

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ РОССЫПЕЙ С РАЗДЕЛЬНОЙ ВЫЕМКОЙ И ПЕРЕРАБОТКОЙ ПЕСКОВ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В связи с постепенным истощением минерально-сырьевой базы россыпного золота недропользователи вынуждены вести отработку сложноструктурных месторождений со все более низким содержанием металла и возрастающей долей мелкого золота в песках продуктивных пластов. Сохранение и даже увеличение в отдельных регионах количества добытого из россыпей золота достигается прежде всего за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемой минеральной массы с применением все более мощного оборудования, при этом технологии обогащения песков по-прежнему в основном ориентированы на гравобогатимое золото с крупностью более 0,5 мм, что ведет к большим потерям металла. Существенно снизить потери золота позволяют технологии многостадийного обогащения, однако расширение их применения сдерживается относительно низкой производительностью и высокими затратами на обогащение. **Цель работы.** Повышение извлечения металла при открытой разработке сложноструктурных россыпных месторождений за счет применения усовершенствованной технологии освоения сложноструктурных россыпей с раздельной выемкой и переработкой песков. **Результаты.** В статье предлагается вести опережающую глубоко-селективную выемку включений богатых песков продуктивного пласта посредством модернизированного колесного скрепера с их транспортировкой на многостадийное обогащение с применением различных установок, включая оборудование для центробежного обогащения и отсадочных машин, что обеспечивает высокое извлечение золота разной крупности, в том числе мелкого. Модернизированный колесный скрепер, оснащенный комбинированным рабочим оборудованием, осуществляет рыхление слоя богатых песков, а затем после разворота производит загрузку разрыхленной минеральной массы в ковш с использованием на заключительном этапе активной заслонки, которая продвигает собравшиеся в виде призмы волочения пески в ковш, что обеспечивает необходимое качество селективной выемки и высокое заполнение ковша. Высокопроизводительная выемка и промывка рядовых песков осуществляется бульдозерами и гидроэлеваторными шлюзовыми приборами. **Выводы.** Применение предлагаемой технологии позволит существенно сократить технологические потери и увеличить извлечение металла из песков сложноструктурных россыпей.

Ключевые слова: продуктивный пласт, богатые пески, гравобогатимое золото, мелкое золото, колесный скрепер, комбинированное рабочее оборудование, многостадийное обогащение, извлечение металла

© Чебан А.Ю., 2024

Для цитирования

Чебан А.Ю. Усовершенствованная технология освоения сложноструктурных россыпей с раздельной выемкой и переработкой песков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 15-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVED TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF COMPLEX-STRUCTURAL PLACERS WITH SEPARATE EXCAVATION AND PROCESSING OF SANDS

Cheban A.Yu.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance and purpose of the study. Due to the gradual depletion of the mineral resource base of placer gold, subsoil users are forced to develop complex-structured deposits with increasingly low metal content and an increasing proportion of fine gold in the sands of productive reservoir. The preservation and even increase in certain regions of the amount of gold mined from placers is achieved primarily due to the accelerated increase in the volume of processed mineral mass using powerful equipment, while sand enrichment technologies are still focused on gold recovered by gravity with a particle size of more than 0,5mm, which leads to large metal losses. Multi-stage enrichment technologies can significantly reduce gold losses, but the expansion of their use is hampered by relatively low productivity and high enrichment costs. **Objective.** The research is aimed at increasing metal recovery during open-pit mining of complex-structured placer deposits through the use of improved technology for the development of complex-structured placers with selective mining and processing of sand. **Results.** The article proposes to carry out advanced, deep-selective mining of inclusions of rich sands of the productive reservoir using a modernized wheel tractor-scraper with their transportation to multi-stage enrichment using various units, including equipment for centrifugal enrichment and jigging machines, which ensures high recovery of gold of different sizes, including fine ones. A modernized wheel tractor-scraper, equipped with combined working equipment, loosens a layer of rich sands, and then, after turning, loads the loosened mineral mass into the dipper using, at the final stage, an active damper, which pushes the sands collected in the form of a soil prism into the dipper, which provides the necessary selective mining quality and high dipper filling. High-performance mining and ordinary sand washing are carried out by bulldozers and hydraulic elevator sluice equipment. **Conclusions.** The use of the proposed technology will significantly reduce technological losses and increase the extraction of metal from sands of complex structured placers.

Keywords: productive reservoir, rich sands, gold recovered by gravity, fine gold, wheel tractor-scraper, combined work equipment, multi-stage enrichment, metal recovery

For citation

Cheban A.Yu. Improved Technology for Development of Complex-Structural Placers with Separate Excavation and Processing of Sands. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 15-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22>

Введение

В связи с истощением минерально-сырьевой базы происходит перманентное усложнение горнотехнических и горно-геологических условий, вовлекаемых в отработку россыпных месторождений золота [1–4]. В настоящее время недропользователям приходится разрабатывать сложноструктурные продуктивные пласты со все уменьшающимся содержанием и крупностью золота, увеличивающейся глубиной залегания, повышенной глинистостью и неравномерным содержанием полезного компонента. Согласно исследованию [1], за последние 20 лет в ряде районов Якутии доля простых по геоморфологии залежей уменьшилась более чем в два раза при одновременном увеличении числа сложных, за это же время в Якутии среднее содержание золота в песках россыпных месторождений уменьшилось в 1,9 раза с 1,8 до 0,95 г/м³.

Валовая выемка минеральной массы сложно-структурных пластов приводит к перемешиванию богатых и рядовых песков, а также их разубоживанию некондиционными песками, что ведет к росту объемов перерабатываемой минеральной массы, уменьшению в ней среднего содержания металла, а в результате к повышению себестоимости конечной продукции. Таким образом, все большее вовлечение в отработку сложноструктурных месторождений со сравнительно невысокими содержаниями полезного компонента в песках и значительным количеством мелкого золота требует разработки геотехнологий, основанных на соблюдении принципов энерго- и ресурсосбережения, позволяющих повысить эффективность горного производства [5–8].

Состояние вопроса и постановка проблемы

На большинстве россыпных месторождений распределение запасов как по содержанию, так и по геометрическим характеристикам изменяется в соответствии с определенной природной закономерностью по кластерному типу [5]. Так, проведенное в Институте горного дела Севера СО РАН с применением компьютерной числовой модели исследование по определению качественной структуры запасов песков и металла россыпи реки Большой Кураных показало, что в 20% песков с содержанием золота более $0,3 \text{ г/м}^3$ находится 62% металла, при этом всего в 2% богатых песков с содержанием более 1 г/м^3 сосредоточено 17% золота [8]. В исследовании [9] выявлено, что на некоторых россыпях имеется концентрация самородков в линзовидных скоплениях, вытянутых по простиранию россыпных тел, размеры линз варьируют от 3×1 до 30×4 м, данные скопления отделены друг от друга промежутками пониженной продуктивности. Неравномерность содержания полезных компонентов в россыпях прослеживается не только в плане, но и в разрезе.

Сохранение и даже увеличение в отдельных регионах количества добытого из россыпей золота достигается прежде всего за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемой минеральной массы с применением все более мощного оборудования, при этом технологии обогащения песков по-прежнему в основном ориентированы на гравобогащаемое золото с крупностью более $0,5$ мм, что ведет к большим потерям металла [10-12]. Данные по технической оснащенности предприятий, ведущих открытую разработку ряда золотороссыпных месторождений Якутии и Магаданской области, представленные в работах [13, 14], также показывают, что выемка и перемещение песков и торфов в основном ведется с использованием сверхтяжелых бульдозеров Komatsu D-355, D-375, D-475 и других мощных машин. При этом необходимо отметить, что ширина отвала тяжелых и сверхтяжелых бульдозеров, выполняющих основной объем работ, составляет $4-5$ м и более. Подобные размеры рабочих органов выемочно-транспортирующих машин не позволяют вести качественную селективную выемку разноразмерных песков сложноструктурных пластов россыпных месторождений. В результате пески с различным содержанием металла подаются на установку, где промываются в одном режиме, без учета изменчивости геолого-технологических характеристик минерального сырья.

Изменчивость геометрии залежей золота и других ценных полезных ископаемых имеет важное значение при выборе технико-технологических решений для отработки месторождений [15-17]. Существенного повышения эффективности разработки россыпей возможно достичь путем уменьшения объема направляемых на промывку песков. Так, после обследования работы одного из приисков Южной Якутии выявлено,

что распределение металла по дражным полигонам крайне неравномерное и изменяется от $0,001$ до $1,770 \text{ г/м}^3$, в результате чего $40-80\%$ песков перерабатывались драгами практически впустую [16], в результате была предложена усовершенствованная технология разработки россыпных месторождений с применением драг, предполагающая адаптацию технологии дражной разработки к закономерностям кластерной организации месторождения с выборочной отработкой песков, что должно привести к повышению в $1,5-2,5$ раза среднего содержания золота в перерабатываемых песках, повышению до двух раз выработки конечной продукции на одного работающего при одновременном снижении стоимости металла на $10-25\%$. Это позволит включить в разработку минерально-сырьевую базу ряда месторождений с ныне нерентабельными запасами.

В исследовании [18] предлагается способ комбинированной разработки песков россыпного месторождения золота реки Большой Кураных, заключающийся в разделении песков по качеству путем установления внутренних границ продуктивной части с выделением по содержанию полезного компонента песков высокого и низкого качества, выемке добычным оборудованием, гидравлической сортировке песков различного качества в непосредственной близости от места добычи, транспортировке полученной пульпы двумя потоками: одним с высоким содержанием полезного компонента – непосредственно на обогащение, а вторым с меньшим содержанием полезного компонента – в промежуточную технологическую емкость, в которой происходит естественное разделение по плотности минералов породы и металла в водной среде с концентрацией золота в нижнем слое. После чего из технологической емкости верхний слой убирают в отвал, а обогащенный полезным компонентом нижний слой направляют на переработку.

Институтом горного дела ДВО РАН разработана технология формирования продуктивных зон в приплотиковой части техногенной россыпи за счет осуществления миграции частиц золота преимущественно в вертикальном направлении [19]. Технология подразумевает создание в блоке техногенных песков фильтрационного потока воды, перетекающей из водозаводной канавы в верхней части блока в аккумуляющую канаву в нижней части блока, что способствует процессам миграции полезного компонента в приплотиковую часть пласта. Экспериментальные исследования показали, что за два промывочных сезона возможно формирование продуктивной зоны с кондиционным содержанием металла.

В работе [20] на основе анализа гранулометрических характеристик песков и металла по совмещенной шкале крупности обоснована возможность дополнительного увеличения объема выделяемой некондиционной фракции на $5-37\%$, которая на стадии грохочения направляется в отвал. Установлено, что на отдельных россыпях возможно снижение крупно-

сти питания до размера менее 30 мм, что позволит при ведении обогащительных процессов использовать оборудование с меньшей производительностью, но с более высокими показателями извлечения.

Золотосодержащие пески в настоящее время в основном перерабатываются с применением гидроэлеваторных шлюзовых приборов (ПГШ) [3]. Различные исследования показывают, что на многих россыпях значительная часть металла представлена мелким и «тонким» золотом размером менее 0,2 мм, это предопределяет высокие потери полезного компонента при промывке песков посредством ПГШ, которые составляют до 50–70% металла данного класса крупности [21]. Также при обогащении песков на ПГШ существенны потери золота крупностью $-0,5+0,2$ мм, составляющие до 30% [21]. Снизить потери металла возможно за счет применения многостадийной технологии обогащения, однако в связи с более высокими капитальными и эксплуатационными затратами данное оборудование целесообразно применять при относительно высоком содержании мелкого и «тонкого» золота в песках [21, 22]. Очевидно, что многостадийную технологию обогащения, обеспечивающую максимальное извлечение золота, необходимо использовать прежде всего при переработке богатых песков для получения наибольшего эффекта.

Известна комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегających россыпей золота [23], заключающаяся в опережающем извлечении богатых песков за счет механического расширения скважин специальным выемочным модулем и скважинной гидродобычи с направлением поднятых на поверхность песков на многостадийное обогащение и последующей доработке оставшихся запасов

пласта с использованием скважинного выщелачивания. Существенным недостатком скважинного выщелачивания является неполное растворение крупных золотинок размером более 1-1,5 мм, а также золотинок невысокой пробыности (менее 0,800), количество которых на некоторых месторождениях может достигать 20-40% [24].

Целью данного исследования является повышение извлечения металла при открытой разработке сложноструктурных россыпных месторождений золота за счет применения технологии добычи и переработки с глубокоселективной выемкой богатых песков посредством модернизированного колесного скрепера с подачей на многостадийное обогащение, а также выемкой и транспортировкой рядовых песков бульдозерами с их обогащением на гидроэлеваторных шлюзовых приборах.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН обоснована технология освоения сложноструктурных россыпей, обеспечивающая повышение полноты извлечения металла из песков продуктивного пласта. В ходе эксплуатационной разведки месторождения производится оконтуривание зон богатых и рядовых песков. После вскрытия продуктивного пласта 1 (см. рисунок) осуществляется опережающая глубокоселективная выемка богатых песков посредством модернизированного колесного скрепера 2 с комбинированным рабочим оборудованием, прототипом для которого является колесный скрепер, оснащенный активной заслонкой для улучшения заполнения ковша разрыхленной горной массой [25].

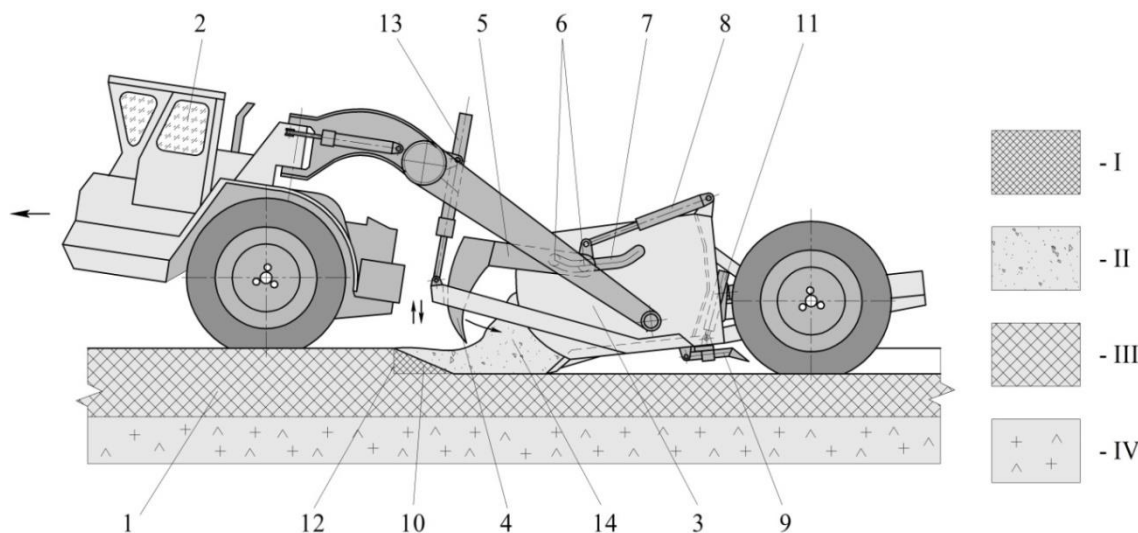


Рисунок. Схема опережающей выемки богатых песков продуктивного пласта модернизированным колесным скрепером: I, II – богатые пески соответственно в естественном залегании, в разрыхленном состоянии; III – рядовые пески; IV – плотик

Figure. Scheme of advanced extraction of rich sands of a productive reservoir with a modernized wheel tractor-scraper: I, II are rich sands in natural occurrence and in a loosened condition, respectively; III is ordinary sands; IV is bedrock

Модернизированный колесный скрепер 2 с комбинированным рабочим оборудованием кроме ковша 3 с активной заслонкой 4, тяги 5, которые на роликах 6 перемещаются в направляющих 7 посредством гидроцилиндров 8, также снабжен рыхлителем 9 с зубьями. Применение рыхлителя 9 целесообразно для предварительной подготовки к выемке связных песков, имеющих повышенное сопротивление копанью в связи с содержанием существенного количества глинистых частиц. Рыхление осуществляется на глубину, соответствующую мощности слоя богатых песков, и составляет 0,3–0,4 м. Если мощность слоя богатых песков больше, то их выемка ведется за 2–3 прохода, с предварительным рыхлением песков перед каждым проходом на всю длину богатого включения.

Если в продуктивном пласте слой богатых песков покрыт рядовыми песками, то первоначально бульдозером снимается слой, содержащий рядовые пески. Селективная выемка богатых песков из продуктивного пласта 1 (см. рисунок) осуществляется следующим образом. В случае если пески связные, колесный скрепер 2, двигаясь холостым ходом по зоне богатых песков 10 к месту начала загрузки, посредством гидроцилиндров 11 опускает рыхлитель 9 с зубьями и производит дезинтеграцию слоя богатых песков до границы 12 с рядовыми песками. Перед выемкой несвязных или слабосвязных богатых песков их предварительное рыхление не проводится. Затем колесный скрепер 2 разворачивается, посредством гидроцилиндров 8 и 13 производится соответственно выдвижение активной заслонки 4 вперед-вверх и опускание ковша 3. В процессе движения колесного скрепера 2 за счет силы тяги осуществляется заполнение ковша 3 разрыхленной минеральной массой, на конечном этапе заполнения перед ковшом формируется призма волочения 14, содержащая значительный объем богатых песков. При приближении ковша к границе 12 между богатыми и рядовыми песками колесный скрепер 2 останавливается и гидроцилиндры 8 посредством тяг перемещают активную заслонку 4 назад в исходное положение. Активная заслонка 4 продвигает в ковш 3 богатые пески из призмы волочения 14, исключая тем самым перемешивание богатых и рядовых песков и обеспечивая высокую заполняемость ковша 3. Ожидаемый коэффициент наполнения ковша с учетом перемещаемого активной заслонкой объема песков составит 0,9–1,0, в то же время заполнение ковша только за счет силы тяги скрепера в среднем равно 0,6–0,8 [26].

Путь заполнения ковша в среднем составит 15–20 м, при этом, в случае если длина богатого включения меньше пути заполнения ковша, ковш остается недогруженным, так как выемка ведется до границы богатых и рядовых песков, а если больше – то выемка богатого включения на всю длину осуществляется за несколько последовательных проходов. После выемки богатые пески россыпи транспортируются модернизированным колесным скрепером 2 на многостадийное гравитационное обогащение с применением

различных установок, включая оборудование для центробежного обогащения и отсадочных машин, что обеспечивает высокое извлечение золота различных классов крупности, в том числе мелкого и «гонкого». Высокопроизводительная выемка и транспортировка рядовых песков осуществляется бульдозерами с перемещением минеральной массы к промывочным приборам типа ПГШ, на которых ведется обогащение песков по шлюзовой технологии.

Автором проведены укрупненные расчеты по возможности применения предлагаемой технологии на одном из сложноструктурных россыпных месторождений золота в Хабаровском крае. Выполненная обработка данных детальной геологической разведки одного из участков исследуемого месторождения показала среднее содержание металла в интервалах опробования по участку – 0,77 г/м³, результаты ситового анализа золота выявили, что в среднем по участку золотины класса крупности +2 мм составляют 6,5% массы металла; класса крупности -2+1 мм – 35,1%; -1+0,5 мм – 11,2%; -0,5+0,2 мм – 42,2%; -0,2 мм – 5,0%. Мощность продуктивного пласта изменяется от 0,8 до 2,0 м при средней мощности 1,2 м, при этом включения богатых песков в пласте имеют мощность 0,4 м.

По содержанию полезного компонента пески продуктивного пласта были условно разделены на богатые – более 1,5 г/м³ и рядовые – менее 1,5 г/м³, доля богатых песков составила 12,5% объема минеральной массы со средним содержанием 2,41 г/м³, среднее содержание золота в рядовых песках 0,53 г/м³, при этом в богатых песках находится 39,4% металла рассматриваемого участка. С учетом данных по зависимости извлечения золота от его крупности [21] может быть определена величина средневзвешенного коэффициента извлечения золота при обогащении песков по *i*-й технологии:

$$k_{cp}^i = \sum_1^j k_j^i M_j,$$

где k_j^i – коэффициент извлечения *j*-го класса крупности золотин при использовании *i*-й технологии обогащения песков; M_j – доля по массе *j*-го класса крупности золотин.

Проведенные расчеты показали, что средневзвешенный коэффициент извлечения металла из песков при их обогащении с использованием шлюзовой технологии составляет $k_{cp}^{ПГШ} = 0,812$, а при многостадийном обогащении песков $k_{cp}^{МН} = 0,971$.

Общий коэффициент извлечения металла при обогащении богатых и рядовых песков по разным технологиям может быть определен по формуле

$$K_{общ} = \frac{k_{cp}^{ПГШ} Q_p + k_{cp}^{МН} Q_b}{100},$$

где $Q_p = 60,6\%$, $Q_b = 39,4\%$ – доля металла, содержащегося в рядовых и богатых песках соответственно.

Таким образом, общий коэффициент извлечения металла при раздельной переработке песков составляет 0,875, что на 6,3% выше, чем при переработке всего объема песков на гидроэлеваторных шлюзовых приборах.

Выводы

В статье предложена технология разработки сложноструктурных россыпных месторождений с раздельной выемкой богатых и рядовых песков и их последующей переработкой с использованием различного обогащительного оборудования для повышения извлечения металла при приемлемой себестоимости процессов. Опережающая глубокоселективная выемка богатых песков осуществляется модернизированным колесным скрепером, оснащенным комбинированным рабочим оборудованием в виде ковша с активной заслонкой и рыхлителем, обеспечивающим высокую эффективность заполнения ковша минеральной массой. В процессе холостого хода модернизированного колесного скрепера рыхлителем ведется дезинтеграция слоя богатых песков, после чего осуществляется заполнение ковша разрыхленными песками с продвижением активной заслонкой на конечном этапе копания образовавшейся призмы волочения внутрь ковша, что обеспечивает уменьшение перемешивания богатых и рядовых песков.

Богатые пески, содержащие значительную долю запасов металла разрабатываемого участка направляются на дорогостоящее многостадийное обогащение, обеспечивающее максимальное извлечение полезного компонента. В связи с относительно небольшими объемами богатых песков оборудование для многостадийного обогащения будет перерабатывать богатые пески также и с других участков месторождения. Выемка и транспортировка рядовых песков осуществляется бульдозерами с подачей их на обогащение по низкозатратной шлюзовой технологии. Проведенные исследования по возможности внедрения данного технико-технологического решения для одного из россыпных месторождений с учетом его горно-геологических условий, содержания металла в песках, ситового анализа золота показали, что раздельная выемка и переработка богатых и рядовых песков позволит увеличить извлечение металла с 81,2 до 87,5% при сопоставимом уровне затрат на единицу продукции.

Список источников

1. Оценка влияния особенностей строения россыпных месторождений золота на эффективность их освоения на Севере / Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М., Хоютанов Е.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. №3. С. 67-76.

2. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy // *The Extractive Industries and Society*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 413–423.
3. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинцев В.С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // *Горный журнал*. 2013. №2. С. 30-34.
4. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach / Holley E. A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A. Winterton J. // *Hydrometallurgy*. 2018, vol. 181, pp. 130–142.
5. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia // *Journal of Mining Science*. 2013, vol. 49, no. 2, pp. 273–278.
6. Васильева С.В., Секисов А.Г. Экономика отраслевых рынков. Чита: Изд-во ЧитГУ, 2011. 124 с.
7. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T. W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines // *The Canadian Mineralogist*. 2017, vol. 55, no. 1, pp. 45–62.
8. Ермаков С.А., Бураков А.М. Комбинирование процессов предварительной концентрации полезного компонента как основа для создания геотехнологий нового типа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. №4. С. 102-107.
9. Клепиков В.Н. Региональные и локальные особенности концентрации самородков золота в россыпях // *Концентрация и рассеяние полезных компонентов в аллювиальных россыпях: тез. докл. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. С. 24-26.*
10. Башмачников А. Производство золота в России – итоги 2021 года // *Золото и технологии*. 2022. №2. С. 18-29.
11. Чебан А.Ю., Рассказов И.Ю., Литвинцев В.С. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области // *Маркшейдерия и недропользование*. 2012. №2. С. 41-50.
12. Research and application of a Knelson concentrator: A review / Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, 106339.
13. Ермаков С.А., Потехин А.В. Анализ применяемых способов разработки и оборудования на россыпных месторождениях Якутии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. №S7. С. 218-224.
14. Курбатова В.В., Семькин Е.С., Голубев И.А. Депривация механизации процессов золотодобычи в условиях Северо-Востока России // *Маркшейдерия и недропользование*. 2022. №6. С. 23-32.
15. Chanderman L., Dohm C.E., Minnitt R.C.A. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 2, pp. 189-197.

16. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Кластерная организация россыпных месторождений Якутии и использование ее особенностей в геотехнологиях // Горный журнал. 2019. №2. С. 16-19.
17. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems / Teschner B., Smith N. M., Borrillo-Hutter T., Zira Quaghe John, Wong T. E. // Minerals Engineering. 2017, vol. 105, pp. 44-51.
18. Пат. 2449126 Российская Федерация, МПК E21C 41/30. Способ комбинированной переработки песков россыпного месторождения золота реки Большой Куранах / С.А. Ермаков, А.М. Бураков, С.В. Панишев, И.С. Касанов, И.В. Иванов; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. № 2010133211; заявл. 06.08.2010; опубл. 27.04.2012.
19. Алексеев В.С., Серый Р.С. Экспериментальные исследования технологии формирования продуктивных зон при отработке техногенных россыпных месторождений золота // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. №3. С. 110-115.
20. Ермаков С.А., Бураков А.М., Касанов И.С. Минимизация объемов переработки золотосодержащих песков россыпных месторождений Якутии по критерию предельной крупности некондиционного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №4. С. 138-149.
21. Замятин О.В., Маньков В.М. Мелкое золото в россыпях: проблемы оценки и извлечения // Горный журнал. 2011. №4. С. 22-26.
22. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling // Minerals Engineering. 2017, vol. 112, pp. 57-67.
23. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т.21. №1. С. 24-31.
24. Колпаков В.В., Неволько П.А., Фоминых П.А. Типохимизм и минеральные ассоциации самородного золота россыпей района Култуминского Au-Cu-Fe-скарнового месторождения (Восточное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2023. №12. С. 20-31.
25. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П., Якименко Д.В. Совершенствование комплекса горнотранспортного оборудования для работы совместно с машинами послойного фрезерования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 40-45.
26. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений: учебник. М.: Недра, 1985. 568 с.

References

1. Batugina N.S., Gavrilov V.L., Tkach S.M., Khoiyutanolov E.A. Influence of structural features of gold placers on mining efficiency in the North. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopayemyh* [Physical and technical problems of mining]. 2022; (3): 67-76. (In Russ.)
2. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(2):413-423.
3. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the technical equipment of mining enterprises in the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal]. 2013;(2):30-34. (In Russ.)
4. Holley E.A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A. Winter-ton J. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach. *Hydrometallurgy*. 2018;181:130-142.
5. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):273-278.
6. Vasilyeva S.V., Sekisov A.G. *Jekonomika otraslevykh rynkov* [Economics of industrial markets]. Chita: ChitGU, 2011, 124 p. (In Russ.)
7. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T.W. Detrital platinum-group minerals and gold in deposits of southeastern Samar Island, Philippines. *The Canadian Mineralogist*. 2017;55(1):45-62.
8. Ermakov S.A., Burakov A.M. Combining the processes of preliminary concentration of a useful component as the basis for creating a new type of geotechnologies. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2008;(4):102-107. (In Russ.)
9. Klepikov V.N. Regional and local features of the concentration of gold nuggets in placers. *Koncentraciya i rasseyaniye poleznykh komponentov v allyuvial'nykh rossypyah: tez. dokl.* [Concentration and dispersion of useful components in alluvial placers: thesis report]. Yakutsk: YaF SB AN USSR, 1985, pp. 24-26. (In Russ.)
10. Bashmachnikov A. Gold production in Russia - results of 2021. *Zoloto i tehnologii* [Gold and technology]. 2022;(2):18-29. (In Russ.)
11. Cheban A.Yu., Rasskazov I.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the amur region mining enterprises machinery park. *Markshejderija i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use]. 2012;(2):41-50. (In Russ.)
12. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*. 2020;152:106339.
13. Ermakov S.A., Potekhin A.V. Analysis of the applied development methods and equipment at alluvial deposits of Yakutia. *Gornyj informacionno-*

- analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2012;(S7):218-224. (In Russ.)
14. Kurbatova V.V., Semykin E.S., Golubev I.A. Deprivation of mechanization of gold mining processes in the North-East of Russia. *Markshejderija i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use]. 2022;(6):23-32. (In Russ.)
 15. Chanderman L., Dohm C. E., Minnitt R. C. A. 3D geological modeling and resource estimation for a gold deposit in Mali. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017;117(2):189-197.
 16. Batugina N.S., Gavrilov V.L., Tkach S.M. Cluster organization of alluvial deposits in Yakutia and the use of its features in geotechnologies. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal]. 2019;(2):16-19. (In Russ.)
 17. Teer B., Smith N. M., Borrillo-Hutter T., Zira Quaghe John, Wong T. E. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems. *Minerals Engineering*. 2017;105:44-51.
 18. Ermakov S.A., Burakov A.M., Panishev S.V., Kasanov I.S., Ivanov I.V. *Sposob kombinirovannoj pererabotki peskov rossypnogo mestorozhdenija zolota reki Bol'shoj Kuranah* [Method of combined processing of sands from placer gold deposits of the Bolshoi Kuranakh River]. Patent RF, no. 2449126, 2012. (In Russ.)
 19. Alekseev V.S., Seryi R.S. Experimental studies into technology of generation of pay zones in gold mine waste. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and technical problems of mining], 2016;52(3):110-115. (In Russ.)
 20. Ermakov S.A., Burakov A.M., Kasanov I.S. Minimization of processing volumes of gold-bearing sand of Yakutia placer deposits by limit size criterion of substandard raw materials. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2014;(4):138-149. (In Russ.)
 21. Zamyatin O.V., Mankov V.M. Fine gold alluvial deposits: problems of estimation and extraction. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal], 2011;(4):22-26. (In Russ.)
 22. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017;112:57-67.
 23. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Combined technology for the development of complex structure deep gold placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(1):24-31. (In Russ.)
 24. Kolpakov V.V., Nevolko P.A., Fominykh P.A. Typochemistry and mineral associations of native placer gold in the Kultuminsky Au-Cu-Fe-skarn deposit district (Eastern Transbaykalia). *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], 2023;(12):20-31. (In Russ.)
 25. Cheban A.Yu., Khrunina N.P., Yakimenko D.V. Enhanced mining and hauling equipment complex to be used together with surface miners. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018;16(3):40-45. (In Russ.)
 26. Leshkov V.G. *Razrabotka rossypnyh mestorozhdenij* [Development of placer deposits]. Moscow: Nedra, 1985, 568 p. (In Russ.)

Поступила 22.03.2024; принята к публикации 19.04.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 22/04/2024; revised 19/04/2024; published 24/12/2024

Чебан Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

Anton Yu. Cheban – PhD (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X