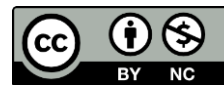


<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

УДК 622:621.039

EDN ABYODY

Оригинальная статья / Original paper



## Эксплуатационные аспекты восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов методом химической декольматации в Республике Казахстан

Алексеев Д.В.<sup>1</sup>✉, Колычев В.Д.<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>АО «Волковгеология», г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

✉ [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)


**Аннотация.** Статья посвящена анализу эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов, разрабатываемых методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), в условиях развития процессов химической и механической кольматации прифилтровой зоны. Актуальность исследования обусловлена тем, что снижение дебитов скважин приводит к нарушению проектных режимов эксплуатации ПСВ-блоков, увеличению сроков их отработки, росту расхода реагентов и эксплуатационных затрат, а также повышению технологических и экологических рисков при добыче урана. Объектом исследования являются технологические скважины уранодобывающих объектов атомной отрасли, эксплуатируемые в промышленном режиме методом ПСВ. Предмет исследования – эксплуатационные параметры скважин и методы восстановления их производительности в условиях кольматации прифилтровой зоны. Целью работы является обоснование и оценка практической эффективности химической декольматации как метода ремонтно-восстановительных работ, направленного на восстановление дебита и повышение устойчивости эксплуатационных режимов скважинного фонда. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: анализ эксплуатационных причин снижения дебита технологических скважин; оценка влияния кольматационных процессов на фильтрационные свойства прифилтровой зоны; обоснование выбора химической декольматации как метода восстановительных работ; экспериментальная оценка воздействия реагентной обработки на элементы конструкции скважин; анализ изменения дебита и устойчивости эксплуатационных показателей скважин до и после проведения обработок. В качестве методов исследования использованы лабораторные испытания, анализ и мониторинг производственных данных эксплуатации скважин, а также обобщение результатов опытно-промышленных испытаний на действующих уранодобывающих объектах. В качестве материалов исследования использованы данные производственного контроля, результаты лабораторных исследований и эксплуатационные показатели скважинного фонда. Полученные результаты показали, что применение химической декольматации обеспечивает восстановление фильтрационных свойств прифилтровой зоны, рост дебита скважин и повышение устойчивости гидродинамических режимов, что позволяет увеличить межремонтный период эксплуатации. Сделан вывод о целесообразности включения данного метода в регламентные ремонтно-восстановительные мероприятия при эксплуатации уранодобывающих объектов атомной отрасли.

**Ключевые слова:** уран, подземное скважинное выщелачивание, атомная отрасль, технологические скважины, эксплуатация скважин, дебит скважин, восстановление дебита, кольматация, декольматация, прифилтровая зона, фильтрационные свойства, гидродинамический режим, ремонтно-восстановительные работы, реагентная обработка, промышленная эксплуатация, эксплуатационная надежность, промышленная безопасность, эффективность эксплуатации

**Для цитирования:** Алексеев Д.В., Колычев В.Д. Эксплуатационные аспекты восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов методом химической декольматации в Республике Казахстан. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):5-15. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

**For citation:** Alekseenko D.V., Kolychev V.D. Operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities through chemical decolmatation in the Republic of Kazakhstan. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):5-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

## Operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities through chemical decolmatation in the Republic of Kazakhstan

Dmitry V. Alekseenko.<sup>1</sup>✉, Vladimir D. Kolychev<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>*Volkovgeologiya JSC, Almaty, Republic of Kazakhstan*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University "MEPHI", Moscow, Russian Federation*

✉ [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the analysis of operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities developed using the in-situ recovery (ISR) method under conditions of progressing chemical and mechanical clogging of the near-wellbore zone. The relevance of the study is determined by the fact that a decrease in well flow rates leads to violations of the design operating regimes of ISR blocks, an increase in block development time, higher reagent consumption and operating costs, as well as an increase in technological and environmental risks associated with uranium production. The object of the study is technological wells of uranium mining facilities within the nuclear industry, operated in an industrial mode using the ISR method. The subject of the study comprises the operational parameters of wells and methods for restoring their productivity under conditions of near-wellbore zone clogging. The purpose of the study is to substantiate and evaluate the practical effectiveness of chemical decolmatation as a repair and rehabilitation method aimed at restoring well flow rates and improving the stability of operational regimes of the well stock. To achieve this purpose, the following research objectives are addressed: analysis of operational causes of flow rate decline in technological wells; assessment of the impact of clogging processes on the filtration properties of the near-filter zone; justification of the selection of chemical decolmatation as a restoration method; experimental evaluation of the effects of reagent treatment on well construction elements; analysis of changes in well flow rates and the stability of operational performance indicators before and after treatment. The research methods included laboratory testing, analysis and monitoring of production well operation data, as well as generalization of the results of pilot-scale and industrial trials conducted at operating uranium mining facilities. The research materials consist of production control data, laboratory test results, and operational indicators of the well stock. The results obtained demonstrate that the application of chemical decolmatation ensures the restoration of filtration properties of the near-wellbore zone, increases well flow rates, and enhances the stability of hydrodynamic operating regimes, thereby extending the inter-repair operating period. It is concluded that the inclusion of this method in standard repair and rehabilitation procedures for the operation of uranium mining facilities within the nuclear industry is expedient.

**Keywords:** uranium, in-situ recovery (ISR), nuclear industry, technological wells, well operation, well flow rate, flow rate restoration, clogging, decolmatation, near-wellbore zone, filtration properties, hydrodynamic regime, repair and rehabilitation works, reagent treatment, industrial operation, operational reliability, industrial safety, operational efficiency

### Введение

Уранодобывающая отрасль является важным элементом ядерного топливного цикла<sup>1</sup>. В Республике Казахстан базовой технологией добычи урана является подземное скважинное выщелачивание (ПСВ)<sup>2</sup> [1], эффективность которого во многом определяется надежной эксплуатацией технологических

скважин<sup>3</sup> [2] и соблюдением требований промышленной и экологической безопасности.

В процессе длительной эксплуатации ПСВ-блоков наблюдается снижение интенсивности добычи уранового сырья ввиду ухудшения эксплуатационно-технических и технологических параметров скважин, при этом одной из наиболее распространенных проблем становится снижение дебита технологических скважин из-за химической и механической кольматации прифилтровой

<sup>1</sup> OECDNEA, IAEA. Uranium 2022: resources, production and demand (Red Book). Paris: OECD Publishing, 2022. 560 p. Available at: [https://tdb.oecd-nea.org/jcms/pl\\_79960/uranium-2022-resourcesproduction-and-demand?details=true](https://tdb.oecd-nea.org/jcms/pl_79960/uranium-2022-resourcesproduction-and-demand?details=true) (accessed: 21.02.2026).

<sup>2</sup> World Nuclear Association (WNA). Global uranium production. London: WNA, 2024. Available at: <https://world-nuclear.org> (accessed: 21.02.2026)

<sup>3</sup> Orano Mining. Uranium mining technology using underground well leaching. Paris: Orano, 2021. 44 p. Available at: [https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/expertises/producteur-uranium/32p\\_dp\\_orano\\_mining.pdf?sfvrsn=33004738\\_10](https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/expertises/producteur-uranium/32p_dp_orano_mining.pdf?sfvrsn=33004738_10) (accessed: 21.02.2026).

зоны [3,4], вызывая нарушение проектных режимов, увеличивая сроки отработки блоков, расход реагентов и эксплуатационные затраты, повышая технологические и экологические риски [5].

Поддержание требований промышленной и экологической безопасности требует своевременных ремонтно-восстановительных мероприятий, однако стандартные механические методы обработки не всегда обеспечивают устойчивый эффект при высокой кольматации. В связи с этим в реальных эксплуатационных условиях возникает задача восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих месторождений методом химической декольматации, позволяющей целенаправленно удалять кольматационные образования и восстанавливать фильтрационные свойства прифильтровой зоны [6], с учетом выполнения требований повышения эффективности использования объекта, устойчивости достигнутого эффекта и безопасности выполнения работ.

Оценка эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин методом химической декольматации рассматривается в настоящей статье на основе результатов лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний в условиях промышленной эксплуатации урановых месторождений. Исследуются рудники «Инкай» (месторождение «Инкай») и «Каратау» (месторождение «Буденовское»), отнесенные к пластово-инфильтрационным песчаным и алевритовым коллекторам с переменной глинистостью и карбонатностью [6]. Продуктивные пласты сложены кварцево-полевошпатовыми песчаниками с преобладанием кварца (50-70 % объема обломочного материала) и полевых шпатов (5-25 %), при содержании обломков кремнистых пород до 30 %. Поровый наполнитель представлен глинисто-алевритовым материалом (11-27 %), включающим каолинит (3-6 %), монтмориллонит (3-4 %) и гидрослюда (1-3 %). Содержание карбонатных минералов (кальцит, сидерит) составляет до 0,2-0,3 %, однако их реакционная способность в сернокислотной среде способствует образованию вторичных сульфатных фаз. Минеральный состав и наличие глинисто-

карбонатного цемента предопределяют склонность призабойной зоны к химической и механической кольматации при изменении фильтрационного режима и состава технологических растворов [6].

С целью разработки методов и выбора режимов восстановления дебита технологических скважин на рудниках месторождения принимались во внимание литологические характеристики пластов, вещественный состав пород и особенности взаимодействия реагентов с фильтрующими материалами, что позволило обосновать выбор реагентных составов для разрушения карбонатно-глинистых отложений без повреждения конструктивных элементов скважины [7]

В современных литературных источниках по проблематике анализа эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов рассматриваются гидрогеологические условия, химические аспекты выщелачивания и факторы, влияющие на работу скважинного фонда. Отмечается, что химическая и механическая кольматация прифильтровой зоны ухудшает проницаемость призабойного пространства, повышает перепады давления и снижает эффективность массопереноса [8,9]. При этом практические вопросы оценки эффективности химической декольматации в промышленной эксплуатации, устойчивости эффекта и требований безопасности остаются недостаточно систематизированными, что определяет необходимость прикладных исследований.

Объектом исследования являются технологические скважины уранодобывающих объектов Республики Казахстан, эксплуатируемые в промышленном режиме методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), включая откачные и закачные скважины в составе эксплуатационных ПСВ-блоков. Предмет исследования – эксплуатационные параметры технологических скважин уранодобывающих объектов, а также методы восстановления их производительности в условиях химической и механической кольматации прифильтровой зоны при подземном скважинном выщелачивании. Цель работы – обоснование и оценка практической эффективности химической

декольматации как метода восстановления дебита технологических скважин и повышения устойчивости их эксплуатационных режимов при подземном скважинном выщелачивании урана. Задачи исследования:

- проанализировать эксплуатационные причины снижения дебита технологических скважин уранодобывающих объектов при подземном скважинном выщелачивании;

- оценить влияние процессов химической и механической коагуляции на фильтрационные свойства прифильтровой зоны скважин;

- обосновать выбор химической декольматации в качестве метода ремонтно-восстановительных работ для восстановления производительности скважин;

- провести экспериментальную и опытно-промышленную оценку воздействия реагентной обработки на эксплуатационные параметры технологических скважин;

- проанализировать изменение дебита и устойчивости эксплуатационных режимов скважин до и после проведения химической декольматации.

### Методология и методы исследования

Результаты опытно-промышленных работ по восстановлению дебита технологических скважин методом химической декольматации на уранодобывающих объектах Республики Казахстан (рудники «Инкай» и «Каратау») положены в основу аналитического сопоставления параметров дебита, представленного в настоящей статье. В рамках выполненных работ реагентной обработке подвергнуто более 30 технологических скважин на каждом руднике. В статье приведены результаты по репрезентативным фрагментам выборки (по 5 скважин на каждом объекте), позволяющим продемонстрировать характер изменения дебита и динамику восстановительного эффекта.

Контроль параметров дебита осуществлялся за 1 час до обработки, непосредственно после промывки и через 24 часа после завершения реагентной обработки. Дополнительно проводился мониторинг состояния обработанных скважин: по руднику «Инкай» – в течение 40–43 суток, по руднику «Каратау» – в течение 30 суток.

Анализ параметров дебита выполнялся с использованием электромагнитных расходомеров путем измерения объемов откачки за фиксированный интервал времени (60 минут) с одновременным учетом параметров давления и режимов работы насосного оборудования.

Оценка эффективности обработки проводилась на основании изменения дебита и устойчивости достигнутого эффекта в контрольный период наблюдения. Эффект считался устойчивым при сохранении увеличенного дебита с отклонением не более  $\pm 10\%$  от достигнутого значения в течение всего периода мониторинга.

В лабораторных условиях на основе анализа минералогического состава продуктивных пород и характера коагуляционных образований был подобран оптимальный реагентный состав [2,9], включающий растворы бифторида аммония (БФА) в сочетании с серной кислотой и поверхностно-активными веществами (сульфонол) [4,10]. Данный состав и применяли на опытно-промышленных испытаниях. Для ряда этапов использовались составы БФА  $16 \text{ г/дм}^3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 25 \text{ г/дм}^3$ , а также БФА  $16 \text{ г/дм}^3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 30 \text{ г/дм}^3 + \text{сульфонол } 0,5 \text{ г/дм}^3$ .

Обработка скважин на месторождениях выполнялась путем закачки раствора в объеме порядка  $4 \text{ м}^3$  с выдержкой 24 часа, последующей прокачкой (промывкой) порядка  $40 \text{ м}^3$  и контрольным замером дебита.

В лабораторных условиях проводилась дополнительная оценка совместимости реагентов с конструкционными материалами скважин (кислотоустойчивый гравий, ПВХ, полистирол), при этом признаков разрушения указанных компонентов выявлено не было.

Для оценки изменения фильтрационных характеристик прифильтровой зоны использовался относительный коэффициент восстановления проницаемости:  $K_{\text{восст}} = Q_{\text{после}} / Q_{\text{до}}$ , где  $Q_{\text{до}}$  – дебит до обработки,  $Q_{\text{после}}$  – дебит через 24 часа после обработки. Полученные значения  $K_{\text{восст}}$  варьировались в следующих диапазонах:

- для рудника «Инкай»: от 1,4 до 7,5;
- для рудника «Каратау»: от 3,7 до 27,5.

### **Эксплуатационные проблемы технологических скважин при ПСВ**

Снижение дебита технологических скважин при ПСВ обусловлено комплексом физико-химических процессов, протекающих в призабойной зоне пласта в условиях длительного воздействия сернокислотных выщелачивающих растворов [8]. По данным производственных наблюдений и опытно-промышленных работ, выполненных авторами на рудниках «Инкай» и «Каратау», в процессе эксплуатации дебит отдельных скважин может снижаться на 10-20 %, что сопровождается уменьшением фильтрационной проводимости призабойной зоны в среднем на 20-30 %. Ключевым механизмом является развитие процессов химической и механической коагуляции [9,10].

Химическая коагуляция связана с образованием вторичных минеральных фаз – продуктов взаимодействия выщелачивающих растворов с породами коллектора и компонентами пластовых вод. В условиях сернокислотного выщелачивания возможно выпадение сульфатных и гидроксидных соединений железа, алюминия и кальция, а также перекристаллизация карбонатных цементов, что приводит к снижению эффективной проницаемости порового пространства.

Механическая коагуляция обусловлена миграцией глинистых и тонкодисперсных частиц (до 25 % глинистого материала в составе коллектора), которые при изменении фильтрационного режима перемещаются в зону фильтра и прифильтровое пространство. Закупоривание пор и фильтровых отверстий вызывает локальное увеличение гидравлического сопротивления и рост перепадов давления.

Следствием указанных процессов становится не только снижение производительности отдельных скважин, но и нарушение устойчивости гидродинамических режимов ПСВ-блоков: перераспределение потоков по наименее сопротивляющимся каналам, формирование зон пониженного массопереноса и локальная неравномерность продвижения фронта выщелачивания [8]. В совокупности это повышает чувствительность системы к режимным колебаниям и усложняет под-

держание проектных параметров эксплуатации, что обуславливает необходимость применения методов восстановительного воздействия на призабойную зону [10].

### **Химическая декоагуляция как метод восстановления дебита технологических скважин**

Химическая декоагуляция относится к методам реагентного воздействия на призабойную зону пласта, направленным на устранение факторов, ограничивающих фильтрационную проводимость и гидродинамическую связь «пласт–скважина». В условиях ПСВ данный метод рассматривается как элемент регламентированных ремонтно-восстановительных мероприятий, применяемых при выявлении устойчивого снижения дебита, не связанного с изменением технологических режимов нагнетания и отбора [9,10].

В отличие от механических способов очистки, реагентное воздействие обеспечивает проникновение активных компонентов в зону фильтрации и воздействие на коагуляционные образования различной природы. Это позволяет воздействовать не только на поверхностные отложения в зоне фильтра, но и на более глубокие участки прифильтрового пространства, где формируются вторичные минеральные осадки и зоны повышенного гидравлического сопротивления.

Механизм восстановительного эффекта обусловлен совокупностью физико-химических процессов, включающих растворение карбонатных и глинистых компонентов цемента, деструкцию вторичных сульфатных фаз и частичную стабилизацию дисперсных частиц. В результате обработки происходит увеличение эффективного сечения фильтрационных каналов и снижение сопротивления движению растворов. Последующая прокачка обеспечивает удаление продуктов реакции и мобилизованного дисперсного материала из зоны фильтрации, что способствует закреплению достигнутого эффекта.

Следует отметить, что эффективность химической декоагуляции определяется не только составом реагентной композиции, но и соответствием параметров обработки

геолого-фильтрационным характеристикам конкретного пласта. Несоответствие режима воздействия свойствам коллектора может привести к локальному перераспределению потоков без выраженного восстановления дебита. Поэтому реагентная обработка рассматривается как управляемый технологический процесс, требующий учета литологического состава, степени кольтации и текущих эксплуатационных условий.

Таким образом, химическая декольтация представляет собой не разовую операцию очистки, а технологический инструмент регулирования фильтрационной проводимости призабойной зоны, направленный на восстановление эксплуатационных параметров скважин и стабилизацию работы ПСВ-блоков [9].

### Результаты исследования

Проведенные лабораторные и опытно-промышленные работы позволили количественно оценить эффект химической декольтации на изменение дебита технологических скважин в условиях промышленной эксплуатации ПСВ-блоков.

По результатам обработок на рудниках «Инкай» и «Каратау» зафиксировано устойчивое увеличение дебита скважин через 24 часа после проведения реагентной обработки. Полученные данные свидетельствуют о восстановлении фильтрационной проводимости призабойной зоны и снижении гидравлического сопротивления в прифильтровом пространстве.

Дальнейший анализ проводился на основании сопоставления параметров дебита до обработки, непосредственно после промывки и в контрольный период наблюдения.

### Статистическая характеристика эффекта

Проведенный в рамках настоящего исследования статистический анализ коэффициента восстановления проницаемости на примере рудного месторождения «Инкай» позволяет представить следующие оценочные параметры получаемого эффекта:

- средний коэффициент восстановления дебита составил  $K_{\text{восст}}=2,3$ ;
- диапазон разброса значений: 1,4–7,5;
- медианное значение: около 2,0;

– коэффициент вариации – умеренный, что свидетельствует о воспроизводимости эффекта.

Для рудного месторождения «Каратау» оценочные параметры получаемого эффекта представлены на следующем уровне:

- средний коэффициент восстановления дебита  $K_{\text{восст}}=5,6$ ;
- диапазон разброса значений: 3,7–27,5;
- медианное значение – ниже среднего, что указывает на наличие отдельных скважин с выраженным эффектом;
- коэффициент вариации выше по сравнению с месторождением «Инкай», что связано с большей неоднородностью литологического строения продуктивного пласта.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о статистически устойчивом характере прироста дебита при применении химической декольтации.

Повышенные значения коэффициента вариации для рудного месторождения «Каратау» объясняются большей неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта и различной степенью развития процессов кольтации в отдельных скважинах. При этом во всех случаях наблюдался положительный прирост дебита, что подтверждает системный характер воздействия реагентной обработки.

Дополнительно установлено, что применение химической декольтации позволяет сократить в среднем на 25% потребность в повторных ремонтно-восстановительных мероприятиях и способствует сокращению эксплуатационных затрат [2,4], связанных с поддержанием проектных режимов работы ПСВ-объектов. Полученные результаты, представленные в таблице 1 для рудника «Инкай» и в таблице 2 для рудника «Каратау», подтверждают практическую эффективность метода и его целесообразность для использования в составе регламентных мероприятий по эксплуатации уранодобывающих объектов атомной отрасли, включая элементы цифрового и операционного управления производственными процессами, направленные на повышение эффективности и устойчивости эксплуатации [11].

**Таблица 1.** Изменение дебита после химической декольматации на руднике «Инкай» (фрагмент ОПИ 5 скважин).

**Table 1.** Change in well flow rate after chemical decolmatation at the «Inkai» uranium mine (pilot-scale trial fragment, 5 wells)

№ п/п	Скважина	До обработки, м <sup>3</sup> /час	Через 24 часа, м <sup>3</sup> /час	Период контроля, сут
1	16-20-4 (откачная)	2,0	14,9	43
2	16-16-3 (откачная)	4,2	10,0	42
3	16-17-4 (закачная)	3,5	5,0	43
4	22-8-1 (откачная)	7,4	11,0	40
5	4-6-3а (откачная)	2,7	12,0	40

На рисунке 1 представлена визуализация динамики изменения дебита откачной скважины до использования бифторида аммония и после его применения на руднике «Инкай» (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ).



**Рисунок 1.** Динамика дебита технологической скважины до и после химической декольматации на руднике «Инкай»

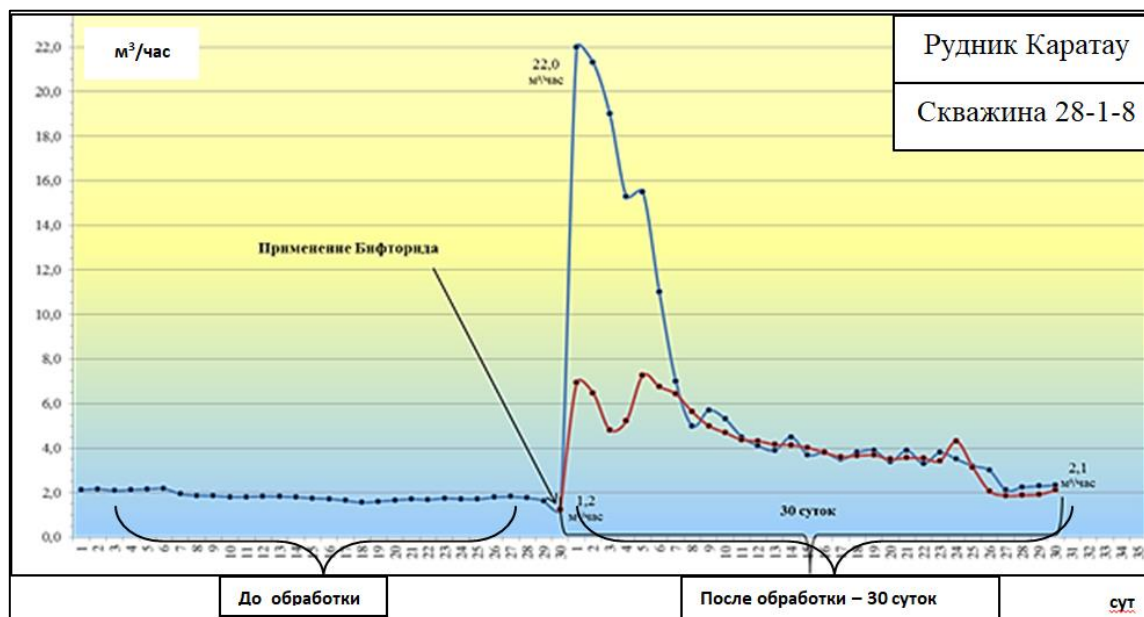
**Figure 1.** Dynamics of production well flow rate before and after chemical decolmatation at the «Inkai» uranium mine

**Таблица 2.** Изменение дебита после химической декольматации на руднике «Каратау» (фрагмент ОПИ 5 скважин)

**Table 2.** Change in well flow rate after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine (pilot-scale trial fragment, 5 wells)

№ п/п	Скважина	До обработки, м <sup>3</sup> /час	Через 24 часа, м <sup>3</sup> /час	Период контроля, сут
1	28-1-8 (закачная)	1,2	22,0	30
2	28-1-9 (закачная)	1,4	13,5	30
3	28-3-5 (закачная)	1,5	16,5	30
4	28-3-6 (закачная)	0,8	20,1	30
5	43-4-4 (откачная)	3,6	20,0	30

На рисунке 2 представлена визуализация динамики изменения дебита откачной скважины до использования бифторида аммония и после его применения на руднике «Каратау» (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ).

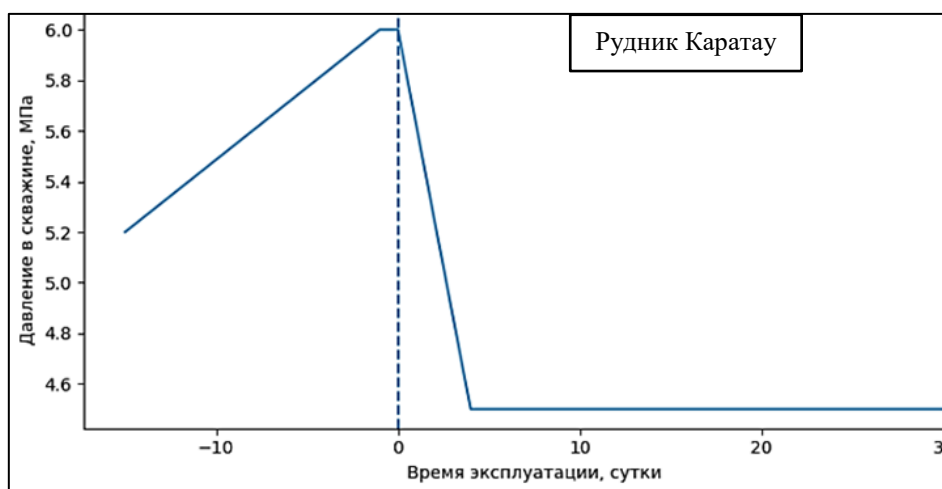


**Рисунок 2.** Динамика дебита технологической скважины до и после химической декольматации на руднике «Каратау»

**Figure 2.** Dynamics of production well flow rate before and after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine

Анализ динамики изменения дебита технологических скважин на рудниках «Ин-кай» и «Каратау», (рис. 1 и 2 соответственно) показывает, что после проведения химической декольматации достигается восстановление дебита до устойчивого эксплуатационного уровня с последующей стабилизацией режима работы скважины. Полученный эффект свидетельствует о восстановлении фильтрационных свойств прифилтровой зоны и повышении устойчивости гидродинамических режимов эксплуатации [8,10].

Анализ динамики изменения давления в технологической скважине, представленный на рисунке 3 (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ), показывает, что проведение химической декольматации приводит к снижению и стабилизации давления в призабойной зоне. Полученный эффект свидетельствует о снижении гидравлических сопротивлений, восстановлении фильтрационных свойств прифилтровой зоны и повышении устойчивости эксплуатационных режимов.



**Рисунок 3.** Динамика изменения давления в технологической скважине до и после химической декольматации на руднике «Каратау»

**Figure 3.** Pressure dynamics changes in a technological well before and after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine

В целом полученные данные позволяют рассматривать химическую декольматацию как управляемый технологический инструмент регулирования фильтрационной проводимости призабойной зоны, а не как разовую операцию по устранению локальных отложений.

### **Обсуждение результатов**

Полученные в ходе исследования результаты подтверждают, что снижение дебита технологических скважин при подземном скважинном выщелачивании урана является системной эксплуатационной проблемой, обусловленной совокупным воздействием химических, гидродинамических и механических факторов. Анализ эксплуатационных данных показал, что развитие процессов кольматации прифильтровой зоны приводит не только к локальному ухудшению фильтрационных свойств призабойного пространства, но и оказывает комплексное влияние на устойчивость гидродинамических режимов ПСВ-блоков в целом.

Сопоставление результатов опытно-промышленных испытаний с данными, представленными в научной литературе, свидетельствует о том, что применение химической декольматации позволяет устранить ключевые причины снижения дебита, на которые традиционные механические методы ремонтно-восстановительных работ оказывают ограниченное воздействие. В отличие от стандартных способов очистки, химическая декольматация обеспечивает более равномерное восстановление проницаемости прифильтровой зоны и способствует стабилизации потоков выщелачивающих растворов [10,12].

### **Ограничения исследования**

Следует отметить, что исследование выполнено в условиях конкретных литолого-гидрогеологических характеристик место-

рождений «Инкай» и «Буденовское» [6]. Полученные результаты отражают эффективность метода в песчано-алевролитовых коллекторах с карбонатно-глинистым цементом и не могут быть напрямую экстраполированы на месторождения с иным минералогическим составом.

Дополнительные исследования целесообразно направить на оценку долговременного эффекта (свыше 3–6 месяцев) и количественную оценку влияния декольматации на извлечение урана из блока в целом.

### **Заключение**

Установлено, что снижение дебита технологических скважин при ПСВ обусловлено развитием химической и механической кольматации прифильтровой зоны, приводящей к росту гидравлических сопротивлений и нарушению проектных режимов работы ПСВ-блоков.

Применение реагентных составов на основе бифторида аммония в сочетании с серной кислотой и ПАВ обеспечивает восстановление фильтрационных свойств призабойной зоны без негативного воздействия на конструкционные материалы скважин.

В результате опытно-промышленных работ зафиксировано статистически устойчивое увеличение дебита:

- рудник Инкай – в среднем в 2,3 раза;
- рудник Каратау – в среднем в 5,6 раза.

Технологический эффект сохранялся в течение 30–43 суток наблюдения, что свидетельствует о стабилизации гидродинамических режимов ПСВ-блоков.

Полученные результаты согласуются с ранее разработанными подходами к оценке эффективности проектов интенсификации ПСВ-добычи, представленными в [12], что подтверждает применимость предложенного метода как с технологической, так и с экономической точки зрения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Oryngozhin Ye.S.O., Eremin N.A., Metaksa G.P., Alisheva Zh.N. Underground uranium borehole leaching. *News of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences.* 2020;4;442:62-69. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85>
2. Исманова К.Д., Дедаханов А.О., Мадалиев Х.Б. Физико-химические основы технологического процесса подземное выщелачивание. *Экономика и социум.* 2022;5-1(96):491-494. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-osnovy-tehnologicheskogo-protsessa-podzemnoe-vyshchelachivanie/viewer> (дата обращения: 21.11.2025).  
Ismanova K.D., Dedakhanov A.O., Madaliev Kh.B. Physical and chemical foundations of the underground leaching process. *Economics and Sociology.* 2022;5-1(96):491-494. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-osnovy-tehnologicheskogo-protsessa-podzemnoe-vyshchelachivanie/viewer> (accessed: 21.11.2025).
3. Рассказов И.Ю., Секисов А.Г., Рассказова А.В. Подземное выщелачивание молибдена и урана с использованием перкарбонатных и хлоридно-гипохлоритных растворов. *Записки Горного института.* 2022;256:623-631. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.60>  
Rasskazov I.Yu., Sekisov A.G., Rasskazova A.V. Underground leaching of molybdenum and uranium using percarbonate and chloride-hypochlorite solutions. *Notes of the Mining Institute.* 2022;256:623-631. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.60>
4. Ракишев Б.Р., Язиков Е.Г., Матаев М.М., Кенжетаев Ж.С. Выщелачивание урана из материала керновых проб в трубках с применением окислителя. *Горный журнал.* 2021;9:84-89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.09.14>  
Rakishev B.R., Yazikov E.G., Matayev M.M., Kenzhetaev Zh.S. Leaching of uranium from core samples in tubes using an oxidizing agent. *Mining Journal.* 2021;9:84-89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.09.14>
5. Поляков Н.А., Хандуева В.Д. Сквжинное подземное выщелачивание как метод добычи экологически безопасного урана. В сборнике: Наука, технологии и безопасность в XXI веке (инженерные науки). Материалы Региональной научно-практической студенческой конференции. Улан-Удэ, 2024. С. 55-58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80316453> (дата обращения: 01.12.2025).  
Polyakov N.A., Khandueva V.D. Well-based underground leaching as a method of extracting environmentally friendly uranium. In the collection: Science, technology, and security in the 21st century (engineering sciences). Materials of the regional scientific and practical student conference. Ulan-Ude, 2024. P. 55-58. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80316453> (accessed: 01.12.2025).
6. Яшин С.А. Подземное сквжинное выщелачивание урана на месторождениях Казахстана. *Горный журнал.* 2008;3:45-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10019277> (дата обращения 01.12.2025).  
Yashin S.A. Underground well-logging of uranium at deposits of Kazakhstan. *Mining Journal.* 2008;3:45-49. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10019277> (accessed: 01.12.2025).
7. 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>  
Panov Yu.P., Bryukhovetsky O.S., Sekisov A.G. On the application of new physical and chemical geotechnologies for the development of uranium Ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka.* 2023;65;1:8-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-1-8-14>
8. Овсейчук А.М., Зозуля В.А. Моделирование процессов фильтрации технологических растворов при блочном подземном выщелачивании. *Вестник Забайкальского государственного университета.* 2021;27;4:13-19. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19>  
Ovseichuk A.M., Zozulya V.A. Modeling of technological solutions filtration processes during block underground leaching. *Bulletin of Transbaikal state university.* 2021;27(4):13-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19>
9. Зозуля А.М., Овсейчук В.А. Повышение эффективности подземного выщелачивания за счет снижения технологических потерь урана. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2021;3-1:17-25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46109685> (дата обращения 02.12.2025).  
Zozulya A.M., Ovseichuk V.A. Improving the efficiency of underground leaching by reducing technological losses of uranium. *Mining informational and analytical bulletin.* 2021;3-1:17-25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46109685> (accessed: 21.11.2025).
10. Юсупов Х.А., Абен Е.Х., Омиргали А.К., Хайруллаев Н. Исследование изменения активности выщелачивающего раствора во времени после обработки кавитатором. *Новости науки Казахстана.* 2021;1 (148):61-68. [https://doi.org/10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_100](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_100)  
Yusupov Kh.A., Aben E.Kh., Omirgali A.K., Khairullaev N. Research of the change in the activity of the leaching solution in time after treatment with a cavitator. *News of science of Kazakhstan.* 2021;1 (148):61-68. (In Russ.). [https://doi.org/10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_100](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_100)
11. Колычев В.Д., Белкин И.О. Интеграция бережливого производства и цифровых технологий в управление операционной деятельностью промышленных предприятий. *Известия высших учебных заведений. Серия:*

*Экономика, финансы и управление производством.* 2023;3(57):45-58. Режим доступа: <https://ecofin-isuct.ru/article/view/5209> (дата обращения 02.12.2025).

Kolychev V.D., Belkin I.O. Integration of lean production and digital technologies into the management of industrial enterprises' operational activities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Series: Economics, finance and production management.* 2023;3(57):45-58. (In Russ.). Available at: <https://ecofin-isuct.ru/article/view/5209> (accessed: 02.12.2025).

12. Алексеевко Д.В., Колычев В.Д. Комплексная методика оценки эффективности инвестиционных проектов интенсификации подземного скважинного выщелачивания урана в условиях цифровизации: опыт республики Казахстан. *Вестник Забайкальского государственного университета.* 2026;(32):121-135. DOI: 10.21209/2227-9245-2026-32-1-121-135

Alekseenko D.V., Kolychev V.D. A comprehensive methodology for evaluating the efficiency of investment projects for intensifying in-situ uranium leaching under digitalization conditions: the experience of the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of Transbaikal State University.* 2026;(32):121-135. (In Russ.). DOI: 10.21209/2227-9245-2026-32-1-121-135

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Алексеевко Д.В.** – формирование концепции исследования, постановка цели и задач работы, анализ эксплуатационных данных, обобщение результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований, подготовка и написание основного текста статьи;

**Колычев В.Д.** – научное руководство исследованием, участие в формировании методологической базы, интерпретация полученных результатов, научное редактирование текста статьи и согласование выводов.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Alekseenko D.V.** – development of the research concept, formulation of the study objectives and tasks, analysis of operational data, synthesis of laboratory and pilot-scale industrial results, and preparation and writing of the main text of the article;

**Kolychev V.D.** – scientific supervision of the study, participation in the development of the methodological framework, interpretation of the obtained results, scientific editing of the article text, and validation of the conclusions.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Дмитрий Викторович Алексеевко**, начальник Управления трансформации и новых проектов АО «Волковгеология», г. Алматы, Казахстан.  
e-mail: [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)

**Владимир Дмитриевич Колычев**, к.т.н., доцент кафедры финансового мониторинга института финансовых технологий и экономической безопасности Национального исследовательского ядерного университета «НИЯУ МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-8616-9354>

e-mail: [kolychev@mephi.ru](mailto:kolychev@mephi.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Dmitry V. Alekseenko**, Head of the Department of Transformation and New Projects, Volkovgeologiya JSC, Almaty, Kazakhstan.  
e-mail: [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)

**Vladimir D. Kolychev**, Can. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Financial Monitoring, Institute of Financial Technologies and Economic Security, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-8616-9354>

e-mail: [kolychev@mephi.ru](mailto:kolychev@mephi.ru)

Поступила в редакцию / Received 17.12.2025

После доработки / Revision 12.05.2026

Принята к публикации / Accepted 15.05.2026