ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(7):13-20

УДК 624.131.1:622.016.25(571.55) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-20

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ УРАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

А.Г. Верхотуров[1], А.А. Сабигатулин[1]

[1] Забайкальский государственный университет, Чита, Россия, e-mail: weral0606@yandex.ru

Аннотация: Метод скважинного подземного выщелачивания на уранодобывающем предприятии АО «Хиагда» применяется в условиях наличия криогенного водоупора с поверхности, мощность которого достигает семидесяти метров. Это обстоятельство требует обеспечения непрерывности функционирования геотехнологических скважин и беспрепятственного движения выщелачивающих растворов при откачке продуктивных растворов. Кратковременная остановка работы скважин может привести к формированию ледяной пробки и выводу откачных скважины из строя. Уменьшение производительности откачных скважин обусловлено тем, что в прифильтровых зонах скважины подвергаются химической и механической кольматации. Интенсификация добычи урана является актуальной задачей, поэтому ремонтно-восстановительные работы (РВР), направленные на разрушение агрегатов кольматационных отложений комплексными методами (технологической прокачки, химической обработки реагентами, пневмоимпульсной обработки, пневмосвабирования, промывки гидроершом, проливки выщелачивающими растворами) позволяют существенно увеличить производительность скважин. В работе представлена оценка эффективности некоторых методов и охарактеризованы возможности их комплексирования, полученные при исследованиях, выполненных в 2018 г. Последовательное использование соответствующих методов и своевременное проведение РВР дает значительный прирост добычи урана.

Ключевые слова: геотехнология, уран, скважина, выщелачивание, фильтрация, зона, кольматация, производительность, восстановление, криолитозона.

Для цитирования: *Верхотуров А. Г., Сабигатулин А. А.* Интенсификация добычи урана при использовании комплекса обработки прифильтровых зон геотехнологических скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 13–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-20.

Stimulation of uranium recovery by treatment of seepage zones of wells

A.G. Verkhoturov[1], A.A. Sabigatulin[1]

[1] Transbaikal State University, Chita, Russia, e-mail: weral0606@yandex.ru

Abstract: Khiagda uranium producer operates the in-situ leach technology under permafrost watertight stratum up to 70 m thick. This circumstance demands continuous performance of process wells and unhampered flow of leaching solution with pumping out of pregnant solution. A shortstop in operation of wells can result in formation of an ice plug and in inactivation of scavenging wells. Productivity of scavenging wells reduces as seepage zones of the wells are subjected to physical and chemical

© А.Г. Верхотуров, А.А. Сабигатулин. 2019.

colmatation. Stimulation of uranium recovery is an urgent problem. Repair-and-renewal operations (RRO) aimed to break mudding aggregates using integrated methods (injection, chemical treatment, air impact, pneumo-swabbing, hydraulic scraping, flushing with leaching solutions) considerably improve productivity of wells. The article estimates efficiency of some methods and characterizes their integration abilities according to the research results of 2018. Sequential implementation of appropriate methods and timely RRO results in considerable growth of uranium production.

Key words: geotechnology, uranium, well, leaching, seepage zone, colmatation, productivity, recovery, permafrost area.

For citation: Verkhoturov A. G., Sabigatulin A. A. Stimulation of uranium recovery by treatment of seepage zones of wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):13-20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-20.

Введение

Уранодобывающее предприятие АО «Хиагда» занимается добычей и первичной переработкой ураносодержащих руд, методом скважинного подземного выщелачивания. Процесс добычи заключается в переводе в водный раствор компонентов рудного тела путем подачи выщелачивающих растворов в закачную скважину с цементацией верхнего водоносного горизонта и откачки продуктивных растворов из откачной скважины на сорбционно-десорбционный передел для получения готовой продукции. Метод скважинного подземного выщелачивания для разработки рудных месторождений применяется достаточно давно [1—6]. Особенность разработки месторождений Хиагдинского рудного поля обусловлена тем, что оно приурочено к Витимской геокриологической области с преимущественно сплошным распространением многолетнемерзлых пород [7, 8], наличие которых значительно осложняет сооружение и эксплуатацию геотехнологических скважин [9]. Мощность криолитозоны достигает семидесяти метров.

Задачи интенсификации добычи урана

Интенсификация добычи, в связи с нарастающей потребностью в уране, является одной из актуальных задач на современном этапе разработки месторождения. Одним из основных направлений является обеспечение непрерывности процесса производства, которое определяется нормальным функционированием геотехнологических скважин и беспрепятственным движением выщелачивающих растворов [10—12]. Целью данной работы являлось исследование возможностей обеспечения таких условий на предприятии. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- Изучить причины снижения производительности геотехнологических скважин во времени.
- Определить возможные методы интенсификации добычи урана.

Кольматация фильтров скважин и методы восстановления производительности

В процессе эксплуатации геотехнологических скважин при откачке продуктивных растворов в прифильтровых зонах происходят химические реакции [13, 14], и скважины подвергаются кольматации (химическая, механическая, биологическая, газовая) [15]. Обследование фильтров показало, что для месторождений АО «Хиагда» характерны такие виды кольматации, как химическая и механическая (рис. 1, *а*, *б*).

Процесс кольматации сопровождается резким падением производительности эксплуатируемых скважин, и как следствие снижением добычи урана в весовом эквиваленте [16, 17].

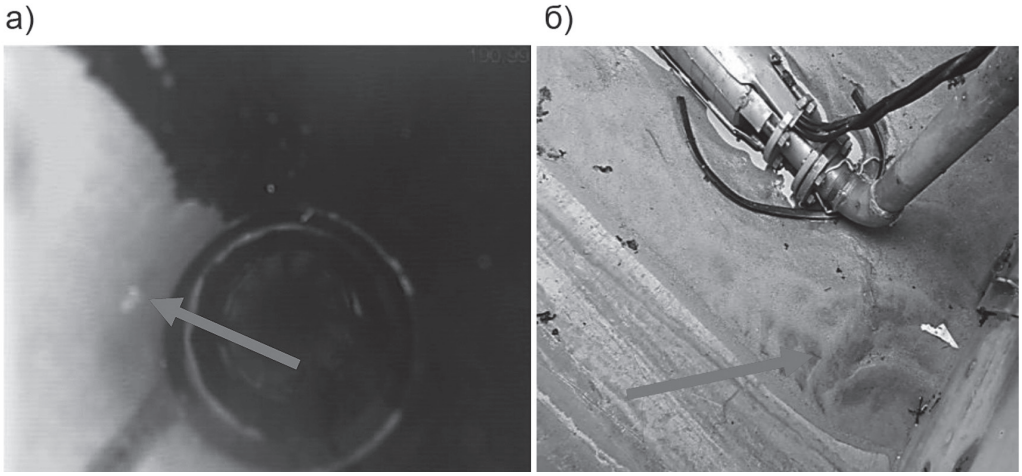

Рис. 1. Виды кольматации: химическая (а); механическая (б)
Fig. 1. Types of clogging: a — chemical; b — mechanical

Для интенсификации получения продуктивного раствора требуется высвобождение прифильтровой зоны (ПФЗ) скважин от кольматантов различными методами ремонтно-восстановительных работ (РВР) [18]. В данной работе рассмотрены комплексные методы разрушения агрегатов кольматационных отложений и освобождения ПФЗ с целью восстановления и повышения производительности геотехнологических скважин. К таким методам относятся: технологическая прокачка (Тпр), химическая обработка реагентами (Х/О), пневмоимпульс-

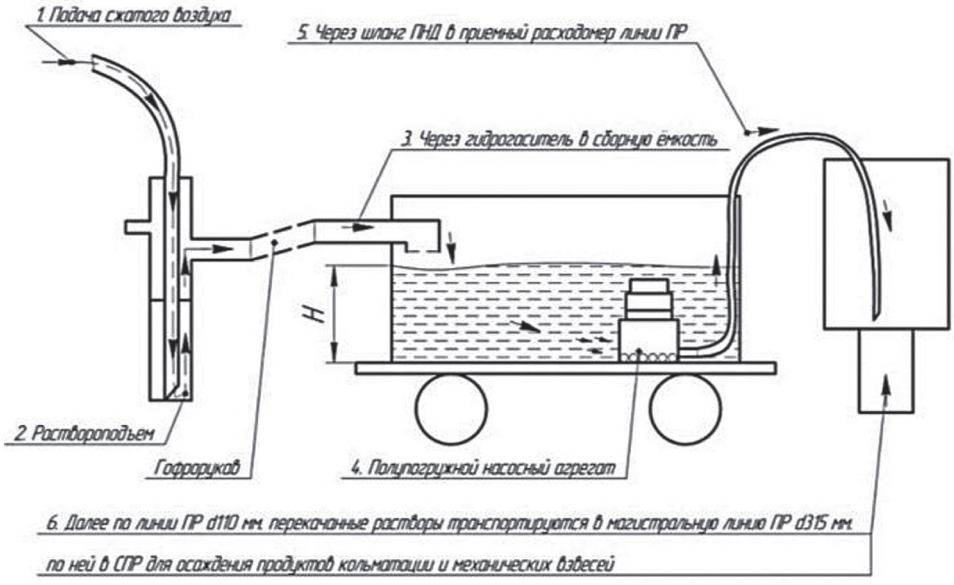

Рис. 2. Схема движения продуктов кольматажа (высвобождение ПФЗ) при проведении технологической прокачки методом эрлифта
Fig. 2. Driving movement of colmatage products (PFZ release) during technological pumping by the airlift method

ная обработка (ПИО), пневмосвабирование (ПНСВ), промывка гидроершом (ПГ), проливка выщелачивающими растворами (ПВР).

Работы по восстановлению и повышению производительности геотехнологических скважин проводились в течение 2018 г. на добычных полигонах Хиагдинского, Вершинного и Источного месторождений различными методами. В процессе РВР применялись как один метод обработки скважины и ее прифильтрового пространства, так и комплекс методов. Практика показала, что наибольший эффект достигается при использовании следующего комплекса работ: проливка выщелачивающими растворами, химическая обработка реагентами, суточная выстойка, продавка выщелачивающими растворами в продуктивный горизонт, технологическая прокачка эрлифтом. Схема эксперимента при технологической прокачке прифильтровой зоны представлена на рис. 2.

Результаты исследований

Результаты исследований показали, что динамика производительности по откачным скважинам до и после восстановительных манипуляций заслуживает отдельного внимания. Рассмотрим динамику добычи отдельно по скважинам и комплексу обработки (в целях сохранения коммерческой информации все цифры изменены, на научной составляющей статьи и результатов проведенного анализа это не отразилось).

Для расчета добычи урана по откачной скважине применяется формула:

$$D = \frac{Q \cdot T \cdot C_u}{1000} \text{ кг/сут.}$$

где Q — производительность (дебит) скважины, м^3/ч; T — часы работы скважины (24); C_U — содержание урана в скважине, мг/л.

В январе 2018 г. добыча из скважины в1.9.6 составляла 13,56 кг/сут. (рис. 3).

Проведенный комплекс РВР, — химическая обработка реагентами и технологическая прокачка (Х/О+Тпр), — в марте позволил повысить добычу до 46,4 кг/сут. Согласно графику, в июле наблюдается критическое снижение добычи относительно первоначальной до 6 кг/сут., это объясняется кольматацией прифильтро-

Рис. 3. График добычи урана в скв. в1.9.6 (используемые методы РВР: химическая обработка + + технологическая прокачка; пневмоимпульсная обработка)

Fig. 3. Graph uranium mining in SLE. v1.9.6 (methods used PBP: chemical processing + technological pumping; pneumopulse processing)

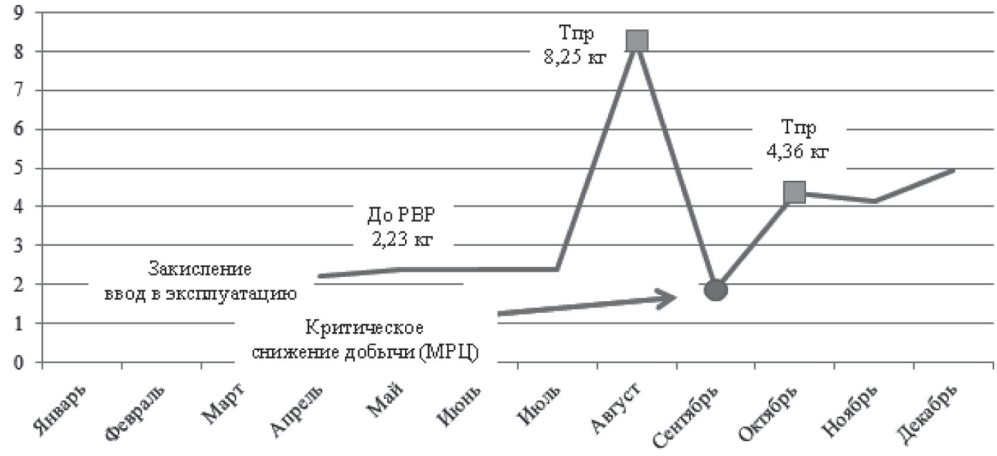

Рис. 4. График добычи скв. в1.10.34 (используемые методы РВР: технологическая прокачка эрлифтом)
Fig. 4. Well production schedule v1.10.34 (methods used PBP: technological pumping by airlift)

вой зоны, в августе была проведена проливка скважины выщелачивающими растворами, однако большого эффекта это не принесло, но позволило сохранить добычу на уровне плановых показателей в течение двух месяцев.

Отсюда следует вывод, что межремонтный цикл скважины в1.9.6 в среднем составляет 3 месяца (90 суток). Проведенные в октябре и ноябре РВР (Х/О+Тпр) не дали такого эффекта, как в марте, добыча составила в среднем 26 кг/сут.

В декабре были проведены опытные работы по применению метода пневмоимпульсной обработки скважины (ПИО). Эффективность оказалась выше РВР, про-

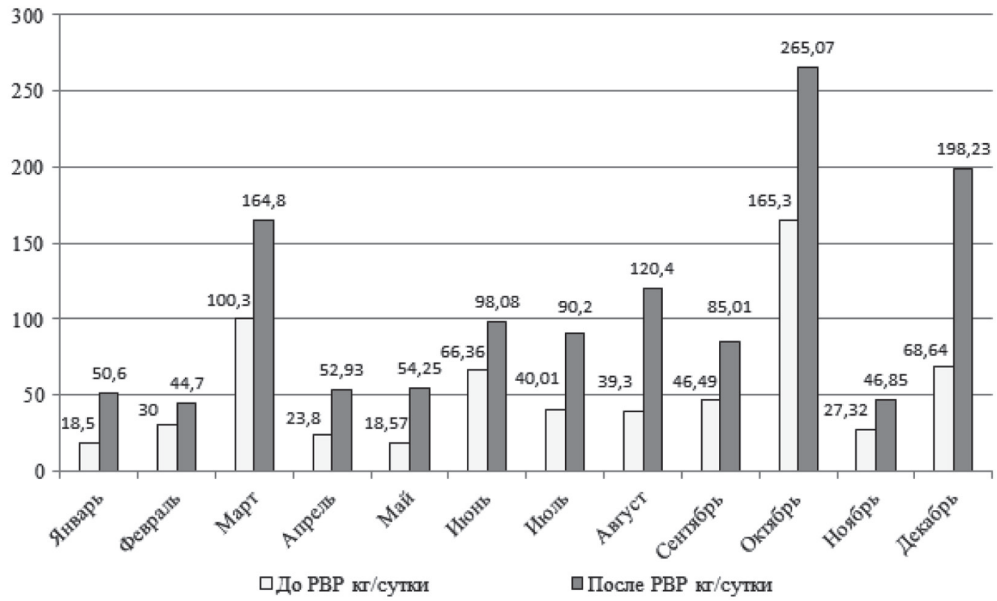

Рис. 5. Прирост объемов добычи за 2018 г. до и после ремонтно-восстановительных работ
Fig. 5. Increase in production volumes for 2018 before and after repair work

водимых в марте, а производительность скважины составила 47,8 кг/сут. Анализ графика свидетельствует о перспективности использования в дальнейших РВР пневоимпульсной обработки с соблюдением сроков межремонтного цикла. Средняя интенсивность прироста добычи по сравнению с предшествующим циклом обработки составила 23,73 кг/сут., или 198,58 %.

При вводе в эксплуатацию добыча скважины в1.10.34 составляла 2,23 кг/сут. (рис. 4). В августе 2018 г. проведенная технологическая прокачка показала прирост в 6,02 кг/сут., межремонтный цикл составил 40 сут. Средняя эффективность прироста от первоначальных показателей добычи составила 6,3 кг/сут. или 282%.

Проведенные в 2018 г. наблюдения показали, что именно на откачных скважинах химическая кольматация проявляется в более серьезной форме, образуя так называемую «цементационную пробку», вызывая критическое снижение добычи ниже эксплуатационных показателей.

Ухудшение характеристик каркасно-дисковых фильтров и фильтрационных свойств прифильтровой зоны требует проведения комплекса ремонтно-восстановительных работ.

На рис. 5 приведены статистические данные о среднем объеме добычи урана за 2018 г. до проведения РВР и его приросте после их проведения. Средний прирост добычи за 2018 г. составил 52,21 кг/сут., или 97,19%.

Заключение

Наиболее оптимальным комплексом ремонтно-восстановительных работ следует считать последовательное использование следующих методов:

- Пневмоимпульсная обработка;
- Проливка скважины выщелачивающими растворами;
- Химическая обработка реагентами (бифторид аммония, соляная кислота, серная кислота);
- Выстойка скважины в состоянии покоя с химическими реагентами;
- Продавка в продуктивный горизонт химического реагента при помощи закачки выщелачивающих растворов;
- Технологическая прокачка методом эрлифта;
- Ввод скважины в эксплуатацию, путем монтажа погружного насосного агрегата марки ЭЦНК.

Работы по анализу и подбору оптимального комплекса обработки прифильтровых зон для условий месторождений АО «Хиагда» продолжаются, в 2019 г. планируется провести опытные работы по применению пневмоимпульсной обработки, как перед химической обработкой, так и после, таким образом, предполагается более тщательная проработка пневмовоздействия на фильтрационную колонну.

Из всего вышесказанного следует вывод, что своевременное и качественное проведение работ по восстановлению и повышению производительности откачных геотехнологических скважин обеспечивает интенсификацию добычи урана на месторождениях АО «Хиагда». При проведении РВР следует учитывать индивидуальные особенности каждой скважины, фильтрационные свойства пород в прифильтровой зоне и обеспеченность закачной ячейки достаточным объемом выщелачивающих растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агошков М.И., Малахов Г.М.* Подземная разработка рудных месторождений. — М.: Недра, 1966. — 664 с.

2. *Антоненко Г.К., Гольдберг В.М.* Фильтрационные свойства пород и вязкость растворов глубоких водоносных горизонтов. — М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1969. — 73 с.

3. *Аренс В.Ж.* Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. — М.: Недра, 1975. — 264 с.

4. Добыча урана методом подземного выщелачивания / Под ред. В.А. Мамилова. — М.: Атомиздат, 1980. — 248 с.

5. *Manfred Hartmut Akstina*t Bohrlochzementation — Herausforderungen der Ölfeldchemie — Cementing — Challenges of Oilfield Chemistry — (German Edition). 2015.

6. *Saleh Ahmed, Fathi Elldakli, Phillip Mcelroy* Simulation techniques used for modeling horizontal wells andthe role of grid refinement. 2019.

7. *Верхотуров А.Г., Сабигатулин А.А.* Совершенствование конструкции и ремонт геотехнологических скважин, сооружаемых в криолитозоне Центрального Забайкалья: сборник научных статей. Ч. 2. — Чита: ЗабГУ, 2018. — С. 20—24.

8. *Solodov I.N.* In Situ Leach Mining of Uranium in the Permafrost Zone, Khiagda Mine, Russain Federatin / URAM-2014. IAEA. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cucle: Exploration, Mining, Production, Sypply and Demand, Economics and Environment issues Vienna, Austria 23—27 June, 2014.

9. *Christe Fabien* Angewandtes Vier-Phasen-Modell im norwegischen Permafrost.Bachelorarbeit, Universität Freiburg-CH, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Departement für Geowissenschaften. 2015.

10. *Белецкий В.И. и др.* Справочник по геотехнологии урана / Под. ред. Д.И. Скороварова. — Энергоатомиздат, 1997. — 672 с.

11. *Сергиенко И.А.*, *Мосев А.Ф.*, *Бочко Э.А.*, *Пименов М.К.* Бурение и оборудование геотехнологических скважин. — М.: Недра, 1984. — 224 с.

12. *Пенкевич С.В.* Методические указания к расчету эрлифта при откачке из гидрогеологических скважин. — М.: МГГРУ, 2003. — 28 с.

13. *Волков В.П.* Сорбционные процессы действующих производств. — М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2014. — 160 с.

14. *Marcus Soare*s The influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lake bed clogging. 2015.

15. *Матаев М.М., Кенжетаев Ж.С.* Подбор эффективных методов ремонтно-восстановительных работ при подземном выщелачивании урана // Успехи современного естествознания. — 2015. — № 1. — С. 1001—1004.

16. *Оракбаев Е.Ж.* Исследование и разработка эффективных систем управления процессом подземного выщелачивания: дис. докт. наук. — Алматы: КНИТУ им. К.И. Сатпаева 2017. — 117 с.

17. *Халимов И.У.* Совершенствование технологии скважинного подземного выщелачивания на основе развития процесса гидравлического разрыва пласта: дис. к.т.н., М.: РГГРУ, 2014.

18. *Benes V., Gorbatenko O., Jones B., Marten H., Solodov I., Slezak J.* International overview of ISL uranium mining operations // P/ Woods, Th. Pool2 / IAEA — Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: Exploration, Mining, Production, Sypply and Demand, Economics and Environment issues 23—27 June, 2014 Vienna, Austria URAM 2014. ГИАБ

REFERENCES

1. Agoshkov M.I., Malakhov G.M. *Podzemnaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy* [Underground mining of ore deposits], Moscow, Nedra, 1966, 664 p.

2. Antonenko G.K., Gol'dberg V.M. *Fil'tratsionnye svoystva porod i vyazkost' rastvorov glubokikh vodonosnykh gorizontov* [Filtration properties of rocks and viscosity solutions of deep aquifers], Moscow, Izd-vo VSEGINGEO, 1969, 73 p.

3. Arens V.Zh. *Geotekhnologicheskie metody dobychi poleznykh iskopaemykh* [Geotechnological methods of mining], Moscow, Nedra, 1975, 264 p.

4. *Dobycha urana metodom podzemnogo vyshchelachivaniya*. Pod red. V.A. Mamilova [Uranium mining by the method of underground leaching. Mamilov V.A. (Ed.)], Moscow, Atomizdat, 1980, 248 p.

5. Manfred Hartmut Akstinat *Bohrlochzementation — Herausforderungen der Ölfeldchemie — Cementing — Challenges of Oilfield Chemistry* — (German Edition). 2015.

6. Saleh Ahmed, Fathi Elldakli, Phillip Mcelroy *Simulation techniques used for modeling horizontal wells andthe role of grid refinement*. 2019.

7. Verkhoturov A.G., Sabigatulin A.A. *Sovershenstvovanie konstruktsii i remont geotekhnologicheskikh skvazhin, sooruzhaemykh v kriolitozone Tsentral'nogo Zabaykal'ya*: sbornik nauchnykh statey. Ch. 2 [Design improvement and repair of geotechnological wells constructed in the permafrost zone of Central Transbaikalia. Collection of scientific articles. Ч. 2], Chita, ZabGU, 2018, pp. 20—24.

8. Solodov I.N. In Situ Leach Mining of Uranium in the Permafrost Zone, Khiagda Mine, Russain Federatin. URAM-2014. IAEA. *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cucle*: Exploration, Mining, Production, Sypply and Demand, Economics and Environment issues Vienna, Austria 23—27 June, 2014.

9. Christe Fabien *Angewandtes Vier-Phasen-Modell im norwegischen Permafrost.Bachelorarbeit*, Universität Freiburg-CH, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Departement für Geowissenschaften. 2015.

10. Beletskiy V.I. *Spravochnik po geotekhnologii urana*. Pod. red. D.I. Skorovarova [Handbook of uranium geotechnology. Skorovarov D.I. (Ed.)], Energoatomizdat, 1997, 672 p.

11. Sergienko I.A., Mosev A.F., Bochko E.A., Pimenov M.K. *Burenie i oborudovanie geotekhnologicheskikh skvazhin* [Drilling and equipment of geotechnological wells], Moscow, Nedra, 1984, 224 p.

12. Penkevich S.V. *Metodicheskie ukazaniya k raschetu erlifta pri otkachke iz gidrogeologicheskikh skvazhin* [Guidelines for the calculation of airlift when pumping from hydrogeological wells], Moscow, MGGRU, 2003, 28 p.

13. Volkov V.P. *Sorbtsionnye protsessy deystvuyushchikh proizvodstv* [Sorption processes of existing industries], Moscow, Izdatel'skiy dom «Ruda i metally», 2014, 160 p.

14. Marcus Soares T*he influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lake bed clogging*. 2015.

15. Mataev M.M., Kenzhetaev Zh.S. Selection of effective methods of repair and restoration work under the underground leaching of Uran. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2015, no 1, pp. 1001—1004. [In Russ].

16. Orakbaev E.Zh. *Issledovanie i razrabotka effektivnykh sistem upravleniya protsessom podzemnogo vyshchelachivaniya* [Research and development of effective process control systems of underground leaching], Doctor's thesis, Almaty, KNITU im. K.I. Satpaeva, 2017, 117 p.

17. Khalimov I.U. *Sovershenstvovanie tekhnologii skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya na osnove razvitiya protsessa gidravlicheskogo razryva plasta* [Improvement of downhole leaching technology based on the development of hydraulic fracturing process], Candidate's thesis, Moscow, RGGRU, 2014.

18. Benes V., Gorbatenko O., Jones B., Marten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. P. Woods, Th. Pool2. *IAEA — Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: Exploration, Mining, Production, Sypply and Demand, Economics and Environment* issues 23—27 June, 2014 Vienna, Austria URAM 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Верхотуров Алексей Геннадьевич[1] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: weral0606@yandex.ru,
Сабигатулин Алексей Александрович[1] — аспирант,
e-mail: ya.sabik1994@yandex.ru,
[1] Забайкальский государственный университет.
Для контактов: Верхотуров А.Г., e-mail: weral0606@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Verkhoturov[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,
Head of Chair, e-mail: weral0606@yandex.ru,
A.A. Sabigatulin[1], Graduate Student,
e-mail: ya.sabik1994@yandex.ru,
[1] Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.
Corresponding author: A.G. Verkhoturov, e-mail: weral0606@yandex.ru.