

АЙЖУЛОВ ДАНИАР ЕРСЕНОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ
ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ВИДЕ РОЛЛ-ФРОНТОВ**

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
«6D060300 – Механика»

Общее описание работы. Диссертация посвящена проведению численных экспериментов, имитирующих генезис пластово-инфильтрационный месторождений с целью определения механизмов, влияющих на их геометрию и состав, а также разработке нового геостатистического метода для создания высокоточных геологических моделей таких образований.

Актуальность работы. Казахстан является второй страной в мире по запасам урана, на его долю приходится до 12% мировых запасов. Около 40% всего урана, добываемого в мире, приходится на Казахстан. Уран — один из тех ресурсов, объемы добычи которых значительно превышают новые открытия в результате разведки. До сих пор Казахстан ориентировался на разработку месторождений с рентабельной концентрацией урана (менее \$80 за килограмм), однако за последние годы количество таких ресурсов сократилось на 43%, достигнув в общей сложности 2,1 млн тонн. Исходя из мощностей по добыче урана, с 2020 года наблюдается нехватка экономически эффективных урановых запасов. Этот дефицит неизбежно приведет к снижению рентабельности урановой промышленности Казахстана.

Месторождения пластового-окисления (роллфронты) имеют важное значение для горнодобывающей промышленности, особенно в урановом секторе. Эти месторождения являются минерализацией, которая образуется на окислительно-восстановительных фронтах в проницаемых породах. Месторождения содержат различные компоненты, в том числе редкоземельные, такие как селен, молибден, рений, ванадий, скандий и иттрий. Эффективность любого выбранного способа добычи с точки зрения стоимости бурения и дальнейшей эксплуатации во многом зависит от точности методов геологоразведочных работ. Расширение знаний о массопереносе и химических процессах, связанных с образованием отложений, может привести к более безопасному и экономичному использованию методов добычи.

В настоящее время оконтуривание балансовых руд в урановой промышленности осуществляется преимущественно вручную, опираясь на сложившиеся методические рекомендации, или же с использованием геостатистических методов. Тем не менее, используемые методы не учитывают гидродинамические и химические факторы, влияющие на формирование таких отложений. Изучение же механизмов формирования роллфронтов позволило бы выявить определенные закономерности в распределении руды внутри пласта.

Следовательно, эти знания могут способствовать разработке усовершенствованного метода геомоделирования рудного тела, обеспечивающего повышенную точность. В результате можно получить ряд преимуществ, в том числе снижение затрат на разведку и разработку за счет минимизации количества требуемых скважин, повышение точности оценки запасов и повышение степени извлечения в процессе добычи.

На основании изложенных соображений **целью работы** является установление механизмов формирования роллфронтных месторождений с целью построения математических и численных моделей, отражающих их формирование. Кроме того, используя полученные результаты, работа направлена на разработку нового геостатистического метода для точного геомоделирования и оценки запасов таких формаций.

Задачи работы.

- 1) численное воспроизведение эмпирического эксперимента по процессу формирования роллфронтов;
- 2) разработка соответствующей количественной модели механизма формирования месторождений, применимой для различной геометрии пласта;
- 3) предложить технологию получения синтетических месторождений, основанную на численном моделировании гидродинамики и химической кинетики осаждения/растворения минеральных комплексов во время генезиса месторождения;
- 4) предложить новый геостатистический метод с некоторыми модификациями/улучшениями традиционных алгоритмов, учитывая гидродинамический характер формирования инфильтрационных месторождений;
- 5) проверить эффективность традиционных методов, а также предлагаемого метода с точки зрения точности оценки запасов и построения геологической модели.

Методами исследования являются численное моделирование процессов массопереноса, растворения и осаждения минералосодержащих растворов в пористых средах, а также геостатистические методы геомоделирования и подсчета запасов.

Научная новизна проблемы Современные методы построения геологических моделей месторождений инфильтрационного типа редко учитывают гидродинамические и геохимические процессы, влияющие на формирование таких месторождений. Точность построенных геологических моделей сильно зависит от квалификации конкретного эксперта и может сильно различаться от эксперта к эксперту. Оригинальное исследование заключается в численном воспроизведении лабораторного эксперимента с целью расширить понимание механизмов возникновения роллфронта с геологической, гидродинамической и химической точек зрения. Кроме того, эти эксперименты способствовали созданию количественной модели для численного моделирования синтетических месторождений для получения данных, необходимых для проверки различных методов геологического моделирования или для потенциального использования при обучении технологиям на основе

искусственного интеллекта, таким как Physics-Informed Neural Networks. Создан новый геостатистический метод, специально предназначенный для месторождений инфильтрационного типа и учитывающий гидродинамические характеристики, присущие процессам их формирования. Методы вычислительной гидродинамики в рамках предложенного метода привели к повышению точности существующих геостатистических подходов при их реализации для роллфронтных месторождений.

Научные положения, выносимые на защиту.

- 1) Модель массопереноса (reactive transport), имитирующая образование роллфронтных месторождений.
- 2) Цифровой инструмент генерации синтетических роллфронтных месторождений для верификации геостатистических моделей.
- 3) Метод геостатистики на основе линий тока для построения геологической 3D модели месторождения.
- 4) Программный модуль для геологического моделирования и оценки запасов роллфронтных месторождений.

Описание основных результатов исследования.

- 1) На основе лабораторных экспериментов разработана математическая и численная модели формирования месторождений в виде роллфронтов.
- 2) Моделированием выявлено, что вытянутый «язык», присущий роллфронтным урановым месторождениям в песчаниках возникает, вследствие изменения геометрии проницаемых пластов;
- 3) Конвекция и реакции при осаждении и растворении урана являются основными механизмами формирования фронтов, а коэффициент скорости реакции напрямую влияет на вытянутость фронта вдоль направления течения подземных вод.
- 4) Созданы ряд синтетических месторождений для верификации и сравнения текущих и/или новых методов геостатистики;
- 5) Результаты показывают, что с помощью геостатистического метода, учитывающего гидродинамические свойства роллфронтов, можно создать более качественные и количественно более точные геологические модели с точки зрения оценки запасов.

Научная новизна полученных результатов. В результате исследования были разработаны: новая количественная модель генезиса роллфронтных месторождений, и новый геостатистический метод построения геологических моделей. Количественная модель потенциально может использоваться для получения синтетических данных для месторождений, образовавшихся в результате инфильтрационных процессов и окислительно-восстановительных химических реакций, а также для тестирования и проверки любых перспективных методов моделирования, основанных на недетерминированных подходах. Новый геостатистический метод обеспечил более высокую точность геологических моделей месторождений инфильтрационного типа, что приведет к снижению затрат на геологоразведочные работы.

Практическая значимость работы. Модель формирования роллфронтов может использоваться для проверки точности любого метода интерполяции,

применяемого для оконтуривания рудного тела и оценки запасов. Установлена связь между скоростью фильтрации и распространением фронтов через проницаемые среды за счет переотложения. Это может привести к открытию новых месторождений на макроуровне. Новый геостатистический метод существенно точнее традиционных методов, что позволит снизить затраты на геологоразведочные работы. Это будет достигнуто за счет сооружения меньшего количества разведочных скважин, необходимых для построения геологической модели с достаточной точностью.

Программные модули по результатам проведенных исследований внедрены на месторождениях, разрабатываемых дочерними предприятиями АО «НАК «Казатомпром». Автор получит роялти.

Связь работы с государственными научными программами. Части данной диссертационной работы выполнялись в рамках следующих проектов:

– BR05236447 «Интеллектуальные системы управления и принятия решений для разработки месторождений урана и нефти», программно-целевое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2018 – 2020 гг., № ГР 0118РК01275;

– AP08051929 «Исследование механизмов формирования месторождений минералов пластового инфильтрационного типа и разработка высокоточного цифрового метода для оконтуривания рудного тела», грантовое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2020-2022 гг., № ГР 0120РК00058.

Индивидуальный вклад докторанта в подготовку статей. Автор диссертации принимал участие в постановке задачи, разработке методов/моделей, написании кодов, проведении расчетов, а также в написании самих статей во всех ниже приведенных работах. Автор диссертации является первым автором во всех перечисленных трудах.

– Aizhulov, D., Tungatarova, M., & Kaltayev, A. (2022). Streamlines based stochastic methods and reactive transport simulation applied to resource estimation of roll-front uranium deposits exploited by in-situ leaching. *Minerals*, 12(10) doi:10.3390/min12101209.

– Aizhulov, D. Quantitative model of the formation mechanism of the rollfront uranium deposits / D. Aizhulov, N. Shayakhmetov, A. Kaltayev // *Eurasian chemico-technological journal*. – 2018. – № 3. – С. 213-221. (Scopus, SJR 0.157).

– Aizhulov D.Y., Kurmanseiit M.B., Tungatarova M.S. Application of geostatistical methods for reconstruction of lithological and mineralogical structure of uranium deposit by interpolating well data // *Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, Вестник КазНУ, серия математика, механика, информатика* - №3 (91) -2016. -С.53-58.

– Aizhulov, D. 2022 и Tungatarova, M. Сравнение методов геостатистики для моделирования месторождений урана инфильтрационного типа. «Физико-математические науки». 79, 3 (июн. 2022). DOI: <https://doi.org/10.51889/2022-3.1728-7901.401>.

– Aizhulov, D.E. Stochastic modelling of uranium roll-front deposits based on streamline simulation / D.E. Aizhulov, A. Kaltayev // International symposium on uranium raw material for the nuclear fuel cycle: exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM-2018). – Vienna: IAEA, 2018. – С. 17-20.

– Айжулов Д.Е., Калтаев А., Исследование геолого-гидрологических механизмов формирования месторождений в виде ролл-фронтов // Актуальные проблемы урановой промышленности: Материалы VIII-й международной научно-практической конференции, 3-5 августа: Сборник трудов - г. Астана, Республика Казахстан: с. 120-121, 451 стр.

– Айжулов Д.Е. Калтаев А., Құрмансейіт М. Б., Кульджабеков А. Б., Интерполяция и построение 3D модели на основе скважинных данных, Конференция"VII международной научно-методической конференции "Математическое моделирование и информационные технологии в образовании и науке", посвященной к 70-летию профессора Е.Ы. Бидайбекова и 30 летию школьной информатики. 1-2 октября 2015 г. Министерство образования и науки РК. Казахский Национальный педагогический Универси", уровень Международный, КАЗАХСТАН, Алматы, 01.10.2015-02.10.2015.

– Айжулов Д.Е., Калтаев А., The study of rollfront properties and formation mechanisms by examining uranium deposits in Tianshian megaprovince, Конференция"27th Conference Drilling-Oil-Gas", уровень Международный, ПОЛЬША, Krakow, 08.06.2016-10.06.2016

– Aizhulov, D. Stochastic modeling of uranium roll-front deposits based on stream-line simulation / D. Aizhulov, A. Kaltayev // Scientific conference-seminar "Mathematics and Simulation". – Almaty, 2018

– Aizhulov D., Kaltayev A. Stochastic modeling of uranium roll-front deposits based on stream-line simulation / D. Aizhulov, A. Kaltayev // International Scientific and Practical Conference on "Actual Problems of Informatics, Mechanics and Robotics. – Almaty, 2018

Айжулов, Д. Е. Цифровая методика оконтуривания рудного тела пластово-инфильтрационных месторождений на основе линий тока / Д.Е. Айжулов, А. Калтаев // В трудах международной конференции: рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях Индустрии 4.0. – Алматы, 2019. – С. 465 – 467

Кроме того, в рамках диссертации получено 10 авторских свидетельств на различные программные модули, успешно используемые в промышленности. Автор диссертации был основным докладчиком на всех конференциях.