

Оценка фильтрационных свойств рудовмещающих пород по данным электрических методов каротажа (Шу-Сарысуская урановая провинция, Казахстан)

¹**ШАРАПАТОВ Абиш**, к.г.-м.н., ассоциированный профессор,
a.sharapatov@satbayev.university,

^{1*}**АСИРБЕК Назерке Асирбеккызы**, магистр, старший преподаватель,
n.assirbek@satbayev.university,

²**АБДЫРОВ Мадияр Мухтарович**, магистр, ведущий геофизик, madiyar_abdyrov@mail.ru,

¹**САДУОВ Алишер Берикжанович**, докторант, a.saduov@satbayev.university,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан,

²ТОО «NomadGeoService», ул. Коперника, 124б, Алматы, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Изучен вопрос повышения информативности методов каротажа при определении фильтрационных свойств урановмещающих пород – песков в пластово-инфильтрационных месторождениях. Для решения данной задачи традиционно используются данные метода кажущегося сопротивления. В работе проведены статистические расчеты с использованием данных метода кажущегося сопротивления и индукционного метода. При получении аналитических связей между измеряемыми (электрические свойства песков) и прикладным (коэффициента фильтрации) параметрами использованы данные песков представительного гранулиметрического состава; обеспечена репрезентативность выборки используемых материалов керна и данных электрических методов каротажа. Погрешность определения значений фильтрационного свойства песков по расчётным графикам / аналитическим выражениям каротаж-кern находится в допустимых для отрасли пределах.

Ключевые слова: урановые горизонты, рудовмещающие породы, фильтрационные свойства, электрические методы каротажа, статистический анализ.

Введение

Песчаниковый тип урановых месторождений относится к классу экзогенных эпигенетических (гидрогенных) и объединяет стратиформные месторождения, в которых урановая минерализация совместно с рядом сопутствующих элементов (редкоземельных металлов, Mo, Re, Se, V) размещается в слабо- и нелитифицированных отложениях мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов (впадин) в чехлах древних и молодых платформ. Несмотря на низкое содержание урана в рудах, песчаниковый тип месторождений считается наиболее продуктивным, а благодаря возможности применения подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) также и наиболее рентабельным (Uranium Production by Country 2023. World Population Review.

<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/uranium-production-by-country>); [1-3].

Пластово-инфильтрационные месторождения урана сформированы в условиях напорных пластовых (артезианских) инфильтрационных гидродинамических систем. Урановые руды залегают в проницаемых породах артезианских бассейнов и контролируются границами зон пластового окисления (ЗПО). Рудные залежи в них, как правило, имеют форму роллов – удлинённо-серповидных в поперечном сечении и лентовидных в плане тел. Ролловые руды преимущественно рядовые и убогие. Вопросы генезиса месторождений урана пластово-инфильтрационного типа в первую очередь связаны с вопросами миграции урана в

пластовых водах и его осаждения на геохимических барьерах. Считается, что в горных породах важнейшими осадителями урана, создающими восстановительную среду являются органические вещества, сульфиды, соединения железа, фосфаты, глинистые минералы. В подземных водах растворенные газы: сероводород, водород, углеводороды. При этом механизм возникновения урановой минерализации остается невыясненным [1, 2].

На всех этапах изучения урановых оруденений для решения геологических, горно-геологических и технологических задач повсеместно используются методы геофизических исследований скважин (ГИС). Информативность методов ГИС позволяет оптимизировать объемы работ, повысить уровень производственной и геоэкологической безопасности при разведке, освоении урановых месторождений способом ПСВ [4-5].

Методика оценки фильтрационных свойств горных пород урановых месторождений по данным каротажа методом кажущегося сопротивления (КС) разработаны в 80-е годы прошлого века (Воробьев Б.В., Гордиенко О.Е.; Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии – ВНИИХТ, Россия). Она повсеместно используется на месторождениях Казахстана данного типа. Статистическое изучение связи между коэффициентом фильтрации K_f (м/сут) рудовмещающих пород и показаниями КС ранее проводились по рудным горизонтам других месторождений района (Вершков А.Ф. и др. АО «Волковгеология» в 2005-2007 гг.).

На участке исследования актуализируется повышение точности определения фильтрационных свойств песков инкудыкского рудного горизонта с привлечением данных последних лет по другим методам электрического каротажа. Малоизученной является корреляция K_f с показаниями индукционного каротажа (ИК) – по значениям удельной электропроводности пород σ_k (См/м).

Методы и материалы

Для анализа связи электрических и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горных пород по литературным данным были изучены основные факторы, влияющие на них и определяющие параметры проницаемых пород. Обобщение данных проводилось в контексте геолого-геофизических особенностей урановых месторождений Шу-Сарыуской провинции. Далее методом статистического анализа была выявлена фактическая коррелируемость измеряемых скважинных электрических полей с медианным диаметром D_{50} (мм) и K_f рудовмещающих пород

– песков. Установлена аналитическая/графическая связь между измеряемыми и прикладными параметрами.

В исследованиях использованы фактические материалы по одному из участков северного рудного узла Шу-Сарыуской урановорудной провинции (Алдабеков Т.К., Троценко Г.В., Кабулдаева А.Н. и другие; 2022 г.). Выбор площади обоснован наличием по ней достаточного объема материалов ГИС методом ИК.

При этом определение тренда в корреляции данных ИК с K_f носит экспериментальный характер. В дальнейшем предполагается разработка методики комплексного использования связей КС- K_f и ИК- K_f .

Определяющие параметры проницаемых пород. Электрические свойства горных пород не зависят от их минерального состава: удельное электрическое сопротивление ρ_k (Ом·м) и удельная электропроводность пород σ_k (См/м) определяется лишь присутствием природной воды в порах пород. Основные породообразующие минералы (кварц, полевой шпат, ангидрит, галит) являются первоклассными изоляторами. Минеральный скелет основной группы осадочных горных пород (пески, песчаники, известняки, глины) имеет практически бесконечное сопротивление; ρ_k воды на много порядков меньше ρ_k минерального скелета [6].

При проходке скважины значения ρ_k различных пород в контакте с буровым раствором изменяются неодинаково. Плотные, монолитные породы не претерпевают изменения. Глинистые породы на контакте с буровым раствором набухают, размываются и выносятся буровым раствором, также увеличивается диаметр скважины. На контакте глины с раствором образуется зона небольшой глубины, набухшей либо растрескавшейся чешуйками глины. Вскрытие коллекторов всегда ведется при условии, что давление в скважине превышает пластовое и вызывает фильтрацию жидкости из скважины в пласт. При этом, если поры в коллекторе достаточно тонки и представляют собой сетку, как в фильтре, то на стенке скважины образуется глинистая корка толщиной с одним ρ_k^1 , а фильтрат бурового раствора проникает в пласт, создавая зону проникновения диаметром D с ρ_k^2 [1, 6].

Гранулометрический состав рудовмещающих пород. По размеру частиц породы подразделяются на ряд типов: исефиты (крупнообломочные), псаммиты (песчаные), алевриты (мелкообломочные), пелиты (породы с частицами $<0,001$ мкм). О характере распределения урана в осадочных породах судят по его распределению по грануломе-

трическим фракциям [7]. На исследуемом участке рудовмещающие пески по фракции классифицированы по медианному диаметру: D_{10} , D_{20} , D_{50} , D_{60} и D_{100} .

Проницаемость руд. Фильтрационные свойства пород зависят от вещественного состава алеврит-глинистой фракции рудных песков. Взаимодействие сернокислотных растворов с веществом пород приводит к уменьшению K_{ϕ} . Поэтому изучение минерального состава тонких фракций рудных песков позволяет прогнозировать изменение проницаемости пород при движении выщелачивающих растворов [7, 8].

Водопроницаемые свойства пород сильно зависят от минерального состава алеврит-глинистой фракции: при добавлении к кварцевому песку 10% бентонита (монтмориллонита, смектита) водопроницаемость его уменьшается в 10 000 раз. Более проницаемые пески свойственны каолинистому составу глинистого вещества. Менее проницаемые – монтмориллонитовому (смектитовому) [7].

Результаты

При изучении зависимостей ρ_k (Ом·м) и σ_k (См/м) от ФЕС – гранулометрического состава песков наиболее тесная связь выявлена с наиболее представительным медиан-

ным диаметром D_{50} . Зависимость может быть представлена в аналитической форме в виде уравнения регрессии $D_{50} = f(\rho_k)$ и $D_{50} = f(\sigma_k)$ и в графическом формате (рисунки 1, 2).

Корреляционные зависимости измеряемыми (ρ_k , σ_k) и прикладными (в данном случае – D_{50} , далее – K_{ϕ}) параметрами установлены статистическими расчётами и описываются уравнениями:

$\rho_k = 6.635D_{50} + 6.9803$, с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.5546$;

$\sigma_k = -51.635D_{50} + 62.843$, с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.7194$.

В последующем данные уравнения используются для определения значений коэффициента фильтрации K_{ϕ} , м/сут, по данным КС и ИК по графикам/трендам: $K_{\phi} = f(\rho_k)$ и $K_{\phi} = f(\sigma_k)$ (рисунки 3, 4).

По результатам статистического анализа зависимостей показаний КС от K_{ϕ} и показаний ИК от K_{ϕ} получены аналитические выражения:

$\rho_k = 0.6161K_{\phi} + 4.9863$, с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.5391$;

$\sigma_k = -4.8489K_{\phi} + 78.833$, с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.7291$.

Количество выборки, использованной при построении уравнений регрессии, состоит: из 218 показаний каротажных диаграмм КС, ИК, лабораторных данных по ядерным

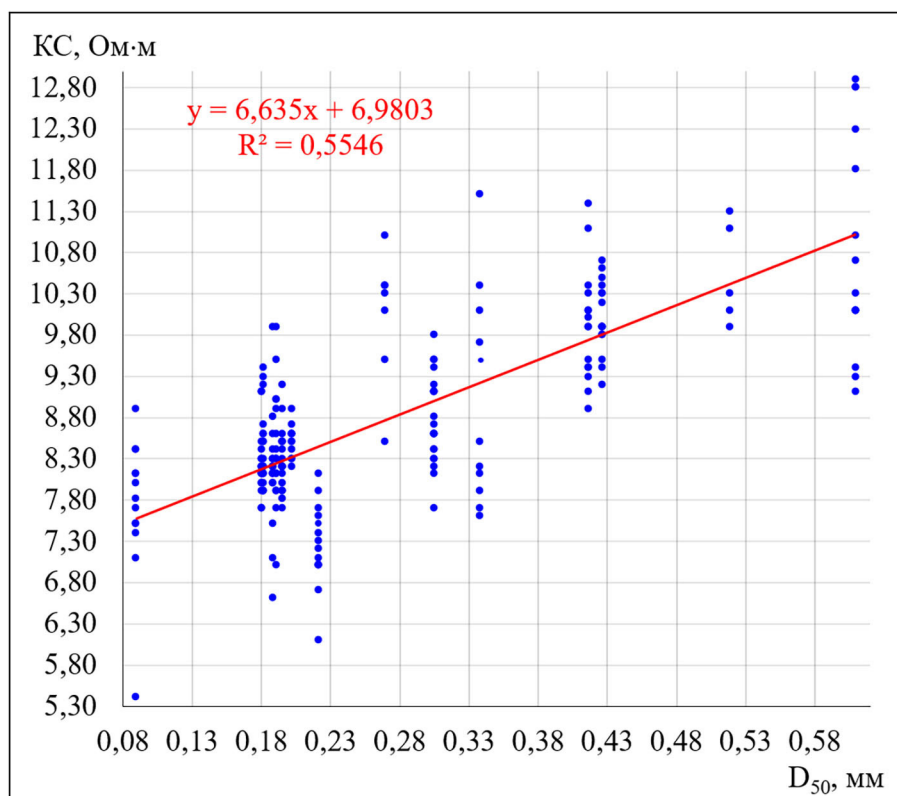


Рисунок 1 – График зависимости КС-D₅₀

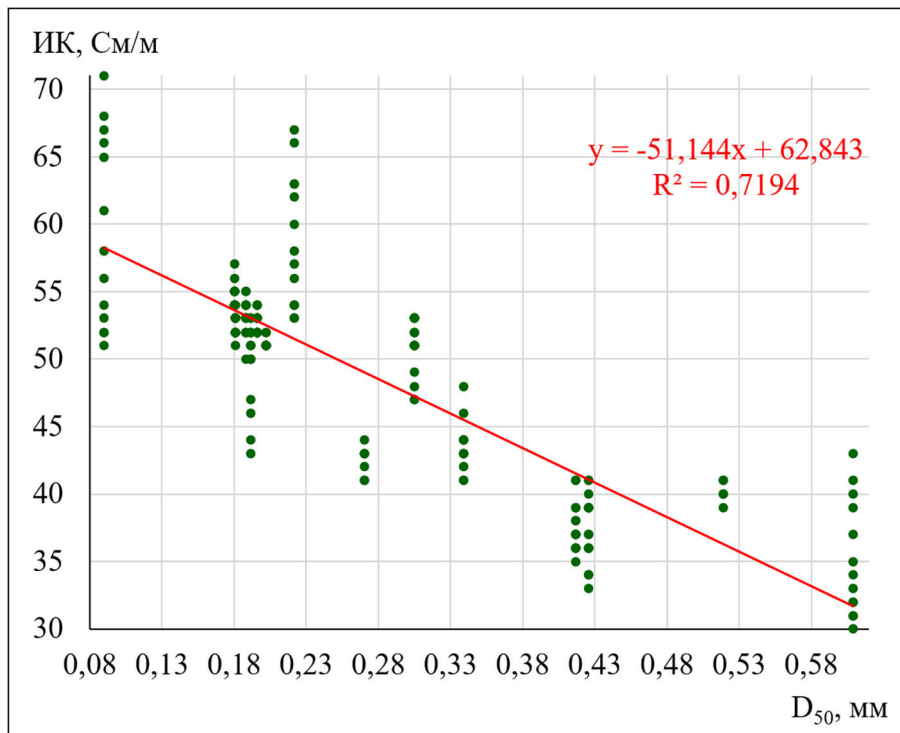


Рисунок 2 – График зависимости ИК от D_{50}

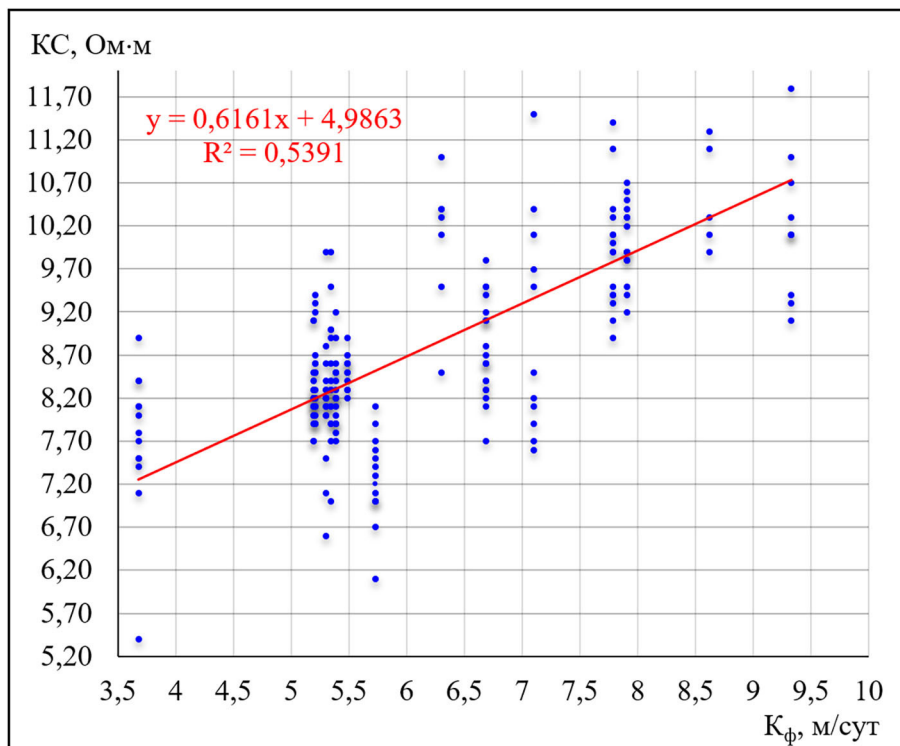
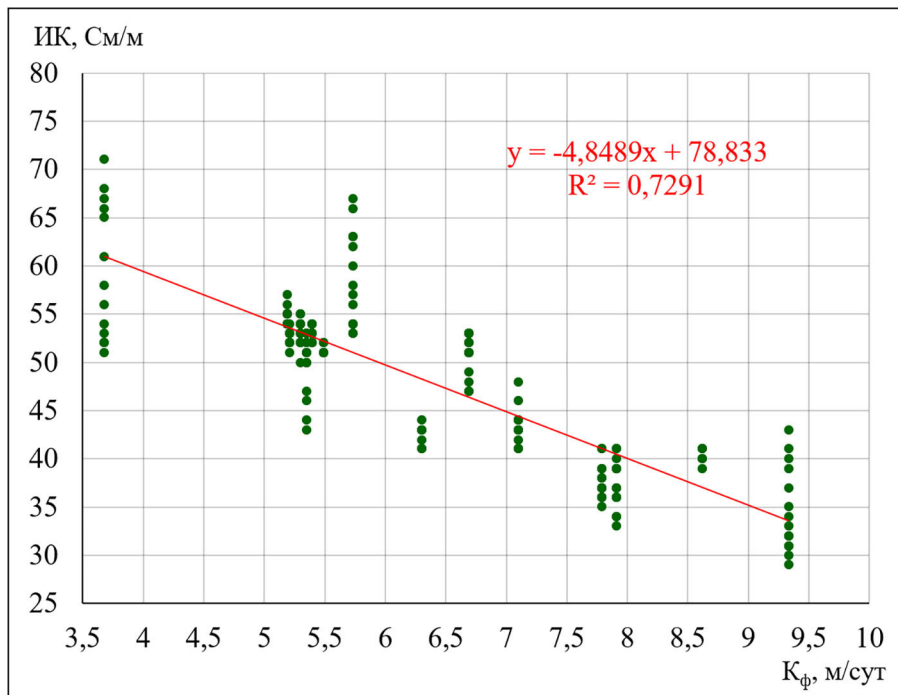


Рисунок 3 – График зависимости КС от K_ϕ

материалам песков с медианным диаметром D_{50} ; результатов опытных гидрогеологических откачек для определения значения K_ϕ

песков с D_{50} .

Показатель достоверности послойных значений фильтрационных свойств при

Рисунок 4 – График зависимости ИК от К_φ

определении D_{50} и K_{ϕ} по ИК выше, чем по КС – традиционно используемого метода, что означает актуальность применения данных ИК при решении геологических и/или горно-геологических задач. Относительное расхождение между значениями K_{ϕ} , определенными по электрическим методам каротажа КС, ИК и опытным гидрогеологическим откачкам, составляет, соответственно, 15.9 и 10.48%.

Более высокий показатель точности определения K_{ϕ} по ИК по сравнению с КС также указывает на перспективность использования данных ИК при разведке и освоении урановых месторождений пластово-инфильтрационного типа с использованием современных технологий: например, в технологии искусственного интеллекта как дополнительный параметр машинного и глубокого обучения модели урановых залежей и/или геологического разреза участков экзогенного уранового оруденения гидроген-

ного (пластово-инфильтрационного) типа в целом [9].

Выводы:

- значения K_{ϕ} по данным электрокаротажа КС и ИК на урановом участке определяются с достаточной точностью – 15.9%, для практического их использования – не ниже точности, принятой в отрасли и на других месторождениях района;

- на примере данных исследуемого уранового участка аналитическая связь для определения K_{ϕ} по данным ИК показала более высокую точность, чем КС- K_{ϕ} (10.48 относительно 15.9%). Она требует дальнейшего изучения и подтверждения на примере других рудных горизонтов и участков;

- результаты исследования могут быть использованы для практических целей при решении различных производственных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демехов Ю.В., Ибраев Б.М. и др. Геотехнология урана: учебное пособие. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. 328 с.

2. Franz J. Dahlkamp, Editor. Uranium Deposits of the World, Asia Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. 494 p.
3. Wei W., Xuanyu L., Qinghe N., Qizhi W., Jinyi Zh., Xuebin S., Genmao Zh., Lixin Zh., Wei Y., Jiangfang Ch., Yongxiang Zh., Jienan P., Zhenzhi W., Zhongmin Ji. Reformability evaluation of blasting-enhanced permeability in in situ leaching mining of low-permeability sandstone-type uranium deposits. / Nuclear Engineering and Technology, Volume 55, Issue 8, August 2023, Pp. 2773-2784.
4. Mwenifumbo, C.J., Mwenifumbo, A.L. Geophysical logging methods for uranium geology and exploration. Geological Survey of Canada, Publisher: Natural Resources Canada, 2013. Technical Note 4, 43 p.
5. Шарапатов А., Асирбек Н.А., Саманбетов Н.З. Оценка эффективности методов электрокаротажа при изучении герметичности обсадных колонн в скважинах урановых месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2023. Т. 334. № 10. С. 7-15 (на русском языке).
6. Любимов Н.И., Морозов В.И. Физико-механические свойства рудовмещающих горных пород. Москва: Издательство «Недра», 1973. 120 с. (на русском языке).
7. Воронцов П.Ю. Влияние вещественного состава руд и вмещающих пород на процесс добычи и выщелачивания урана методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) на месторождениях пластово-инфильтрационного типа. Проблемы минералогии, петрографии и металлогении // Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сборник научных статей. ПГНИУ. Пермь, 2022. Вып. 2. С. 34-45 (на русском языке).
8. Abzalov, M., Renard D. Plurigaussian conditional simulation (PGS) of the Budenovskoe uranium roll-front deposit, central Kazakhstan: 3D model of the host sedimentary sequence. Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Volume 132, Issue 3-4, Pp. 227-235. – 2023.
9. Шарапатов А., Садуов А., Асирбек Н. Сравнительный анализ возможностей алгоритмов машинного и глубокого обучения в геологии // Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана. Алматы, 2023. № 11. С. 14-21 (на русском языке).

Электрлік каротаж әдістері бойынша рудалы таужыныстардың фильтрлеу-сыйымдылық қасиеттерін зерттеу (Шу-Сарысу уран провинциясы, Қазақстан)

¹**ШАРАПАТОВ Әбіш**, г.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор,
a.sharapatov@satbayev.university,

^{1*}**ӘСІРБЕК Назерке Әсірбекқызы**, магистр, аға оқытушы,
n.assirbek@satbayev.university,

²**АБДЫРОВ Мадияр Мұхтарұлы**, магистр, жетекші геофизик, madiyar_abdyrov@mail.ru,

¹**САДУОВ Әлішер Берікжанұлы**, докторант, a.saduov@satbayev.university,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан,

²«NomadGeoService» ЖШС, Коперник көшесі, 124б, Алматы, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қабаттық-инфильтраттық кенорындарда уранды таужыныстар – құмдардың фильтрлеу қасиеттерін анықтауда каротаж әдістерінің мәліметтілігін арттыру мәселесі зерттелді. Бұл мәселені шешу үшін өндірісте, әдетте, көрінерлік кедергі әдісінің деректері қолданылады. Жұмыста көрінерлік кедергі әдісі мен индукциялық каротаж деректерін қолданып, статистикалық есептеулер жүргізілді. Өлшенетін (құмдардың электрлік қасиеттері) және қолданбалы (фильтрлеу коэффициенті) параметрлері арасындағы аналитикалық байланыстарды анықтауда гранулометриясы маңызды құмдардың деректері пайдаланылды; керн материалдары және электрлік каротаж әдістері деректерінің есептеулерде жеткілікті көлемі қамтылды. Каротаж-керн байланыс графиктері / аналитикалық өрнектерін алуда құмдардың фильтрлеу қасиетінің мәндерін анықтау қателігі сала үшін белгіленген деңгейден аспайды.

Кілт сөздер: уран горизонттары, рудалы таужыныстар, фильтрлеу қасиеттері, электрлік каротаж әдістері, статистикалық талдау.

Evaluation of Filtration Properties of Ore-bearing Rocks According to Electrical Logging Methods (Shu-Sarysu Uranium Province, Kazakhstan)

¹**SHARAPATOV Abish**, Cand. of Geol. and Min. Sci., Associate Professor, a.sharapatov@satbayev.university,

^{1*}**ASSIRBEK Nazerke**, Master's Degree, Senior Lecturer, n.assirbek@satbayev.university,

²**ABDYROV Madiyar**, Master's Degree, Leading Geophysicist, madiyar_abdyrov@mail.ru,

¹**SADUOV Alisher**, Doctoral Student, a.saduov@satbayev.university,

¹NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Satpayev Street, 22a, Almaty, Kazakhstan,

²«NomadGeoService» LLP, Kopernik Street, 124b, Almaty, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The issue of increasing the information content of logging methods in determining the filtration properties of uranium-containing rocks – sands in reservoir-infiltration deposits has been studied. To solve this problem, data from the apparent resistance method are traditionally used. Statistical calculations using the data of the apparent resistance method and the induction method are carried out in the work. When obtaining analytical links between the measured (electrical properties of sands) and applied (filtration coefficient) parameters, data from sands of representative granulometric composition were used; the representativeness of the sample of core materials used and data from electrical logging methods was ensured. The error in determining the values of the filtration property of sands according to calculation graphs / analytical expressions of logging-core is within acceptable limits for the industry.

Keywords: uranium horizons, ore-bearing rocks, filtration properties, electrical logging methods, statistical analysis.

REFERENCES

1. Demekhov YU.V., Ibraev B.M. i dr. Geotekhnologiya urana: uchebnoe posobie. – Almaty: Qazaq universiteti, 2017. 328 p.
2. Franz J. Dahlkamp, Editor. Uranium Deposits of the World, Asia Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. 494 p.
3. Wei W., Xuanyu L., Qinghe N., Qizhi W., Jinyi Zh., Xuebin S., Genmao Zh., Lixin Zh., Wei Y., Jiangfang Ch., Yongxiang Zh., Jienan P., Zhenzhi W., Zhongmin Ji. Reformability evaluation of blasting-enhanced permeability in in situ leaching mining of low-permeability sandstone-type uranium deposits. / Nuclear Engineering and Technology, Volume 55, Issue 8, August 2023, Pp. 2773-2784.
4. Mwenifumbo, C.J., Mwenifumbo, A.L. Geophysical logging methods for uranium geology and exploration. Geological Survey of Canada, Publisher: Natural Resources Canada, 2013. Technical Note 4, 43 p.
5. Sharapatov A., Asirbek N.A., Samanbetov N.Z. Ocenka effektivnosti metodov elektrokarotazha pri izuchenii germetichnosti obsadnyh kolonn v skvazhinah uranovyh mestorozhdenij // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Tomsk, 2023. T. 334. No. 10. Pp. 7-15.
6. Lyubimov N.I., Morozov V.I. Fiziko-mekhanicheskie svoystva rudovmeshchayushchih gornyh porod. Moscow: Izdatel'stvo «Nedra», 1973. 120 p.
7. Voroncov P.YU. Vliyanie veshchestvennogo sostava rud i vmeshchayushchih porod na process dobychi i vshchelachivaniya urana metodom podzemnogo skvazhinogo vshchelachivaniya (PSV) na mestorozhdeniyah plastovo-infil'tracionnogo tipa. Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii // Nauchnye chteniya pamyati P.N. CHirvinskogo: sbornik nauchnyh statej. PGNIU. Perm', 2022. Vyp. 2. Pp. 34-45.
8. Abzalov, M., Renard D. Plurigaussian conditional simulation (PGS) of the Budenovskoe uranium roll-front deposit, central Kazakhstan: 3D model of the host sedimentary sequence. Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Volume 132, Issue 3-4, Pp. 227-235. – 2023.
9. Sharapatov A., Saduov A., Asirbek N. Sravnitel'nyj analiz vozmozhnostej algoritmov mashinnogo i glubokogo obucheniya v geologii // Nauchno-tekhnicheskij i proizvodstvennyj Gornyj zhurnal Kazahstana. Almaty, 2023. No. 11. Pp. 14-21.