

УДК 622.775

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИННОГО ФОНДА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА, ОТРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПСВ

Бейсекеев Ермек Шортанбаевич^{1,2},
yermek_f-81@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² АО «НАК Казатомпром»,
Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сыганак, 17/12.

Актуальность исследования обусловлена возможностью расширения использования данных индукционного каротажа для пространственного моделирования растекания технологических растворов на гидрогенных месторождениях урана. Регрессионное моделирование опирается на зависимость изменения геоэлектрических свойств пород от изменения их гидрофизических свойств в процессе выщелачивания и может быть использовано для повышения эффективности контроля и прогнозирования процесса выщелачивания.

Цель: обосновать достоверность модели движения технологических растворов на месторождениях пластово-инфильтрационного типа, разработанной на основе метода наименьших квадратов, с использованием в качестве входных данных результатов индукционного каротажа.

Объекты: данные индукционного каротажа по скважинам блока X месторождения Моинкум Чу-Сарысуйской урановорудной провинции.

Методы: индукционное каротажное зондирование, корреляционный и регрессионный анализ с использованием программных сред Excel, Statistica, Curve Editor, Matlab и LibreCad. Аппаратное обеспечение индукционного каротажного зондирования представлено однозондовым трехкатушечным прибором ПИК-50 и ИК-42М.

Результаты. На примере блока месторождения Моинкум Чу-Сарысуйской урановорудной провинции установлена эффективность мониторинга движения технологических растворов посредством данных ИК с использованием регрессионной модели методом наименьших квадратов. Доказана целесообразность применения данных индукционного каротажа для моделирования растекания технологических растворов на примере пластово-инфильтрационного месторождения Моинкум Чу-Сарысуйской урановорудной провинции, и сформирована модель растекания растворов с использованием предложенного алгоритма применения регрессионного моделирования с применением метода наименьших квадратов. Рассчитанные показатели адекватности регрессионной модели, а именно: коэффициент детерминации, дисперсии МНК-оценок, коэффициент Стьюдента, F-критерий, доказывают надежность и достоверность построенной модели изменения эффективной мощности блока в зависимости от изменения электропроводности.

Ключевые слова:

Мониторинг добычи урана, контроль движения растворов при добыче урана, добыча урана на гидрогенных месторождениях, добыча урана методом ПСВ, отработка урановых месторождений пластово-инфильтрационного типа, доразведка урановых месторождений.

Введение

На современном этапе добычи урана преобладают месторождения пластово-инфильтрационного типа, для которых наиболее распространенным и эффективным способом отработки месторождений является подземное скважинное выщелачивание (ПСВ). Данный способ справедливо считается наиболее эффективным с точки зрения извлечения урана и щадящим по отношению к окружающей экосистеме. Но, как и любые другие геотехнические решения, способ подземного скважинного выщелачивания не лишен определенных недостатков. В частности, технологические условия реализации данного метода предполагают отработку урановых руд через систему скважин, по которым происходит подача выщелачивающих растворов и вывод на поверхность продуктивных растворов. Это предполагает ведение мониторинга за растеканием выщелачивающих растворов, который

связан с ограниченностью контроля над движением технологического раствора, сложностью непосредственного наблюдения за ходом и результатами технологического процесса, сложностью забора керна, что обусловлено особенностями подземного скважинного выщелачивания, предполагающего непрерывность технологического цикла подачи и вывода технологических растворов. На современном этапе промышленное освоение рудоносных горизонтов посредством подземного скважинного выщелачивания, как и любое ресурсоемкое производство, в процессе мониторинга опирается, с одной стороны, на передовые геофизические методы исследования скважин, с другой – на совокупность программного и методологического обеспечения аналитической и прогностической работы с полученными данными.

Соответственно, в последнее время возрастает интерес к математическим методам моделирования и

прогнозирования движения растворов, а также возможностям применения данных геофизических исследований скважин для их реализации [1, 2].

Индукционное каротажное зондирование выступает в числе достаточно эффективных методов исследования скважинного пространства, пересекающего рудоносную толщу. В силу разности в кажущейся удельной электропроводности между насыщенным раствором породой и породой, не охваченной выщелачиванием, индукционный метод, на наш взгляд, выступает перспективным с точки зрения мониторинга движения технологических растворов и прогнозирования их растекания. Однако при всей надежности и достоверности метода в условиях отработки урановородных залежей подземным скважинным выщелачиванием его эффективность в качестве средства мониторинга во многом определена выбором методологических основ дальнейшей аналитической работы с полученными каротажными данными.

При учете активного процесса внедрения информационных геотехнических систем моделирования возрастает потребность в выборе оптимальной исходной математической модели, описывающей базовые физические и химические закономерности, определяющие движение растворов. Кроме того, эффективность моделирования обеспечивается не только выбором математического аппарата, но и выбором исходных данных об особенностях отрабатываемого участка, что обеспечивает достоверность результатов и существенно снижает эксплуатационные затраты в процессе разработки.

В рамках представленного исследования выдвинута гипотеза о целесообразности применения индукционного каротажа как основополагающего источника данных для мониторинга растекания технологических растворов с применением регрессионной модели на основе метода наименьших квадратов в условиях отработки урановых месторождений подземным скважинным выщелачиванием.

В ходе проверки выдвинутой гипотезы были реализованы следующие этапы исследования:

- 1) обоснована целесообразность применения модели на основе метода наименьших квадратов для моделирования движения технологических растворов;
- 2) разработана факторная регрессионная модель, предназначенная для мониторинга и прогнозирования растекания растворов в зависимости от проницаемости пород по данным индукционного каротажа;
- 3) представлены результаты апробации модели на примере месторождения Моинкум Чу-Сарысуйской урановородной провинции.

Методология исследования

Методы исследования включают математические методы: метод наименьших квадратов (МНК), факторный анализ, и геофизические методы: индукционное каротажное зондирование и другие геофизические методы исследования, использованные для построения модели. МНК реализован как частный метод регрессионного многофакторного линейного моделирования [3].

Данный математический конструкт для моделирования выбран для демонстрации возможностей использования данных по индукционному каротажу и отвечает основным критериям эффективности:

- не требователен к программному обеспечению;
- обладает достаточным уровнем надежности;
- существует возможность проверки адекватности модели;
- позволяет оценить качественные показатели взаимосвязи геофизических, литологических, гидрологических и прочих факторов, оказывающих влияние на ход и результат выщелачивания;
- подходит как для мониторинга, так и для прогнозирования движения технологических растворов;
- позволяет осуществлять оценку и прогнозирование в условиях недостаточности данных по скважинному фонду, что достаточно частое явление, обусловленное спецификой непрерывного цикла добычи в условиях разработки урановородных месторождений [4, 5].

Для моделирования использовались результаты индукционного каротажа по выбранным скважинам на блоке X месторождения Моинкум. Критерием выбора послужило наличие информации по применению индукционного каротажа на различных временных интервалах, то есть достаточность исходных данных, требуемая для составления массива данных для моделирования. В целом исследованием было охвачено 9 скважин. При исследовании принято допущение, что откачные и закачные скважины равнодебитные, так как в условиях гексагональной схемы расположения скважин данное допущение является классическим.

Инструментальное обеспечение обработки данных составили программные среды Excel, Statistica, Curve Editor, Matlab и LibreCad. Наличие входных данных индукционного каротажного зондирования в рамках исследования обеспечено однозондовым трехкатушечным прибором ИК-42М с размером между приемной и излучающей катушкой 0,5 м и прибором ПИК-50 с рабочей частотой 150 кГц и разрешающей способностью в пределах 0–2000 мСим/м. Каротажные исследования получены с использованием цифровой каротажной станции «Вулкан-3» [6].

Результаты исследования

Объект исследования расположен в пределах Чу-Сарысуйской урановородной провинции и характеризуется залеганием рудоносных тел в толще кайнозойско-мезозойского осадконакопления (рис. 1).

В то же время само месторождение Моинкум расположено в зоне малоамплитудных поднятий допалеозой-ордовикских геосинклинальных и девонских орогенных комплексных породобразований.

Имеются данные по результатам двух мониторингов по индукционному каротажу в комплексе с другими геофизическими исследованиями скважин, что позволяет сформировать входные данные для построения регрессионной модели на основании изменений в результатах первого и последнего мониторинга [8, 9].

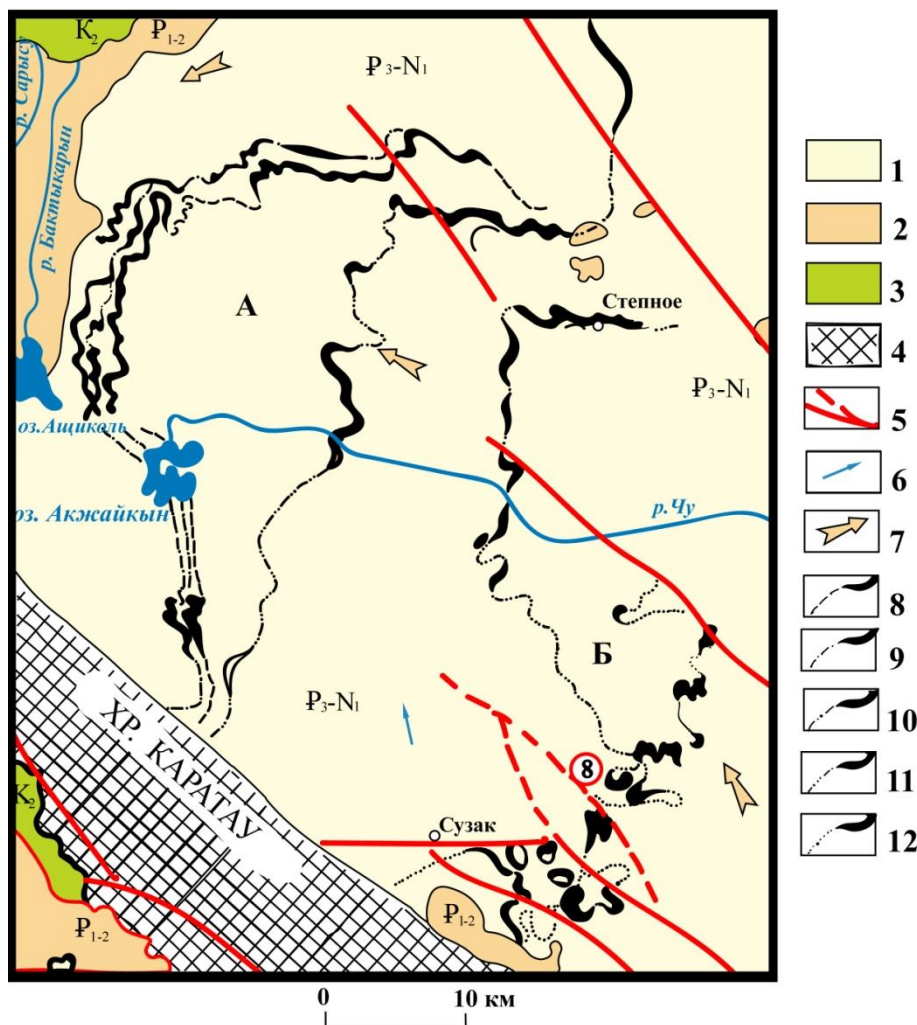


Рис. 1. Геологическая карта Чу-Сарысуйской урановорудной провинции и местоположение месторождения Моинкум [7]. Регионы: А) Инкай-Мынкудукский, Б) Уванас-Канжуганский; отложения: 1) глины, алевролиты, пески олигоцен-миоцена, 2) глины, пески палеоцен-эоцена, 3) пески, глины, алевролиты, гравийники верхнего мела; 4) домезозойский фундамент; 5) разрывные нарушения; направления движения пластовых вод в отложениях: 6) эоцена, 7) верхнего мела; границы выклинивания зон пластового окисления: 8) турон (мынкудукский горизонт), 9) нижний сенон (инкудукский горизонт), 10) верхний сенон (жалпакский горизонт), 11) верхний палеоцен, 12) нижний эоцен; @ – Месторождение Моинкум

Fig. 1. Geological map of the Chu-Sarysu uranium ore province and the location of the Moinkum deposit [7]. Regions: A) Inkai-Mynkuduk, B) Uvanas-Kanzhugan; deposits: 1) clays, siltstones, sands of the Oligocene–Miocene; 2) clays, sands of the Paleocene–Eocene; 3) sands, clays, siltstones, Upper Cretaceous gravels; 4) pre-Mesozoic basement; 5) discontinuous violations; directions of formation water movement in sediments: 6) Eocene, 7) Upper Cretaceous; boundaries of outcrop zones of formation oxidation: 8) Turonian (Mynkuduk Horizon), 9) Lower Senon (Inkuduk Horizon), 10) Upper Senon (Zhalpak Horizon), 11) Upper Paleocene, 12) Lower Eocene; @ – Moinkum deposit

При выборе параметров моделирования исходили из следующего:

- 1) выбор входных данных для моделирования;
- 2) выбор математического аппарата моделирования;
- 3) проведение сопоставительной оценки и анализа достоверности модели.

Вне зависимости от того, автоматизирована ли система моделирования, входными данными для построения модели и весомым фактором обеспечения ее надежности и достоверности служат данные геофизических исследований скважин. В условиях отработки пластово-инфильтрационных месторождений перечень и частота комплекса геофизических исследований скважин может варьировать в зависимости от ис-

ходных петрофизикохимических, литологических и морфологических особенностей участка.

Так, пластово-инфильтрационные месторождения, рудоносные толщи которых сложены песчаниковыми осадочными отложениями, проявляют существенное разнообразие по своим литолого-фациальным характеристикам в силу поэтапного влияния на осадконакопление гидрологических, климатических факторов, в том числе на стадиях палеогенеза [10].

Однако в числе методов геофизического исследования отмечаются электромагнитные методы, зарекомендовавшие себя как высоко информативные, в частности метод индукционного каротажа. Более того, в отношении данных о строении скважин и движениях

технологических растворов индукционный каротаж отличается высокой степенью информативности и достоверности. Соответственно, при обеспечении достаточности данных и их достоверности в отношении строения рудного тела и рудовмещающих толщ существует гипотетическая возможность построения математического алгоритма, облегчающего процесс моделирования и не требующего дополнительного дорогостоящего и сложного компонентного программного обеспечения, кадровых и временных затрат.

Поскольку сущность технологического процесса отработки месторождений подземным скважинным выщелачиванием и движение растворов можно описать с точки зрения факторов, подчиненных логике физических законов и закономерностей, мы полагаем, что факторный анализ проявляет высокую степень достоверности, поскольку наличие непреложных закономерностей обеспечивает и наличие устойчивых корреляционных связей. Это в свою очередь предполагает достаточную универсальность факторной модели [11, 12].

Кроме того, наличие закономерностей и корреляционных взаимосвязей процесса выщелачивания предполагает, что процесс является динамическим и закономерности и их последствия имеют статистические параметры, обусловленные факторами взаимовлияния петрофизических и фильтрационных свойств [13].

В числе математического описания возможных условий и следствий процесса с данными параметрами можно выделить МНК. Данный метод является частным методом реализации регрессионного анализа – весьма недооцененного метода прогнозирования процессов, характеризующихся наличием взаимосвязей известных и неизвестных параметров. Регрессионный анализ в последние десятилетия хорошо зарекомендовал себя как методологическая основа для прогнозирования в рудном деле. В частности, такие методы, как нейросети, DATA-mining, дерево решений, применяемые для анализа и оптимизации в рудном деле, реализуются методом регрессионной статистики с применением МНК [14, 15].

Суть МНК заключается в решении системы линейных уравнений путем нахождения коэффициентов линейной зависимости. Наименьшая сумма квадратов отклонений экспериментальных данных от заданных линейных значений при данных значениях переменных характеризует искомые значения для моделирования [16].

Моделирование процесса выщелачивания и, в частности, движения жидкостей может быть использовано для описания и прогнозирования различных аспектов технологического процесса и его результативности как система взаимосвязанных процессов, описываемых линейными и нелинейными уравнениями регрессии [17]. Наибольший исследовательский интерес представляет возможность аппроксимации моделей линейной зависимости МНК с последующим интерполированием и экстраполированием с целью анализа и оптимизации процесса выщелачивания. Также весьма важно, что регрессионное моделирова-

ние позволяет рассматривать процесс выщелачивания как стационарный и нестационарный, что важно, поскольку ряд рассчитываемых процессов (например, изменения проницаемости пород на границе закисления) протекает, с одной стороны, крайне неравномерно, и с другой – выражается малыми величинами. При этом регрессионное моделирование может быть полезно и в том случае, если имеются разрозненные либо недостаточные данные по керновым пробам, что в целом характерно для процесса отработки урановорудных месторождений. Отсутствие или малая репрезентативности информации по керну может быть компенсирована коррелированием с данными геофизических исследований, а также при помощи выявления закономерностей взаимосвязи между электрофациальной и литологической характеристикой околоскважинного пространства.

В условиях пластово-инфильтрационных месторождений с высокой проницаемостью и с учетом проблематики проведения контроля движения растворов в условиях подземного скважинного выщелачивания сернокислым раствором риск техногенного образования регенерируемых урановых залежей существенно высок [18]. Это обуславливает достаточно перспективный научно-прикладной характер проблемы мониторинга растекания технологических растворов с использованием методов математического моделирования.

Ниже представлен опыт применения аппроксимированной по МНК регрессионной модели миграции технологических (обогащенных) растворов.

Для построения модели растекания растворов решающее значение имеет скорость фильтрации пород, позволяющая выявить область растекания и отследить приблизительный темп вторичного отложения в процессе миграции. В прямой зависимости от данного показателя находится степень насыщения пород технологическим раствором [19]. В то же время диапазон приблизительных значений коэффициента фильтрации определяется петрофизическими свойствами, различными для пород, слагающих отработываемую толщу [20].

На диаграмме иллюстрируется зависимость скорости фильтрации от проницаемости и удельной кажущейся электропроводности по данным технологического блока X месторождения Моинкум (рис. 2).

Рассматриваемая модель демонстрирует, что в условиях инфильтрационного режима урановых месторождений, отработываемых подземным скважинным выщелачиванием, метод индукционного каротажа достаточно достоверен в качестве метода мониторинга, поскольку определяется прямой зависимостью между изменением петрофизических свойств в ходе отработки месторождения и характером растекания растворов [21–23]. Следовательно, эффективна возможность применения данных индукционного каротажа в качестве базы для моделирования движения технологических растворов на урановых месторождениях пластово-инфильтрационного типа, для оптимизации процесса моделирования посредством регрессионного анализа. Основным преимуществом

данных геофизических исследований в качестве исходных для моделирования является учет особенностей движения растворов непосредственно в скважине, в то время как большинство программных про-

дуктов для моделирования опираются на лабораторные данные, которые могут повлечь погрешность применительно к параметрам растекания растворов в условиях среды скважинного пространства [24].

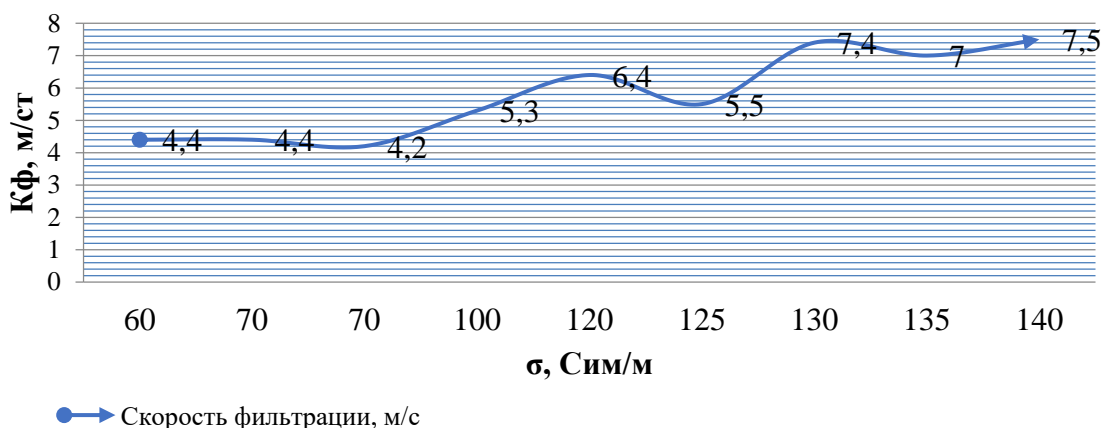


Рис. 2. Кривая зависимости скорости фильтрации, коэффициента фильтрации и кажущейся удельной электропроводности

Fig. 2. Curve of dependence of filtration rate, filtration coefficient and conductivity

В научной литературе описывается возможность реализации регрессионной модели с помощью метода наименьших квадратов, который характеризуется как возможность определения координат объекта по минимальному набору известных параметров [25]. Как уже было отмечено ранее, подбор аппроксимирующих методов и предварительная оценка тесноты зависимости выбранных для моделирования данных позволяет сгладить недостаточность и неполноту данных, а также косвенно определить степень их достоверности по сходимости результатов и соответствию взаимосвязей физическим законам. В нашем случае, с учетом вышеназванных зависимостей, известным параметром выступают изменения данных по индукционному каротажу на интервале закисления, до и после. Причем искомым значением являются параметры растекания, выраженные изменением эффективной мощности блока ($M_{эф}$). Ниже приведены данные для математического прогнозирования растекания раствора по данным блока X [9, 26].

Таблица 1. Данные для моделирования растекания раствора блока X месторождения Моинкум

Table 1. Modeling data of solution spreading for block X of the Moinkum deposit

| № скважины блока Borehole number | Отклонение средней электропроводности, Сим/м Deviation of median conductivity, Sim/m | Отклонение эффективной мощности блока ($M_{эф}$), м Deviation of unit effective power (P_{ef}), m |
|-------------------------------------|---|--|
| 1 | 21,13 | 6,5 |
| 2 | 21,3 | 6,6 |
| 3 | 20,61 | 6,7 |
| 4 | 18,64 | 6,5 |
| 5 | 17,58 | 6,7 |
| 6 | 16,57 | 6,6 |
| 7 | 15,76 | 6,8 |
| 8 | 15,3 | 10,1 |
| 9 | 13,64 | 6,8 |

Как видно по данным, представленным в табл. 1, отклонения эффективной мощности блока сопровождаются пропорциональным и довольно видимым изменением кажущейся удельной электропроводности пород, охваченных выщелачиванием. Это позволило получить эмпирические данные для проведения моделирования.

Произведенное моделирование характеризуется как эксперимент, направленный на выявление закономерностей и возможностей контроля растекания растворов в пределах рудовмещающей толщи по данным индукционного каротажа.

В общем виде уравнение регрессии, используемое в соответствии с алгоритмом пассивного эксперимента, представлено следующим образом (1):

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n, b_1, b_2, \dots, b_n). \quad (1)$$

В общем виде уравнение линейной регрессии является оценочным и, соответственно, имеет следующий вид (2):

$$y = bx + a + \varepsilon, \quad (2)$$

где a и b – оценки параметров α и β регрессионной модели; ε – случайная ошибка.

Для оценки параметров α и β использован МНК, позволивший оценить наиболее точно состоятельность выдвинутой гипотезы (наличие линейной связи параметров модели) [27, 28].

Для этого были определены предпосылки относительно случайного члена (ε) и независимой переменной (x) по формуле (3):

$$S = \sum (y_i - y_i^*)^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Система нормальных уравнений по МНК выглядит следующим образом (4):

$$\begin{aligned} a \cdot n + b \cdot \sum x &= \sum y, \\ a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 &= \sum xy. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с входными данными система имеет вид (5):

$$\begin{aligned} 12a + 160,53 \cdot b &= 63,3, \\ 160,53 \cdot a + 2924,527 \cdot b &= 1118,77. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы уравнений методом алгебраического сложения позволило обнаружить, что полученные эмпирические оценочные коэффициенты регрессии имеют следующие значения: $a=0,5927$; $b=0,35$.

Таким образом, получено уравнение регрессии вида (6):

$$y = 0,35x + 0,5927. \quad (6)$$

Ниже приведен график зависимости изменения эффективной мощности блока ($M_{эф}$) и удельной электропроводности (σ) по данным индукционного каротажа (рис. 3).

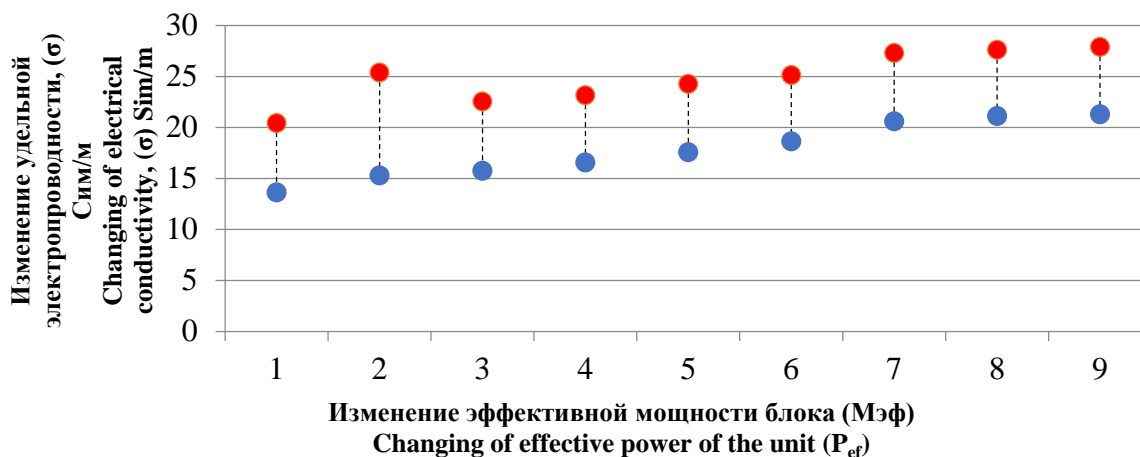


Рис. 3. Визуализация зависимости между изменением эффективной мощности блока и изменением удельной электропроводности

Fig. 3. Visualization of dependence between the change in the unit effective power and the change in electrical conductivity

Таблица 2. Параметры полученного уравнения регрессии

Table 2. Parameters of the resulting regression equation

| Наименование параметра Parameter name | Значение параметра Parameter value |
|---|---------------------------------------|
| Выборочные средние/Sample means | |
| x | 13,378 |
| y | 5,275 |
| xy | 93,231 |
| Выборочные дисперсии/Sample variances | |
| S2(x) | 64,75 |
| S2(y) | 10,17 |
| Среднеквадратические отклонения/Standard deviations | |
| S(x) | 8,047 |
| S(y) | 3,188 |
| Ковариация/Covariance | 22,66 |
| Коэффициент корреляции Correlation coefficient | 0,883 |
| Коэффициент детерминации Determination coefficient | 0,8 |
| Стандартная ошибка регрессии Regression standard error | 1,6 |
| Критерий Стьюдента Student's criterion | 5,96 > 2,634 |
| Доверительные интервалы Confidence intervals | 95 % |
| F-критерий/F-criterion | 95,1949 > 4,96 |

Вышеприведенный график демонстрирует наличие прямой и достаточно сильной взаимосвязи между изменением эффективной мощности блока и изменением удельной электропроводности, что обусловлено изменением, прежде всего, фильтрационных свойств пород под воздействием раствора.

В условиях однородной и хорошо проницаемой рудоносной толщи растекание раствора может способствовать вторичному техногенному вертикально-

му рудогенезу, что снижает эффективность выщелачивания и увеличивает затраты на доразведку [29, 30]. Прогнозирование возможностей растекания породы по данным индукционного каротажа позволяет, сопоставив имеющиеся данные по технологическому блоку, данные по разведочным и наблюдательным скважинам, сформировать прогноз по возможному диапазону глубин растекания раствора.

Для оценки достоверности результатов и надежности модели произведен расчет и анализ параметров уравнения регрессии (табл. 2).

Вышеназванные параметры модели выявляют следующее:

1. Параметры оценки по МНК указывают на статистическую надежность модели.
2. Статистические параметры модели характеризуют полученные данные по модели как статистически значимые.
3. Найденный коэффициент корреляции указывает на наличие прямой и сильной зависимости между изменением данных по кажущейся удельной электропроводности, по индукционному каротажу и изменению эффективной мощности блока ($M_{эф}$).
4. Коэффициент детерминации указывает на то, что в 80 % случаев изменение эффективной мощности блока ($M_{эф}$) может быть описано изменением удельной электропроводности;
5. На основании построенной регрессионной модели можно сделать вывод, что изменение показателя кажущейся удельной электропроводности на 1 Сим/м свидетельствует о пропорциональном увеличении эффективной мощности блока ($M_{эф}$) на 0,35 м.

Исходя из полученных данных о наличии прямой зависимости удельной электропроводности от изменения свойств породы (а именно, проницаемости), была уточнена прогнозная модель растекания технологического раствора на технологическом блоке X месторождения Моинкум.

Ниже представлены исходные данные по технологическому блоку и рассчитанные на их основании параметры растекания раствора по принятому в компании АО «Казатомпром» расчету растекания в пределах двух метров вверх и шести метров вниз (по предельным значениям). Данные, полученные с применением стандартного используемого в АО «НАК Казатомпром» метода прогнозирования растекания раствора, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Исходные параметры для расчета растекания технологического раствора

Table 3. Input parameters for calculating the spreading of the technological solution

| п/п скважины. Borehole no. | $M_{\text{эф}}$ исходная, м $P_{\text{эф}}$ initial, m | Длина фильтра по текущим данным индукционного каротажа Filter length according to current induction logging data | σ верхней границы σ of top border | σ нижней границы σ of bottom border | Глубина верхней границы Top border depth | Глубина нижней границы Bottom border depth |
|-------------------------------|---|---|--|--|---|---|
| 1 | 11,222 | 6,4 | 25 | 70 | 175,4 | 184,7 |
| 2 | 13,575 | 7,9 | 20 | 100 | 183,2 | 196,5 |
| 3 | 11,946 | 6,8 | 20 | 125 | 185,5 | 194,1 |
| 4 | 10,86 | 6,4 | 20 | 120 | 191,2 | 203,3 |
| 5 | 10,86 | 6,3 | 20 | 70 | 184,7 | 196,7 |
| 6 | 12,127 | 7 | 30 | 60 | 184,4 | 196,9 |
| 7 | 11,222 | 6,9 | 30 | 140 | 184,3 | 196,5 |
| 8 | 10,86 | 6,3 | 20 | 130 | 192,8 | 205,1 |
| 9 | 10,86 | 6,5 | 30 | 135 | 185,9 | 198,4 |

Прогнозирование стандартным методом не учитывает различия в фильтрационных свойствах породы, которые оказывают влияние как на электрофациальную картину, так и на динамику изменения нижележащих прослоев под воздействием гидродинамического режима работы скважины [31, 32]. Однако данный метод прост и универсален, так как базируется на усредненных эмпирических данных, чем можно объяснить его широкое распространение.

Однако разработанная методика позволяет учитывать исходные литологические и петрофизические особенности, а при необходимости может быть доработана и для учета других характеристик исходных условий отработки и технологического процесса.

Ниже представлены параметры растекания технологического раствора, рассчитанные на основании данных по индукционному каротажу с использованием полученных в ходе моделирования закономерностей изменения кажущейся удельной электропроводности от изменения проницаемости (табл. 4).

Полученные данные развернутого анализа совпадают с 80 % вероятностью с данными разработанной регрессионной модели и в целом коррелируют с ней,

что свидетельствует о достоверности найденной путем регрессионного анализа взаимосвязи. По сути представленные выше данные являются развернутой демонстрацией представленных в модели взаимосвязей в разрезе скважинного фонда технологического блока X месторождения Моинкум. В условиях других месторождений достоверность может варьироваться, но несущественно, поскольку разработанная модель опирается на физически обоснованные взаимосвязи между свойствами и процессами отработки урановорудной залежи.

Таблица 4. Расчитанные параметры растекания технологического раствора на основании выявленной регрессионной зависимости

Table 4. Regression dependence based output parameters of the spreading of technological solution

| п/п скв./Borehole, No | σ после закисления, Сим/м/ σ after leaching, Sim/m | | $\Delta\sigma$, Сим/м (Sim/m) | | Δ , м (m) | | Глубина растекания, м Spreading depth, m | | $M_{\text{эф}}$ с уточнением, м $P_{\text{эф}}$ with clarification, m |
|-----------------------|--|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|--|-----------|---|
| | верхней границы top border | нижней границы bottom border | верхней границы top border | нижней границы bottom border | верхней границы top border | нижней границы bottom border | вверх up | вниз down | |
| 1 | 35 | 85 | 10 | 15 | 3,5 | 5,25 | 171,9 | 189,95 | 18,05 |
| 2 | 30 | 110 | 10 | 10 | 3,5 | 3,5 | 179,7 | 200 | 20,3 |
| 3 | 35 | 145 | 15 | 20 | 5,25 | 7 | 180,25 | 201,1 | 20,85 |
| 4 | 30 | 130 | 10 | 10 | 3,5 | 3,5 | 187,7 | 206,8 | 19,1 |
| 5 | 30 | 90 | 10 | 20 | 3,5 | 7 | 181,2 | 203,7 | 22,5 |
| 6 | 35 | 70 | 5 | 10 | 1,75 | 3,5 | 182,65 | 200,4 | 17,75 |
| 7 | 35 | 150 | 5 | 10 | 1,75 | 3,5 | 182,55 | 200 | 17,45 |
| 8 | 30 | 145 | 10 | 15 | 3,5 | 5,25 | 189,3 | 210,35 | 21,05 |
| 9 | 40 | 150 | 10 | 15 | 3,5 | 5,25 | 182,4 | 203,65 | 21,25 |

На основании полученных в ходе моделирования данных в LibreCad была построена карта прогноза растекания растворов на технологическом блоке X месторождения Моинкум. Как показывает практика, от правильности выбранного математического аппарата, описывающего взаимосвязи между условиями режима выщелачивания, зависит точность оценки масштабов растекания технологического раствора, что, в свою очередь, дает возможность управлять оптимизацией процесса добычи [33]. С учетом однородной высокопроницаемой среды месторождения Моинкум модельные данные позволяют сформировать прогноз по возможным интервалам вторичного оруденения вследствие массопереноса. На схеме видно, что зона растекания технологического раствора вниз достаточно обширна, что дает основания, в купе с данными о высокой проницаемости пород, граничащих с зоной закисления, предположить углубление области растекания вниз (рис. 3).

На рис. 3 пунктирной линией отмечена зона растекания раствора согласно произведенным расчетам регрессионной модели. Данная карта иллюстрирует величину отклонения рассчитанной изначально мощности блока и величину прогнозируемого растекания

раствора в процессе активной эксплуатации. Ниже представлены отклонения по $M_{эф}$, рассчитанной на

основе результатов прогнозной модели, и $M_{эф}$, рассчитанной стандартным способом (табл. 5).

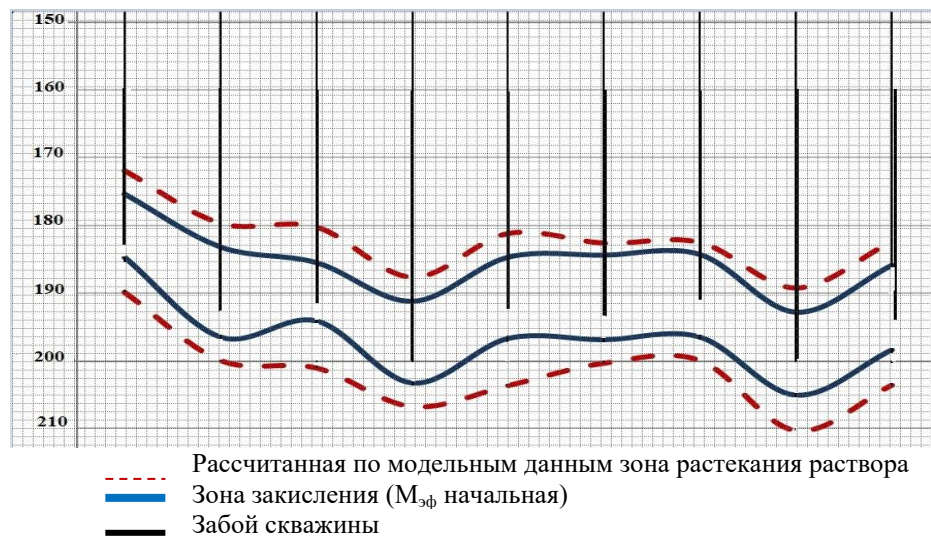


Рис. 3. Схема растекания растворов на технологическом блоке X профиля XX месторождения Моинкум

Fig. 3. Map of technological solutions spreading on technological unit X of the XX profile of the Moinkum uranium deposit

Таблица 5. Сопоставление модельных и фактических отклонений $M_{эф}$

Table 5. Comparison of model and actual deviations of effective power of unit

| п/п скв. Borehole no. | $\Delta M_{эф}, м / \Delta P_{эф}, м$ | |
|-----------------------|---------------------------------------|---|
| | по модели according to the model | по данным индукционного каротажа according to induction logging |
| 1 | 6,828 | 6,5 |
| 2 | 6,725 | 6,6 |
| 3 | 8,904 | 6,7 |
| 4 | 8,24 | 6,5 |
| 5 | 11,64 | 6,7 |
| 6 | 5,623 | 6,6 |
| 7 | 6,228 | 6,8 |
| 8 | 10,19 | 10,1 |
| 9 | 10,39 | 6,8 |

Данные, выступавшие входными для реализации моделирования по отклонениям $M_{эф}$, получены в ходе индукционного каротажного зондирования до и после закисления. Сопоставление с данными, полученными на основании модельных взаимосвязей, демонстрирует достаточно точные значения модели, что доказывает эффективность предложенного алгоритма прогнозирования растекания растворов в рудовмещающей толще.

Следует отметить, что области с высоким значением кажущейся удельной электропроводности с глубиной интервала свыше 12 м, выявленные в ходе моделирования, являются точками потенциального массопереноса и требуют особо тщательного контроля. В условиях однородного и высокопроницаемого текстурно-структурного типа, как в продемонстрированной выше рудоносной толще месторождения Моинкум, особенный риск представляет залегание рудоносного тела над разнородными увлажненными и обводненными песками и илисто-песчаными отложениями. С одной стороны, такая литографическая осо-

бенность может способствовать вымыванию части пород раствором, что усложняет дальнейшую выработку, но достаточно часто встречается на месторождениях пластово-инфильтрационного типа. С другой стороны, предложенная модель позволяет своевременно обнаружить участки с риском массопереноса и оптимизировать режим выщелачивания для минимизации эксплуатационных потерь и экологических рисков.

Данные отклонения позволят скорректировать как рабочий режим выщелачивания, так и учетные данные по промышленно значимым остаточным мощностям, а также спрогнозировать зоны техногенного рудогенеза.

Таким образом, полученные эмпирические данные свидетельствуют о возможности использования индукционного каротажа как метода мониторинга и прогнозирования растекания растворов в условиях высокопроницаемых сред.

Заключение

Мониторинг движения технологических растворов является достаточно сложной с технической точки зрения задачей в условиях обработки урановорудных месторождений методом подземного скважинного выщелачивания. В то же время технологический процесс обработки ураноносных толщ на пластово-инфильтрационных месторождениях с высокой проницаемостью рудовмещающих и околорудных пород предполагает необходимость контроля изменения эффективной мощности блока вследствие возможности массопереноса под воздействием технологических растворов.

Данные индукционного каротажа в условиях высокопроницаемых сред на месторождениях, обрабатываемых методом подземного скважинного выщелачивания, являются высокоинформативным источни-

ком данных для статистического анализа и моделирования изменений эффективной мощности залежей.

В случае однородности по кажущейся электропроводности и относительной мощности рудовмещающей толщи, в силу изменения проницаемости и, соответственно, удельной электропроводности под воздействием технологического раствора, данные индукционного каротажа достаточно хорошо дифференцируют области, охваченные процессом выщелачивания.

С учетом полученных результатов использование регрессионного моделирования можно рекомендовать в качестве статистического метода прогнозирования увеличения эффективной мощности блока в результате подземного скважинного выщелачивания. Ниже представлен рекомендуемый алгоритм использования регрессионной модели для прогнозирования изменения эффективной мощности блока с использованием данных индукционного каротажа (рис. 4).

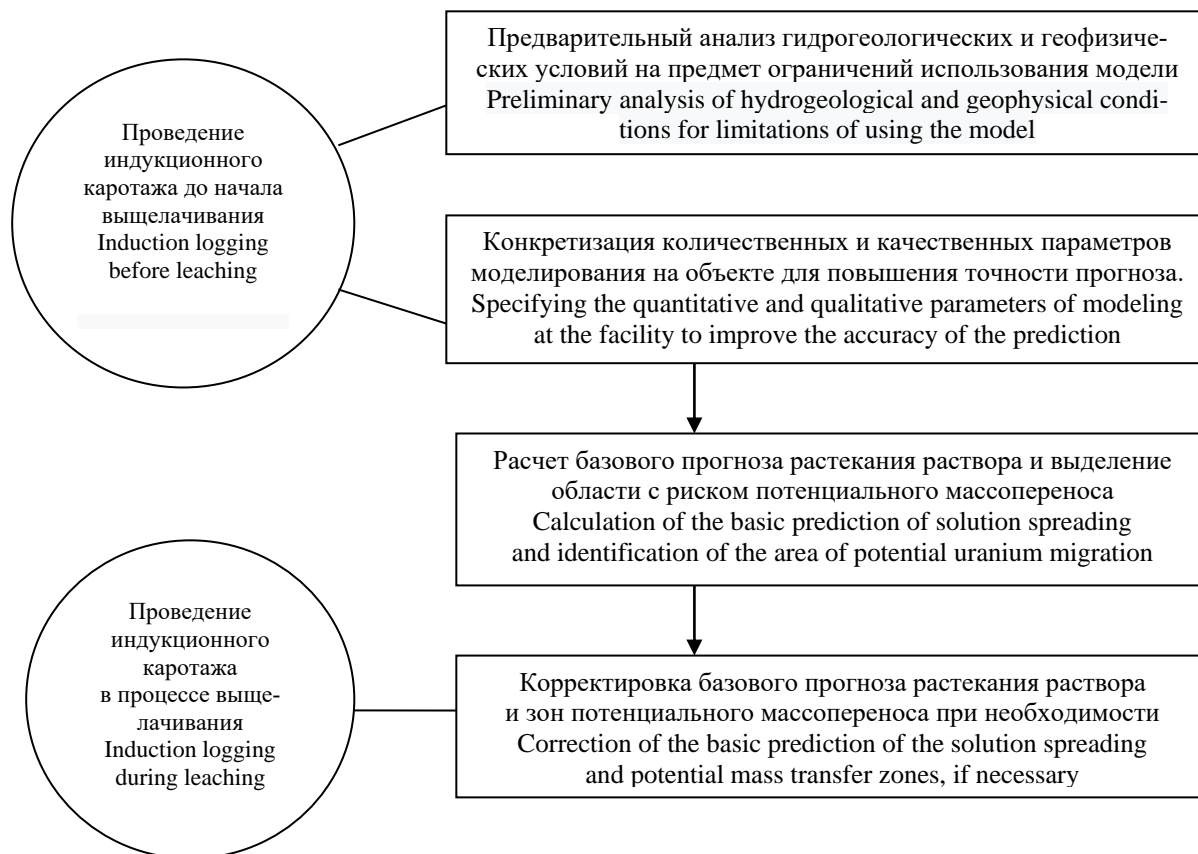


Рис. 4. Рекомендуемый алгоритм применения регрессионной модели пространственного распределения электропроводности для прогнозирования изменения мощности блока в результате выщелачивания

Fig. 4. Recommended algorithm for applying the regression model of spatial distribution of electrical conductivity to predict the changes of unit effective power due to leaching

Ограничением использования входных данных по изменениям электропроводности с использованием регрессионного анализа и оценки методом наименьших квадратов служит необходимость полноты и достаточности входных данных. Данное условие обеспечивается наличием регулярного применения индукционного каротажа, что повышает достоверность и точность контроля, позволяя оценивать динамику изменения эффективной мощности блока. Ограничением предложенного алгоритма прогнозирования растекания раствора выступают условия, препятствующие применению индукционного метода: значения давления, температур и электрического сопротивления пород, запредельные или граничные для используемой в каждом конкретном случае каротажной аппаратуры.

Предложенная модель и алгоритм ее использования не претендуют на всеохватывающий и инновационный характер. Но результаты апробации на месторождении Моинкум доказывают, что предложенная регрессионная модель с применением метода наименьших квадратов учитывает взаимосвязи факторов проницаемости и величины их пространственного изменения под действием технологического раствора, что расширяет возможности прогноза потенциальной зоны растекания в процессе выщелачивания.

Авторы выражают благодарность коллективу Горнорудного департамента АО «НАК Казатомпром» за содействие в предоставлении материалов по геофизическим и лабораторным исследованиям скважинного фонда месторождения Моинкум.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геолого-математическая модель пласта-коллектора ПГЗ ЖРО филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» / В.В. Данилов, А.Д. Истомина, О.Н. Кокорев, М.Д. Носков, А.А. Чеглоков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 12-2. – С. 19–24.
2. Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Кузеванов К.К. Гидродинамическое обоснование изменений гидрогеохимических условий Стржевского месторождения подземных вод (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 204–220.
3. Bassiouni Z. Geophysics and geosequestration. P. II. C. 11: Well Logging. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – P. 181–194.
4. Fox Jr. J. Applied regression analysis and generalized linear models. – Thousand Oaks: SAGE Publishing, 2015. – 276 p.
5. Montgomery D.C., Vining G.G., Peck E.A. Introduction to linear regression analysis. – Hoboken: John Wiley & Sons Limited, 2019. – 328 p.
6. Технологический регламент проведения геофизических исследований. – Нур-Султан: АО «НАК Казатомпром», 2021. – 21 с.
7. Машковцев Г.А. Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ – М.: Изд-во ВИМС, 2008. – 72 с.
8. Язиков Е.Г., Манабаева М.Т., Ефремов А.А. Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии. – Алматы: Волковгеология, 2012. – 160 с.
9. Данные по комплексному геофизическому исследованию скважинного фонда тех. блока X месторождения Моинкум/ под ред. В.О. Курочкина. – Нур-Султан: АО НАК Казатомпром, 2019. – 76 с.
10. Characteristics of sandstone-type uranium mineralization in the Hangjinqi region of the northeastern Ordos Basin: clues from clay mineral studies / Q. Zhu, J. Li, G. Li, S. Wen, R. Yu, C. Tang, X. Feng, X. Liu // Ore Geology Reviews. – 2022. – № 11. – P. 215–277.
11. Ушева Н.В. Математическое моделирование химико-технологических процессов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
12. Прогноз литологического состава баженовской свиты на основе комплексной интерпретации геологических и геофизических материалов / М.А. Фомин., Е.А. Костырева, С.В. Рыжкова, Р.М. Саитов, И.С. Сотнич, В.Г. Эдер // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 154–167.
13. Hajian A., Styles P. Application of soft computing and intelligent methods in geophysics. – New York: Springer, 2018. – 543 p.
14. Chang X.-W., Kang P., Tittley-Peloquin D. Error bounds for computed least squares estimators // Linear Algebra and its Applications. – 2020. – № 1. – P. 28–42.
15. Application of geo-statistics in calculation of a uranium deposit / V. Yun, Z.P. Fei, Z. Jing, K.W. Hao, L.X. Cui, C. Ke, S. Lu, L.L. Ying // E3S Web of Conferences № 206. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020601005> (дата обращения 03.02.2022).
16. Темирханова Р., Сыздыкова М. Подсчет стволовых запасов урана по данным гамма-каротажа в программе GIK // Журнал «Промышленность Казахстана». – 2018. – № 6. – С. 79–80.
17. Алибаева К.А. Численное исследование путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного выщелачивания: дис. PhD 6D060300 «Механика». – Алматы, 2013. – 79 с.
18. Sandstone-hosted uranium deposits as a possible source for critical elements: the Eureka mine case, Castell-Estaó, Catalonia / M. Castillo-Oliver, J.C. Melgarejo, L. Torró, C. Villanova-de-Benavent, M. Campeny, Y. Díaz-Acha, S. Amores-Casals, J. Xu, J. Proenza, E. Tauler // Minerals. Mineral Geochemistry and Geochronology. Mineral Deposits of Critical Elements. – 2020. – № 1. – P. 2–34.
19. Борхович С.У., Пчелников И.В., Колесова С.Б. Подземная гидромеханика. – Ижевск: Изд-во Удмуртского Университета, 2017. – 176 с.
20. Физика пласта / Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского государственного университета, 2017. – 214 с.
21. Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.
22. Анализ параметра пористости с привлечением элементов региональной петрофизики (электрофации) и типа глинистости / И.Б. Ратников, Р.С. Шулга, Е.А. Романов, С.Н. Бастиков // Свойства горных пород. Геомеханика и геофизика. Горные науки и технологии. – 2016. – № 2. – С. 50–62.
23. Подрезов Д.Р. Разработка и идентификация моделей оценки запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана: дис. ... канд. тех. наук. – М., 2021. – 175 с.
24. Alsadik B. Adjustment models in 3D geomatics and computational geophysics: with MATLAB examples. – London: Elsevier, 2019. – 415 p.
25. Дуйсембаев Д.О. Сводный отчет по опробованию и испытанию керновых проб тех. блока X, месторождения Моинкум. – Нур-Султан: Изд-во АО НАК Казатомпром, 2014. – 58 с.
26. Геологические колонки по скважинам в масштабе 1:500. – Нур-Султан: АО НАК Казатомпром, 2018. – 18 с.
27. Кисин Ю.К. О применении алгоритмов на основе метода наименьших квадратов и конечных формул в задачах обработки траекторных измерений // Вестник концерна ВКО Алмаз – Алтай. – 2016. – № 3. – С. 74–80.
28. Математическое моделирование пластовых систем: методическое указание / под ред. П.А. Ефимова. – Тюмень: Изд-во ОАО СургутНИПИнефть, 2016. – 211 с.
29. Fractal kinetic characteristics of hard-rock uranium leaching with sulfuric acid / S. Zeng, J. Li, K. Tan, S. Zhang // Royal Society Publishing. – 2018. – № 5. – P. 2–13. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.180403> (accessed 12.03.2022).
30. Edwards C. Underground milling of high-grade uranium ore // Proceedings of an International Symposium Organized by the International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2009. – P. 151–160.
31. Bai H. Geological characteristics and control mechanism of uranium enrichment in coal-bearing strata in the Yili Basin, Northwest China – implications for resource development and environmental protection // American Chemical Society: ACS Omega. – 2022. – № 7. – P. 5453–5479.
32. Increasing of filtration characteristics of ore bodies in borehole uranium mining / B. Rakishev, Zh. Kenzhetayev, A. Shampikova, B. Toktaruly // Materials of II International Conference Essays of Mining Science and Practice. EDP Sciences. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800014> (дата обращения 13.03.2022).
33. Full-scale pore size distribution features of uranium-bearing sandstone in the northwest of Xinjiang, China / S. Zeng, H. Li, N. Zhang, B. Sun, J. Li, Y. Liu // Royal Society Publishing, 2021. – № 5. – P. 2–14. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.202036> (дата обращения 14.03.2022).

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Бейсекеев Е.Ш., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; АО «НАК Казатомпром».

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.775

SIMULATION OF LIQUID MOVEMENT WHILE WELL FUND OPERATION IN URANIUM DEPOSITS PRODUCED BY ISL METHOD

Yermek Sh. Beisekeyev^{1,2},
yermek_f-81@mail.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² NAC Kazatomprom JSC,
17/12, Syganak street, Nur-Sultan, 010000, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the study is caused by the possibility of expanding the use of induction logging data for spatial modeling of the spreading of technological solutions in hydrogenous uranium deposits. Regression modeling is based on the dependence of changes in the geoelectric properties of rocks on changes in their hydrophysical properties during leaching, and can be used to improve the efficiency of leaching monitoring and predicting.

Purpose: to substantiate the reliability of the model of the movement of process fluids in reservoir-infiltration type deposits, developed on the basis of the least squares method using the results of induction logging as input data.

Objects: induction logging data from wells of block X of the Moinkum deposit, Chu-Sarysu uranium ore province.

Methods: induction logging, correlation and regression analysis using Excel, Statistica, Curve Editor, Matlab and LibreCad software environments. The hardware for induction logging sounding is represented by a single probe three-coil instrument PIK-50 and IK-42M.

Results. The calculated indicators of the adequacy of the regression model for changing the electrical conductivity and effective power of the block, such as the coefficient of determination, the estimate of the variances of the least squares estimates, the Student's coefficient, the F-criterion, revealed its reliability and veracity. On the example of a block of the Moinkum deposit, Chu-Sarysu uranium ore province, the effectiveness of monitoring the movement of process solutions using IR data using a least squares regression model was established. The expediency of using induction logging data for modeling the spreading of technological solutions on the example of the reservoir-infiltration of the Moinkum deposit, Chu-Sarysu uranium ore province is proved and a model of solutions spreading is formed using the proposed algorithm for applying regression modeling using the least squares method.

Key words:

Monitoring of uranium mining, control of the movement of solutions during uranium mining, uranium mining on the hydrogen deposits, uranium mining by the ISR method, development of uranium deposits of the reservoir-infiltration type, additional exploration of uranium deposits.

The authors appreciate the assistance in provision of materials on geophysical and laboratory research of downhole fund of Moinkum deposit by the team of the Ore Mining Department of «NAC Kazatomprom».

REFERENCES

- Danilov V.V., Istomin A.D., Kokorev O.N., Noskov M.D., Cheglokov A.A. Geological-mathematical model of the reservoir of the SGZ LRW of the branch «Seversky» FSUE «NO RAO». *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, no. 12-2, pp. 19–24. In Rus.
- Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K. Hydrodynamic substantiation of changes in the hydrogeochemical conditions of the Strezhevsky groundwater deposit (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 204–220. In Rus.
- Bassiouni Z. *Geophysics and geosequestration. P. II. C. 11: Well Logging*. Cambridge, Cambridge University Press, 2019. pp. 181–194.
- Fox Jr. J. *Applied regression analysis and generalized linear models*. Thousand Oaks, SAGE Publishing, 2015. 276 p.
- Montgomery D.C., Vining G.G., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. Hoboken, John Wiley & Sons Limited, 2019, 328 p.
- Tekhnologicheskii reglament provedeniya geofizicheskikh issledovaniy* [Technological regulations for geophysical research]. Nur-Sultan, NAC Kazatomprom JSC Publ., 2021. 21 p.
- Mashkovtsev G.A. *Geologo-promyshlennye tipy uranovykh mestorozhdeniy stran SNG* [Geological and industrial types of uranium deposits of the CIS countries]. Moscow, VIMS Publ., 2008. 72 p.
- Yazikov E.G., Manabayeva T.A., Efremov A.A. *Otchet po glubinnomu geologicheskomu kartirovaniyu mezozoyско-kaynozoyского chekhla Chu-Sarysuyskoy depressii* [Report on deep geological mapping of the Mesozoic-Cenozoic cover of the Chu-Sarysu depression]. Almaty, Volkovgeology Publ., 2012. 160 p.
- Dannye po kompleksnomu geofizicheskomu issledovaniyu skvazhinnogo fonda tekhn. bloka X mestorozhdeniya Moinkum* [Data on a comprehensive geophysical survey of the borehole's stock of block X of the Moinkum field]. Ed. by V.O. Kurockin. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2019. 76 p.
- Zhu Q., Li J., Li G., Wen S., Yu R., Tang C., Feng X., Liu X. Characteristics of sandstone-type uranium mineralization in the Hangjinqi region of the northeastern Ordos Basin: clues from clay mineral studies. *Ore Geology Reviews*, 2022, no. 11, pp. 215–277.
- Usheva N.V. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical-technological processes]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. 135 p.
- Fomin M.A., Kostyeva E.A., Ryzhkova S.V., Saitov R.M., Sotnich I.S., Eder V.G. Prediction of the lithological composition of the Bazhenov Formation based on the integrated interpretation of geological and geophysical materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 154–167. In Rus.

13. Hajian A., Styles P. *Application of soft computing and intelligent methods in geophysics*. New York, Springer, 2018. 543 p.
14. Chang X.-W., Kang P., Titley-Peloquin D. Error bounds for computed least squares estimators. *Linear Algebra and its Applications*, 2020, no. 1, pp. 28–42.
15. Yun B., Fei Z.P., Jing Z., Hao K.W., Cui L.X., Ke C., Lu S., Ying L.L. Application of geo-statistics in calculation of a uranium deposit. *E3S Web of Conferences no. 206*. 2020. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020601005> (accessed 3 February 2022).
16. Temirkhanova R., Syzdykova M. Calculation of stem uranium reserves according to gamma-ray logging data in the GIK program. *«Industry of Kazakhstan» Journal*, 2018, no. 6, pp. 79–80. In Rus.
17. Alibaeva K.A. *Chislennoe issledovanie putey povysheniya vyrabotki mestorozhdeniya pri dobyche mineralov metodom podzemnogo vyshhelachivaniya*. Dis. PHD [Numerical study of ways to increase the production of a deposit during the extraction of minerals by the method of underground leaching: Dis. PHD]. Almaty, 2013. 79 p.
18. Castillo-Oliver M., Melgarejo J.C., Torró L., Villanova-de-Benavent C., Campeny M., Díaz-Acha Y., Amores-Casals S., Xu J., Proenza J., Tauler E. Sandstone-hosted uranium deposits as a possible source for critical elements: the Eureka mine case, Castell-Estaó, Catalonia. *Minerals. Mineral Geochemistry and Geochronology. Mineral Deposits of Critical Elements*, 2020, no. 1, pp. 2–34.
19. Borkhovich S.U., Pchel'nikov I.V., Kolesova S.B. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics]. Izhevsk, Udmurt University Publ., 2017. 176 p.
20. Kochina T.B., Spiridonova V.N., Rodiontsev N.N., Kruglov I.A. *Fizika plasta* [Reservoir physics]. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University Publ., 2017. 214 p.
21. Noskov M.D. *Dobycha urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshhelachivaniya* [Extraction of uranium by the method of borehole underground leaching]. Seversk, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2010. 83 p.
22. Ratnikov I.B., Shulga R.S., Romanov E.A., Batrikov S.N. Analysis of the porosity parameter with the involvement of elements of regional petrophysics (electrofacies) and clay type. *Properties of rocks. Geomechanics and geophysics. Mining sciences and technologies*, 2016, no. 2, pp. 50–62. In Rus.
23. Podrezov D.R. *Razrabotka i identifikatsiya modeley otsenki zapasov rudnika podzemnogo skvazhinnogo vyshhelachivaniya urana*. Dis. Kand. nauk [Development and identification of models for assessing the reserves of a mine of underground borehole leaching of uranium. Kand. Dis.]. Moscow, 2021. 175 p.
24. Alsadik B. *Adjustment models in 3D geomatics and computational geophysics: with MATLAB examples*. London, Elsevier, 2019. 415 p.
25. Duysembayev B.O. *Svodnyy otchet po oprobovaniyu i ispytaniyu kernovykh prob tekhn. bloka X, mestorozhdenii Moinkum* [Consolidated report on sampling and testing of core samples of technical block X, Moinkum field]. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2014. 58 p.
26. *Geologicheskie kolonki po skvazhinam v masshtabe 1:500* [Geological columns for boreholes on a scale of 1:500]. Nur-Sultan, JSC NAC Kazatomprom Publ., 2018. 18 p.
27. Kisin Yu.K. Application of algorithms based on the method of least squares and finite formulas in the problems of processing trajectory measurements. *Bulletin of the concern VKO Almaz – Altei*, 2016, pp. 74–80. In Rus.
28. *Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem* [Mathematical modeling of reservoir systems]. Ed. by P.A. Efremov. Tyumen, OJSC SurgutNIPIneft Publ., 2016. 211 p.
29. Zeng S., Li J., Tan K., Zhang S. Fractal kinetic characteristics of hard-rock uranium leaching with sulfuric acid. *Royal Society Publishing*, 2018. No. 5, pp. 2–13. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsos.180403> (accessed 12 March 2022).
30. Edwards C. Underground milling of high-grade uranium ore. *Proc. of an International Symposium Organized by the International Atomic Energy Agency*. Vienna, 2009. pp. 151–160.
31. Bai H. Geological characteristics and control mechanism of uranium enrichment in coal-bearing strata in the Yili Basin, Northwest China – implications for resource development and environmental protection. *American Chemical Society, ACS Omega*, 2022, no. 7, pp. 5453–5479.
32. Rakishev B., Kenzhetayev Zh., Shampikova A., Toktaruly B. Increasing of filtration characteristics of ore bodies in borehole uranium mining. *Materials of II International Conference Essays of Mining Science and Practice. EDP Sciences*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800014> (accessed 13 March 2022).
33. Zeng S., Li H., Zhang N., Sun B., Li J., Liu Y. Full-scale pore size distribution features of uranium-bearing sandstone in the northwest of Xinjiang, China. *Royal Society Publishing*, 2021, no 5, pp. 2–14. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.202036> (accessed 14 March 2022).

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Yermek Sh. Beisekeyev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; manager, NAC Kazatomprom JSC.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.