Фитодобыча требует дальнейшего изучения и промышленных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федоров С. А.*, *Амдур А. М.*, *Малышев А. Н.*, *Каримова П. Ф.* Обзор техногенных и вторичных золотосодержащих отходов и способы извлечения из них золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 346—365. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_346.

2. *Кузнецова И. В.*, *Сафронов П. П.*, *Моисеенко Н. В.* Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей — потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия) // Георесурсы. — 2019. — Т. 21. — № 1. — С. 2—14. DOI: 10.18599/grs.2019.1.2-14.

3. *Самсонов Н. Ю.* Техногенные запасы золота — альтернатива росту золотодобычи // ЭКО. — 2008. — № 8(410). — С. 61—74.

4. *Литвинцев В. С.*, *Алексеев В. С.*, *Краденых И. А.*, *Усиков В. И.* Ресурсный потенциал техногенных золотороссыпных месторождений и стратегия их масштабного освоения // Маркшейдерия и недропользование. — 2017. — № 5. — С. 21—29.

5. *Мирзеханов Г. С.*, *Литвинцев В. С.* Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. — 2018. — № 10. — С. 25—30. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04

6. *Секисов А. Г.*, *Рассказова А. В.*, *Богомяков Р. В.*, *Литвинова Н. М.* Патент РФ № 2018109621, 19.03.2018. Способ комбинированной разработки месторождений золота из россыпей и техногенных минеральных образований. 2013. Бюл. № 4.

7. *Секисов А. Г.*, *Рассказова А. В.*, *Богомяков Р. В.* Патент РФ № 2018116970, 07.05.2018. Способ комбинированной разработки россыпных месторождений. 2019. Бюл. 14.

8. *Литвинцев В. С.* Основные направления стратегии освоения техногенных рудных и россыпных месторождений благородных металлов // Горный журнал. — 2013. — № 10. — С. 38—41.

9. *Шумилова Л. В.*, *Хатькова А. Н.*, *Размахнин К. К.*, *Простакишин М. Ф.* Исследование экологощадящих методов повышения извлечения золота из упорного минерального сырья // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2023. — Т. 29. — № 3. — С. 74—90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-74-90.

10. *Усов Г. А.*, *Фролов С. Г.*, *Тарасов Б. Н.* Разработка технологии извлечения россыпного микронного золота с использованием диспергирования глинистой составляющей вмещающих пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 75—82. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-75-82.

11. *Иванников С. И.*, *Эпов Д. Г.*, *Крысенко Г. Ф.*, *Медков М. А.*, *Братская С. Ю.*, *Юдаков А. А.* Комплексный подход к извлечению золота из техногенных объектов золотодобычи Дальнего Востока России // Вестник ОНЗ РАН. — 2013. — № 5. — NZ1001. DOI: 10.2205/2013NZ000115.

12. *Дорош Е. А.*, *Тальгамер Б. Л.* Обоснование рациональных способов вовлечения в разработку отвалов россыпной золотодобычи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2022. — Т. 20. — № 3. — С. 64—76. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-64-76.

13. *Верхозина В. А.*, *Верхозина Е. В.*, *Шкетова Л. И.*, *Тимофеева С. С.* Исследование биотехнологической переработки сульфидной золотосодержащей руды // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 109—117. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117.

14. *Верхозина В. А.*, *Верхозина Е. В.*, *Шкетова Л. Е.* Поиск инновационных экологически чистых технологий при переработке упорных концентратов золотосодержащей руды // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2012. — № 4 (63). — С. 48—53.

15. *Тимофеева С. С.* Фитомайнинг: современное состояние и перспективы // XXI век. Техносферная безопасность. — 2018. — Т. 3. — № 3. — С. 112—128. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-112-12.

16. *Булаев А. Г.* Новые направления в развитии биогидрометаллургии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 56—87. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_56.

17. *Krisnayanti B., Anderson C. W. N.* Gold phytomining: A new idea for environmental sustainability in Indonesia // Indonesian Journal on Geoscience. 2014, vol. 1, no. 1, pp. 1—7. DOI: 10.17014/ijog.1.1.1-7.

18. *Krisnayanti B., Anderson C. W. N., Sukartono S., Afandi Y., Suheri H., Ekawanti A.* Phytomining for artisanal gold mine tailings management // Minerals. 2016, vol. 6, pp. 2—11. DOI: 10.3390/min6030084.

19. *Handayanto E., Muddarisna N.*, *Krisnayanti B. D.* Induced phytoextraction of mercury and gold from cyanidation tailings of small-scale gold mining area of West Lombok, Indonesia // Advances in Environmental Biology. 2014, vol. 8, no. 5, pp. 1277—1284.

20. *Pisco R. R.*, *Yarce J. P.* G., *Restrepo J. J.* G., *Palacio D. G.* Gold phytoextraction and mining-degraded soil reclamation // Acta Agronomica. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 574—579. DOI: 10.15446/acag.v66n4.59773.

21. *Saim A. K.*, *Ntiri-Bekoh R., Orleans-Boham H., Amankwah R. K.* Gold phytoextraction by Alocasia macrorrhizos (Giant Taro): implications in phytomining / Proceedings of 6th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference. 2020, pp. 272—280.

22. *Pavilonis B., Grassman J., Johnson G., Diaz Y. Caravanos J.* Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes // Environmental Research. 2017, vol. 154, pp. 1—9.

23. *Kyaw W. T.*, *Kuang X., Sakakibara M.* Health Impact assessment of artisanal and small—scale gold mining area in Myanmar, Mandalay Region: Preliminary research // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, vol. 17, no. 18, pp. 6757—6769. DOI: 10.3390/ijerph17186757.

24. *Emmanuel A. Y.*, *Jerry C. S.*, *Dzigbodi D. A.* Review of environmental and health impacts of mining in Ghana // Journal of Health & Pollution. 2018, vol. 8, no. 17, pp. 43—52. DOI: 10.5696/2156-9614-8.17.43.

25. *Porgo M., Gokyay O.* Environmental impacts of gold mining in Essakane site of Burkina Faso // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2017, vol. 23, no. 3, pp. 641—654. DOI: 10.1080/10807039.2016.1263930.

26. *Дроздова И. В.*, *Тимофеева С. С.*, *Тимофеев С. С.* Перспективы фитодобычи золота из перемытых песков россыпных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 99—111. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_ 5_0_99.

27. *Верхозин С. С.* Фитодобыча как новый способ извлечения ценных металлов с помощью растений. Фиторазведка, агродобыча // Золотодобыча. — 2018. — № 236. URL: https://zolotodb.ru/article/11905 (дата обращения 07.01.2024).

28. *Артамонова В. С.*, *Бортникова С. Б.*, *Оплеухин А. А.* Фитотоксичность лежалых отходов цианирования золотосодержащей руды на территории накопленного экологического ущерба // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. — 2020. — № 1. — С. 33—40. DOI: 10.17072/1994-9952-2020-1-33-40.

29. *Привалова Н. М.*, *Процай А. А.*, *Литвиненко Ю. Ф.*, *Марченко Л. А.*, *Паньков В. А.* Определение фитотоксичности методом проростков // Успехи современного естествознания. — 2006. — № 10. — С. 45—45.

30. *Yu X. Z.* Uptake, assimilation and toxicity of cyanogenic compounds in plants: facts and fiction // International Journal of Environmental Science and Technology. 2015, vol. 12, pp. 763–774. DOI: 10.1007/s13762-014-0571-6.

31. *Тимофеева С. С.*, *Тимофеев С. С.*, *Беспалова В. З.* Условия труда на золотоизвлекательных фабриках и инновационные способы их улучшения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 9(92). – С. 100–108.

32. *Yu X. Z.*, *Lu P. C.*, *Yu Z.* On the role of β-cyanoalanine synthase (CAS) in metabolism of free cyanide and ferricyanide by rice seedlings // Ecotoxicology. 2012, vol. 21, no. 2, pp. 548–556. DOI: 10.1007/s10646-011-0815-x. ГИАБ

REFERENCES

1. Fedorov S. A., Amdur A. M., Malyshev A. N., Karimova P. F. Industrial and secondary gold-bearing waste and gold recovery techniques: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11-1, pp. 346–365. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_346.

2. Kuznetsova I. V., Safronov P. P., Moiseenko N. V. Matter-mineral characteristics of technogene placers – potential sources of precious metals (on the example of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye, Russia). *Georesursy*. 2019, vol. 21, no. 1, pp. 2–14. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.2019.1.2-14.

3. Samsonov N. Yu. Techno-genous gold stock – an alternative to the gold mining growth. *ECO*. 2008, no. 8(410), pp. 61–74. [In Russ].

4. Litvintsev V. S., Alexeev V. S., Kradenykh I. A., Usikov V. I. Resource potential of technogenic gold deposits and strategy of their wide development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017, no. 5, pp. 21–29. [In Russ].

5. Mirzekhanov G. S., Litvintsev V. S. Mining waste management at precious metal placers in the Russian Far East: state-of-the-art and problems. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 10, pp. 25–30. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04

6. Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Bogomyakov R. V., Litvinova N. M. *Patent RU 2018109621*, 19.03.2018. [In Russ].

7. Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Bogomyakov R. V. *Patent RU 2018116970*, 07.05.2018. [In Russ].

8. Litvintsev V. S. The main directions of the strategy for the development of technology-related ore and placer deposits of noble metals. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 10, pp. 38–41. [In Russ].

9. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhin K. K., Prostakishin M. F. Research of environmentally friendly methods of increasing the extraction of gold from stubborn mineral raw materials. *Transbaikal state university journal*. 2023, vol. 29, no. 3, pp. 74–90. [In Russ]. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-74-90.

10. Usov G. A., Frolov S. G., Tarasov B. N. Developing the technology of extracting placer micron sized gold with the use of enclosing rock clay bond dispersion. *Minerals and Mining Engineering*. 2019, no. 5, pp. 75–82. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-75-82.

11. Ivannikov S. I., Epov D. G., Krisenko G. F., Medkov M. A., Bratckaya S. Yu., Yudakov A. A. Comprehensive approach to recovery of gold from technogenic objects of Russian Far East. *Vestnik otdeleniya nauk o Zemle RAN*. 2013, no. 5. NZ1001. [In Russ]. DOI: 10.2205/2013NZ000115.

12. Dorosh E. A., Talgamer B. L. Rationale for feasible ways of involving dumps of placer gold mining in the development. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 64–76. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-64-76.

13. Verkhozina V. A., Verkhozina E. V., Shketova L. E., Timofeeva S. S. A study of biotechnological processing of sulphide gold-containing ores. *Proceedings of universities. Applied Chemistry and biotechnology*. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 109–117. [In Russ]. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117.

14. Verkhozina V. A., Shketova L. E., Verkhozina E. V. Search for innovative, environmentally friendly technologies when processing refractorygold ore concentrates. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012, no. 4 (63), pp. 48–53. [In Russ].

15. Timofeeva S. S. Phytomining: current state and prospects. *XXI century. Technosphere safety*. 2018, vol. 3, no. 3, pp. 112–128. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-112-12.

16. Bulaev A. G. New trends in biohydrometallurgy. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 56–87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_56.

17. Krisnayanti B., Anderson C. W. N. Gold phytomining: A new idea for environmental sustainability in Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*. 2014, vol. 1, no. 1, pp. 1 — 7. DOI: 10.17014/ijog.1.1.1-7.

18. Krisnayanti B., Anderson C. W. N., Sukartono S., Afandi Y., Suheri H., Ekawanti A. Phytomining for artisanal gold mine tailings management. *Minerals*. 2016, vol. 6, pp. 2 — 11. DOI: 10.3390/min6030084.

19. Handayanto E., Muddarisna N., Krisnayanti B. D. Induced phytoextraction of mercury and gold from cyanidation tailings of small-scale gold mining area of West Lombok, Indonesia. *Advances in Environmental Biology*. 2014, vol. 8, no. 5, pp. 1277 — 1284.

20. Pisco R. R., Yarce J. P. G., Restrepo J. J. G., Palacio D. G. Gold phytoextraction and mining-degraded soil reclamation. *Acta Agronomica*. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 574 — 579. DOI: 10.15446/acag.v66n4.59773.

21. Saim A. K., Ntiri-Bekoh R., Orleans-Boham H., Amankwah R. K. Gold phytoextraction by Alocasia macrorrhizos (Giant Taro): implications in phytomining. *Proceedings of 6th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. 2020, pp. 272 — 280.

22. Pavilonis B., Grassman J., Johnson G., Diaz Y. Caravanos J. Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes. *Environmental Research*. 2017, vol. 154, pp. 1 — 9.

23. Kyaw W. T., Kuang X., Sakakibara M. Health Impact assessment of artisanal and small — scale gold mining area in Myanmar, Mandalay Region: Preliminary research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, no. 18, pp. 6757 — 6769. DOI: 10.3390/ijerph17186757.

24. Emmanuel A. Y., Jerry C. S., Dzigbodi D. A. Review of environmental and health impacts of mining in Ghana. *Journal of Health & Pollution*. 2018, vol. 8, no. 17, pp. 43 — 52. DOI: 10.5696/2156-9614-8.17.43.

25. Porgo M., Gokyay O. Environmental impacts of gold mining in Essakane site of Burkina Faso. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal.* 2017, vol. 23, no. 3, pp. 641 — 654. DOI: 10.1080/10807039.2016.1263930.

26. Drozdova I. V., Timofeeva S. S., Timofeev S. S. Prospects for gold phytorecovery from washed sand at placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5, pp. 99 — 111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_ 5_0_99.

27. Verhozin S. S. Phytoextraction like a new way of extraction of valuable metals with the help of plants. Phytoexploration, agricultural production. *Zolotodobbycha*. 2018, no. 236. [In Russ], available at: https://zolotodb.ru/article/11905 (accessed 07.01.2024).

28. Artamonova V. S., Bortnikova S. B., Opleuchin A. A. Phytotoxicity of stale cyanidation wastes of polymetallic ores in areas of accumulated environmental damage. *Bulletin of Perm university. Biology*. 2020, no. 1, pp. 33 — 40. [In Russ]. DOI: 10.17072/1994-9952-2020-1-33-40.

29. Privalova N. M., Protsay A. A., Litvinenko Y. F., Marchenko L. A., Pankov V. A. Defination of phitotaxication by method of sprouting. *Advances in current natural sciences*. 2006, no. 10, pp. 45 — 45. [In Russ].

30. Yu X. Z. Uptake, assimilation and toxicity of cyanogenic compounds in plants: facts and fiction. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015, vol. 12, pp. 763 — 774. DOI: 10.1007/s13762-014-0571-6.

31.Timofeeva S. S., Timofeev S. S., Bespalova V. Z. Working conditions at gold concentration plants and innovative ways to improve them. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014, no. 9(92), pp. 100 — 108. [In Russ].

32. Yu X. Z., Lu P. C., Yu Z. On the role of β-cyanoalanine synthase (CAS) in metabolism of free cyanide and ferricyanide by rice seedlings. *Ecotoxicology*. 2012, vol. 21, no. 2, pp. 548 — 556. DOI: 10.1007/s10646-011-0815-x.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимофеева Светлана Семеновна[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: timofeeva@istu.edu,
ORCID ID: 0000-0001-8427-3732,

Дроздова Ирина Владиславовна[1] — аспирант,
e-mail: drozdovaiv@istu.edu,
ORCID ID: 0000-0003-2234-6566,
[1] Иркутский национальный исследовательский технический университет.
Для контактов: Дроздова И.В., e-mail: drozdovaiv@istu.edu.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.S. Timofeeva[1], Dr. Sci. (Eng.),
Professor, e-mail: timofeeva@istu.edu,
ORCID ID: 0000-0001-8427-3732,
I.V. Drozdova[1], Graduate Student,
e-mail: drozdovaiv@istu.edu,
ORCID ID: 0000-0003-2234-6566,
[1] Irkutsk National Research Technical University,
664074, Irkutsk, Russia.
Corresponding author: I.V. Drozdova, e-mail: drozdovaiv@istu.edu.

Получена редакцией 16.02.2024; получена после рецензии 21.03.2024; принята к печати 10.06.2024.
Received by the editors 16.02.2024; received after the review 21.03.2024; accepted for printing 10.06.2024.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕССОВОГО СОЕДИНЕНИЯ БУРОВЫХ КОРОНОК УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ТИПА КНШ ПО КРИТЕРИЮ НАТЯГА

(№ 1268/07-24 от 07.05.2024; 7 с.)

Боярских Илья Геннадьевич — старший преподаватель,
Уральский государственный горный университет, e-mail: igb2000@mail.ru.

Проведен анализ влияния размерной точности соединения «твердосплавная вставка — установочное отверстие корпуса» в целях достижения заданной точности гарантированного натяга при изготовлении буровых коронок типа КНШ. Изучено влияние методов размерной обработки на точность замыкающего звена размерной цепи (натяга). Обоснована величина допусков на точность размеров твердосплавных вставок и посадочных отверстий корпуса в соответствии с техническими условиями. Предложены средства механизации 100%-го контроля в условиях серийного производства твердосплавных изделий и буровых коронок с вероятностной их оценкой.

Ключевые слова: размерная точность, твердосплавная вставка, натяг, буровая коронка, посадочные отверстия, корпус.

PREREQUISITES FOR IMPROVING THE ACCURACY OF PRESS CONNECTION OF IMPACT DRILL BITS OF KNSH TYPE ACCORDING TO THE TENSION CRITERION

I.G. Boyarskykh, Senior Lecturer, Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia, e-mail: igb2000@mail.ru.

The influence of the dimensional accuracy of the «carbide insert — housing mounting hole» connection is analyzed in order to achieve a given accuracy of guaranteed tension in the manufacture of KNSh type drill bits. The influence of dimensional processing methods on the accuracy of the closing link of the dimensional chain (tension) has been studied. The value of tolerances for the accuracy of the dimensions of carbide inserts and housing mounting holes is justified in accordance with the technical conditions. The means of mechanization of 100% control in the conditions of mass production of carbide products and drill bits with their probabilistic assessment are proposed.

Key words: dimensional accuracy, carbide insert, tension, drill bit, mounting holes, housing.