



К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНОВЫХ РУД

Ю.П. ПАНОВ¹, О.С. БРЮХОВЕЦКИЙ^{1,*}, А.Г. СЕКИСОВ²

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
30, ул. Александровская, г. Чита 672039, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Подземное выщелачивание урана является перспективным геотехнологическим процессом, обеспечивающим кардинальное повышение технической, экономической эффективности и экологической безопасности освоения урановых месторождений. В статье рассмотрены основные разработки МГРИ в этой области.

Цель. Исследовать процессы активационного выщелачивания урана рабочими растворами, прошедшими электрофотохимическую обработку до контактирования с рудой.

Материалы и методы. Активационная подготовка выщелачивающих растворов обеспечивает возможность синтеза активных гидратированных форм кислорода и водорода с коллективизированными протонами и гидроксил-ионами, кластеризованными молекулами воды. После предокисления активным карбонатным раствором проведено модельное скважинное выщелачивание хлоридно-гипохлоритным, содовым, сернокислотным растворами. Тестирующее перколяционное выщелачивание урана из руд месторождений Учкудук и Сугралы активированными растворами, проведенное на стендах, конструкция которых разработана в МГРИ совместно с сотрудниками ИГД ДВО РАН и ЗабГУ, подтвердило потенциальную возможность существенного повышения коэффициента извлечения урана.

Результаты. При выщелачивании растворами карбоната натрия и карбоната аммония извлечение урана из проб руды месторождения Сугралы составило 52 и 59% соответственно. В то же время использование активированного раствора перкарбоната натрия, совмещающего функцию окислителя и комплексообразователя, позволило достичь 87—88% извлечения урана в продуктивные растворы за 21 день без предварительного предокисления.

Заключение. Полученные результаты исследований подтверждают перспективность использования шахтного (блочного) и скважинного выщелачивания урана активированными растворами.

Ключевые слова: урановые руды, геотехнологии, месторождение, растворы, выщелачивание

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Панов Ю.П., Брюховецкий О.С., Секисов А.Г. К вопросу применения новых физико-химических геотехнологий освоения месторождений урановых руд. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65(1):8—14.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-1-8-14>

Статья поступила в редакцию 22.12.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Опубликована 31.03.2023

* Автор, ответственный за переписку

TO THE QUESTION OF APPLICATION OF NEW PHYSICAL AND CHEMICAL GEOTECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF URANIUM ORE DEPOSITS

YURI P. PANOV¹, OLEG S. BRYUKHOVETSKY^{1,*}, ARTUR G. SEKISOV²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Zabaikalsky State University
30, Alexandro-Zavodskaya str., Chita 672039, Russia*

ABSTRACT

Background. Underground uranium leaching is a promising geotechnological process due to its potential to provide for a radical increase in the technical and economic efficiency, as well as environmental safety, of uranium deposit development. In this article, we discuss the main results in this direction obtained by specialists of the Russian State University for Geological Prospecting.

Aim. To study the processes of uranium leaching by activated solutions, which undergo electropho-tochemical treatment prior to contacting with the ore.

Materials and methods. Activation preparation of leaching solutions enables the synthesis of active hydrated forms of oxygen and hydrogen with collectivized protons and hydroxyl ions clustered by water molecules. Following the stage of pre-oxidation with an active carbonate solution, a model downhole leaching with chloride-hypochlorite, soda, and sulfuric acid solutions was carried out. Testing percolation leaching of uranium from the ores of the Uchkuduk and Sugrally deposits by activated solutions was conducted at laboratory installations designed by the the Russian State University for Geological Prospecting jointly with the Institute of Mining of Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences and Zabaikalsky State University. As a result, the potential of a significant increase in uranium extraction was noted.

Results. When leaching with sodium carbonate and ammonium carbonate solutions, the uranium extraction from ore samples from the Sugrally deposit comprised 52% and 59%, respectively. At the same time, the use of an activated solution of sodium percarbonate, which combines the functions of an oxidizing agent and a complexing agent, resulted in an 87–88% uranium extraction into productive solutions during 21 days without preliminary pre-oxidation.

Conclusion. The results obtained confirm the prospects of using mine (block) and downhole uranium leaching with activated solutions.

Keywords: uranium ores, geotechnologies, deposit, solutions, leaching

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Panov Yu.P., Bryukhovetsky O.S., Sekisov A.G. To the question of application of new physical and chemical geotechnologies in the development of uranium ore deposits. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;65(1):8—14. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-1-8-14>

Manuscript received 22 December 2022

Accepted 30 January 2023

Published 31 March 2023

* Corresponding author

Дальнейшее развитие и укрепление минерально-сырьевой базы атомной энергетики России, ее оборонной мощи связано с разработкой и внедрением ресурсосберегающих технологий освоения месторождений урановых руд,

обеспечивающих полноту извлечения балансовых запасов урана и сопутствующих металлов.

Россия по производству урана занимает четвертое место в мире после Канады, Австралии, Казахстана [16].

Она обладает значительными запасами урановых руд, основная часть которых заключена в месторождениях Забайкальского края и Бурятии. Преимущественно российские запасы урана представлены рядовыми и бедными по содержанию урана рудами. Разработка месторождений таких руд традиционными технологиями добычи характеризуется низкой рентабельностью и значительными объемами некондиционного сырья, оставляемого в целиках и в неотработанных участках залежей. Поэтому применение **физико-химических геотехнологий** для добычи бедного уранового сырья имеет достаточно большие перспективы.

Вместе с тем вследствие ряда объективных причин, и в первую очередь из-за высокого выхода негабарита, завышенного среднего размера кусков руды после ее взрывной подготовки, кольматации порового пространства, блочное подземное выщелачивание (БПВ) пока не нашло широкого применения на отечественных предприятиях. На крупнейшем российском предприятии, производящем основное количество урана в стране, — **Приаргунском горно-химическом объединении** (ППГХО) эта технология использовалась на его нескольких рудниках, но вследствие ряда технологических проблем не получила широкого развития [16].

В МГРИ на протяжении нескольких десятилетий проводились научные исследования и инженерные изыскания в области физико-химических геотехнологий разработки месторождений урана различного генезиса (на территории России, Украины, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, а также ГДР, Чехословакии), в результате которых был предложен ряд технических решений, позволяющих решить задачи эффективной взрывной и гидромеханической подготовки руд к БПВ, повышения коэффициента извлечения урана из сложнорастворимых минералов растворами, подготовленными в электрохимических и фотоэлектрохимических реакторах и др. [16]

Главной гидрогеохимической особенностью выщелачивания урана является естественное присутствие перекисных соединений в поровых водах, обусловленное процессами их радиолиза при взаимодействии с продуктами дочерних продуктов распада ядер урана-238, в первую очередь гамма-квантами, излучаемыми изотопом радона 226. Основными перекисными соединениями, образующимися при таком радиолизе, являются перекись водорода и гидратированные гидроксил-радикалы, представляющие собой сильные

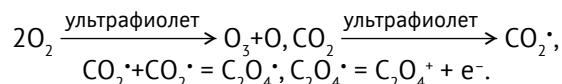
окислители, которые интенсифицируют процессы его выщелачивания. Радиолитическая перекись водорода при взаимодействии с двухвалентным железом распадается на гидроксил-ион и гидроксил-радикал. Гидроксил-радикал не только активно окисляет минералы, но и образует в результате гидратации активные водные кластеры, формирующие гидратные оболочки для комплексобразователей, тем самым повышая их растворяющую способность по отношению к урану.

По-видимому, вследствие таких природных особенностей уран, находящийся в составе рудных минералов, представляющих собой окислы (уранинит, настуран) или оксосиликаты (коффинит уранофан и др.), устойчивых к воздействию пероксидов, не встречается в рудах в форме сульфидов. Если перенос урана и осуществлялся в гидротермальных растворах в составе гидросульфидов и сульфидов, то впоследствии, после осаждения на геохимических барьерах, они окислялись пероксидами, переходя в оксидные формы. В то же время с геотехнологических позиций наличие в рабочих растворах комплексобразователей (сульфатов, карбонатов) на фоне присутствия в поровых водах перекисных соединений обеспечивает, при отсутствии осложняющих факторов, возможность выщелачивания урана с относительно высокими показателями.

В большинстве случаев вследствие взаимодействия комплексобразователей с непродуктивными жильными минералами (кальцитом, доломитом и др.), наличия процессов кольматации в продуктивных пластах гидрогенных осадочных месторождений урана или в отбитой руде гидротермальных штокерковых и жильных месторождений, его выщелачивание может быть в значительной степени затруднено. Кроме того, при шахтном (блочном) выщелачивании при подготовке скальной руды взрывом не обеспечивается полноценный контакт рудных минералов с рабочими растворами. Поэтому, несмотря на ряд технических решений, позволяющих в определенной степени снизить проявление таких негативных факторов, проблема повышения эффективности использования физико-химических геотехнологий при освоении урановых месторождений актуальна и в настоящее время [1—11, 14, 15, 17, 18, 20—22].

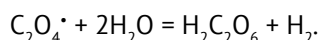
Одним из перспективных направлений совершенствования технологий подземного выщелачивания урана можно считать использование в основном процессе рабочих растворов, содержащих надугольные кислоты или перкарбонаты щелочных металлов, продуцирующие

при контакте с поверхностью рудных минералов окислители — гидратированные активные формы кислорода и комплексообразователи для урана — анионы угольной кислоты. При этом, в отличие от сернокислотных растворов, перкарбонатные не приводят к образованию сульфатов кальция и магния, обуславливающих при высоком карбонатном модуле (более 2,5% CO_2) коагустацию порового пространства и в то же время, в сравнении с содовыми растворами, имеют существенно большую реакционную способность по отношению к урановым минералам [10, 12, 13, 15, 22]. Перкарбонатные растворы, содержащие надуглекислотные соединения с функциональной группой COOH , могут быть получены при электролизе растворов гидрокарбоната или карбоната натрия и фотохимической обработке прианодной зоны реактора. При электролизе на аноде в виде мелких пузырьков выделяются углекислый газ и сопутствующий двухатомный кислород, которые при облучении ультрафиолетовым светом соответственно переходят в озон и активные радикальные и ионизированные соединения углерода и кислорода:

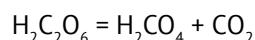


Эти соединения могут быть синтезированы и при использовании технологии взрывоинъекционной подготовки блока к выщелачиванию [10, 20]. Использование взрывоинъекций позволяет существенно улучшить качество дробления и обеспечить полноценную пропитку руды реагентами; соответственно, повысить извлечение ценных металлов на 20—30%, что доказано укрупненными экспериментами по выщелачиванию молибдена и золота из скальных руд штокверкового месторождения Гитче-Тырныауз.

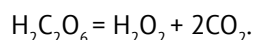
При гидратации при контакте с пленочной водой, окружающей газоподобные пузырьки с парами воды, находящимися внутри них, радикальные соединения продуцируют надугольную кислоту:



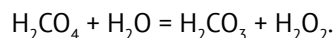
Далее надугольная кислота диспропорционирует с образованием мононадугольной кислоты и углекислого газа



или пероксида водорода и углекислого газа



Образующаяся мононадугольная кислота H_2CO_4 при контакте с минеральной частицей диспропорционирует с образованием пероксида водорода и угольной кислоты:



При этом перекись водорода выполняет роль окислителя, а угольная кислота при взаимодействии с оксидом урана — комплексообразователя, формирующего комплексное соединение $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$.

Диффузионные процессы обеспечивают проникновение активных реагентов во внутреннее пространство пор и трещин кусков руды и перемещение продуктов реакций между компонентами минеральной фазы и реагентами. Молекулярная и ионная диффузия реагента и отвод продуктов реакции происходят за счет разности концентраций как во внутривещном пространстве, так и на поверхности рудного куска. При этом основным барьером для проникновения катионов, и в том числе протонов к поверхности минерала, является ее положительно заряженный адсорбционный слой. Поэтому диффузионные процессы на границе раздела фаз интенсифицируются при использовании перкарбонатных растворов за счет наличия в них нейтральных, но реакционно-активных гидроксил-радикалов, при диссоциации которых образуются легко проникающие через адсорбционный слой пленочной воды супероксид-ионы кислорода и активные протоны. Соответственно обеспечивается возможность непосредственного взаимодействия этих частиц с атомами поверхностного слоя самого рудного минерала.

Экспериментальное подтверждение вышеприведенным теоретическим положениям было получено сотрудниками МГРИ при проведении серии опытов по перкарбонатному выщелачиванию урана из представительных проб руд гидрогенных месторождений Учкудук и Сугралы (Навоийский горно-металлургический комбинат).

Месторождение Учкудук представлено рудной минерализацией, основу которой составляют уранинит и настуран с незначительной долевой частью коффинита. В рудах месторождения Сугралы урановая минерализация в основном представлена существенно более сложнорастворимыми коффинитом и уранофаном. Содержание урана в технологической пробе руды месторождения Учкудук составило 0,7%, в пробе руды месторождения Сугралы содержание урана 0,4%. Для экспериментального выщелачивания из навесок эти пробы готовились в лабораторном электрофотохимическом реакторе. На стадии

электроактивационной обработки исходного гидрокарбонатного раствора содержание растворенного кислорода после электрохимической обработки пластовой воды Сугралинского месторождения увеличилось с 5 до 9 мг/л, что при последующей фотохимической обработке раствора позволяет генерировать в ней и перекись водорода. Таким образом, при использовании перкарбонатных растворов обеспечивается высокое извлечение урана и из такого сложнорастворимого минерала, как уранофан.

Эксперимент по перколяционному выщелачиванию урана пероксидно-карбонатными растворами, полученными путем электрофотохимической обработки исходного гидрокарбонатного раствора из двух параллельных навесок проб руды месторождения Сугралы со значительной долей в ней коффинита и уранофана, позволил достичь 87—88%-го извлечения в продуктивные растворы за три недели. При этом предварительное закисление навесок не проводилось. Расчеты

по данным анализов твердой фазы показали практически такой же результат (84,5% по первой навеске, 87,3% по второй). Суммарное Ж:Т составило 1,7:1. Подачу перкарбонатных растворов прекратили при падении содержания урана в продуктивном растворе до 50 мг/л. На пробе руды месторождения Учкудук извлечение урана по данной схеме составило более 90%.

Таким образом, перкарбонатные растворы потенциально могут быть использованы при разработке как гидрогенных, так и гидротермальных месторождений урановых руд, разрабатываемых как скважинным способом, так и другими методами физико-химической геотехнологии.

Технология перкарбонатного выщелачивания может с успехом использоваться как на действующих, так и на новых уранодобывающих предприятиях России при отработке как забалансовых, так и балансовых урановых руд, а также комплексных руд, содержащих кроме урана молибден и рений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюховецкий О.С., Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Рассказова А.В. Повышение эффективности освоения месторождений поликомпонентных руд со сложноизвлекаемыми формами золота на основе использования их блочно-скважинного выщелачивания // Горный журнал. 2020. № 2. С. 66—69.
2. Голик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З. Технологии освоения месторождений урановых руд: Учебное пособие. М.: МГИУ, 2007. 132 с.
3. Крылова Л.Н. Эффективность применения озона для извлечения металлов из минерального сырья // Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. № 28(2). С. 4—15. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-2-4-15
4. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Рассказова А.В. Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии. Чита: ЗабГУ, 2019. 306 с.
5. Секисов А.Г., Панов Ю.П., Брюховецкий О.С., Рассказова А.В. Перспективные геотехнологии освоения золотonosных россыпей Восточного Забайкалья // Eurasian Mining. 2022. № 2. С. 34—37.
6. Balikhin A.V. Uranium mineral-resources: the current state and perspectives for development. Review // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra. 2019. No. 1. P. 36—50. DOI: 10.31643/2019/6445.05
7. Brown S.H. Radiological aspects of in situ uranium recovery // ICEM 2007: Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Pts A and B. P. 1465—1477.
8. Langanay J., Romary T., Freulon X., Langlais V., Petit G., Lagneau V. Uncertainty quantification for uranium production in mining exploitation by In Situ Recovery // Computational Geosciences. 2021. Vol. 25. № 3. P. 831—850. DOI: 10.1007/s10596-02010018-x
9. Lasheen T. A., El-Ahmady M.E., Hassib H.B., Helal A.S. Oxidative leaching kinetics of molybdenum-uranium ore in H₂SO₄ using H₂O₂ as an oxidizing agent // Frontiers of Chemical Science and Engineering. 2013. Vol. 7. № 1. P. 95—102. DOI: 10.1007/s11705-0131317-6
10. Li C.G., Tan K.X., Liu Z.Z., Xia L.S., Tan W.Y., Chen L. Prediction model of uranium concentration for in situ leaching pregnant solution based on uranium chemical fractions of ores // 2018 Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. Vol. 318. № 2. P. 1379—1387. DOI: 10.1007/s10967-018-6190-9
11. Li Q.C., Zhou J. Research on character of solute transport in in-situ leaching of uranium in sandstone uranium deposit // International Conference on Design, Manufacturing and Mechatronics (ICDMM). 2016. P. 1086—1094.
12. Orrego P.P., Orrego J., Hernandez A. Reyes Uranium and molybdenum recovery from copper leaching solutions using, ion exchange // Hydrometallurgy. 2019. Vol. 184. P. 116—122. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.12.02
13. Oryngozhin E.S., Fedorov E.V., Alisheva Z.N., Mitishova N.A. In-situ leaching technology for uranium deposits // Eurasian Mining. 2021. No. 2. P. 31—35. DOI: 10.17580/em.2021.02.07
14. Pan H.B., Liao W.S., Wai C.M., Oyola Y., Janke C.J., Tian G.X., Rao L.F. Carbonate-H₂O₂ leaching for equestering uranium from seawater // Dalton Transactions. 2014. Vol. 43. № 28. pp. 10713—10718. DOI: 10.1039/c3dt53404a
15. Rakishev B., Mataev M., Kenzhetaev Z., Altaybayev B., Shampikova A. Research into leaching of uranium from core samples in tubes using surfactants // Mining of mineral deposits. 2020. Vol. 14. № 4. P. 97—104. DOI: 10.33271/mining14.04.097

16. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the malmyzh Cu–Au porphyry deposit // *Minerals*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 1—11. DOI: 10.3390/min11010069
17. Titova S., Skripchenko S., Smirnov A., Rychkov V. Processing of Chloride-Containing Productive Solutions after Uranium in-situ Leaching by Ion Exchange Method // *Indonesian Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 19. № 1P. 231—238. DOI: 10.22146/ijc.34460
18. Umanskii A.B., Klyushnikov A.M. Development of NaNO_2 -O-2 system as an oxidant at uranium leaching processes // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012. Vol. 293. № 1. P. 193—198.
19. Valiyev K.K., Bugubayeva A.U., Amandykova A.B., Bulaev A.G. Uranium and molybdenum leaching from the ore of “Vostok” deposit // *Proceedings of the Tula States University-Sciences of Earth*. 2019. Vol. 4. P. 92—99.
20. Wang W.G., Tan K.X., Xie E.J., Liu J., Cai G.L. Supercritical CO₂ fluid leaching of uranium from sandstone type ores // *Advances in Chemical, Material and Metallurgical Engineering*. 2013. Vol. 634—638. P. 3517—3521. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.3517
21. Xie H., Zhao J.W., Zhou H.W., Ren S.H., Zhang R.H. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Vol. 96. No. 103129. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103129
22. Zhou Y.P., Li G.R., Xu L.L., Liu J.H., Sun Z.X., Shi W.J. Uranium recovery from sandstone-type uranium deposit by acid in-situ leaching — an example from the Kujiertai // *Hydrometallurgy*. 2020. Vol. 191. № 105209. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.105209

REFERENCES

1. Bryukhovetsky O.S. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Rasskazova A.V. Improving the efficiency of development of deposits of multicomponent ores with complex forms of gold based on the use of their block-well leaching // *Gorny Journal*. 2020. No. 2. P. 66—69 (In Russian).
2. Golik V.I., Bryukhovetsky O.S., Gabaraev O.Z. Technologies for the development of uranium ore deposits: Textbook. Moscow: MGIIU, 132 p. (In Russian).
3. Krylova L.N. Efficiency of ozone application for extraction of metals from mineral raw materials // *News of universities. Non-ferrous metallurgy*. 2022. Vol. 28. No. 2. P. 4—15. (In Russian). DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-15
4. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Rasskazova A.V. Photochemical and electrochemical processes in geotechnology. Chita: ZabGU. 2019. 306 p. (In Russian).
5. Sekisov A.G., Panov Yu.P., Bryukhovetsky O.S., Rasskazova A.V. Promising geotechnologies for the development of gold-bearing placers of Eastern Transbaikalia // *Eurasian Mining*. 2022. No. 2. P. 34—37 (In Russian).
6. Balikhin A.V. Uranium mineral-resources: the current state and perspectives for development. Review // *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*. 2019. No. 1. P. 36—50. DOI: 10.31643/2019/6445.05
7. Brown S.H. Radiological aspects of in situ uranium recovery // *ICEM 2007: Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Pts A and B. P. 1465—1477.
8. Langanay J., Romary T., Freulon X., Langlais V., Petit G., Lagneau V. Uncertainty quantification for uranium production in mining exploitation by In Situ Recovery // *Computational Geosciences*. 2021. Vol. 25. No. 3. P. 831—850. DOI: 10.1007/s10596-02010018-x
9. Lasheen T.A., El-Ahmady M.E., Hassib H.B., Helal A.S. Oxidative leaching kinetics of molybdenum-uranium ore in H_2SO_4 using H_2O_2 as an oxidizing agent // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 95—102. DOI: 10.1007/s11705-0131317-6
10. Li C.G., Tan K.X., Liu Z.Z., Xia L.S., Tan W.Y., Chen L. Prediction model of uranium concentration for in-situ leaching pregnant solution based on uranium chemical fractions of ores // *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2018. Vol. 318. No. 2. P. 1379—1387. DOI: 10.1007/s10967-018-6190-9
11. Li Q.C., Zhou J. Research on character of solute transport in in-situ leaching of uranium in sandstone uranium deposit // *International Conference on Design, Manufacturing and Mechatronics (ICDMM)*. 2016. P. 1086—1094.
12. Orrego P.P., Orrego J., Hernandez A. Reyes Uranium and molybdenum recovery from copper leaching solutions using, ion exchange // *Hydrometallurgy*. 2019. Vol. 184. P. 116—122. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.12.02
13. Oryngozhin E.S., Fedorov E.V., Alisheva Z.N., Mitishova N.A. In-situ leaching technology for uranium deposits // *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. P. 31—35. DOI: 10.17580/em.2021.02.07
14. Pan H.B., Liao W.S., Wai C.M., Oyola Y., Janke C.J., Tian G.X., Rao L.F. Carbonate-H₂O₂ leaching for sequestering uranium from seawater // *Dalton Transactions*. 2014. Vol. 43. No. 28. P. 10713—10718. DOI: 10.1039/c3dt53404a
15. Rakishev B., Mataev M., Kenzhetaev Z., Altaybayev B., Shampikova A. Research into leaching of uranium from core samples in tubes using surfactants // *Mining of mineral deposits*. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 97—104. DOI: 10.33271/mining14.04.097
16. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the malmyzh Cu–Au porphyry deposit // *Minerals*. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 1—11. <https://doi.org/10.3390/min11010069>
17. Titova S., Skripchenko S., Smirnov A., Rychkov V. Processing of Chloride-Containing Productive Solutions after Uranium in-situ Leaching by Ion Exchange Method // *Indonesian Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 19. No. 1. P. 231—238. DOI: 10.22146/ijc.34460

18. Umanskii A.B., Klyushnikov A.M. Development of $\text{NaNO}_2\text{-O}_2$ system as an oxidant at uranium leaching processes // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2012. Vol. 293. No. 1. P. 193—198.
19. Valiyev K.K., Bugubayeva A.U., Amandykova A.B., Bulaev A.G. Uranium and molybdenum leaching from the ore of "Vostok" deposit // Proceedings of the Tula States University-Sciences of Earth. 2019. Vol. 4. P. 92—99.
20. Wang W.G., Tan K.X., Xie E.J., Liu J., Cai G.L. Supercritical CO_2 fluid leaching of uranium from sandstone type ores // Advances in Chemical, Material and Metallurgical Engineering. 2013. Vol. 634—638. pp. 3517—3521. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.3517
21. Xie H., Zhao J.W., Zhou H.W., Ren S.H., Zhang R.X. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 96. No. 103129. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103129
22. Zhou Y.P., Li G.R., Xu L.L., Liu J.H., Sun Z.X., Shi W.J. Uranium recovery from sandstone-type uranium deposit by acid in-situ leaching — an example from the Kujieertai // Hydrometallurgy. 2020. Vol. 191. No. 105209. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.105209

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Панов Ю.П. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Брюховецкий О.С. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Секисов А.Г. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Yuri P. Panov — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Oleg S. Bryukhovetsky — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Artur G. Sekisov — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Панов Юрий Петрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности ректора ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия
тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 2002

e-mail: rektor@mgri.ru

SPIN-код: 9249-9725

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0776-0446>

Yuri P. Panov — Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Acting Rector, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
tel.: +7 (495) 255-15-10 (ext. 2002)

e-mail: rektor@mgri.ru

SPIN-code: 9249-9725

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0776-0446>

Брюховецкий Олег Степанович* — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия
тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 21-19

e-mail: bryhovetskyos@mgri.ru

SPIN-код: 8619-2065

Oleg S. Bryukhovetsky * — Dr. of Sci. (Tech.), Prof., Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
tel.: +7 (495) 255-15-10, ext. 21-19

e-mail: bryhovetskyos@mgri.ru

SPIN-code: 8619-2065

Секисов Артур Геннадьевич — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет».

30, ул. Александрo-Заводская, г. Чита 672039, Россия

e-mail: sekisovag@mail.ru

SPIN-код: 3191-8779

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-6150>

Artur G. Sekisov — Dr. of Sci. (Tech.), Prof., Zabaykalsky State University.

30, Alexandro-Zavodskaya str., Chita 672039, Russia

e-mail: sekisovag@mail.ru

SPIN-code: 3191-8779

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-6150>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author