

На правах рукописи



Легавко Дмитрий Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ
РЕГИСТРАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ КАРОТАЖА СКВАЖИН
ПРИ ОТРАБОТКЕ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА**

Специальность 25.00.10 Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2020

Работа выполнена в лаборатории гравиинерциальных измерений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель: **Конешов Вячеслав Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, заведующий лабораторией гравиинерциальных измерений

Официальные оппоненты: **Костицын Владимир Ильич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ)», заведующий кафедрой геофизики

Боголюбов Евгений Петрович
доктор технических наук,
Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА)», научный руководитель по направлению

Ведущая организация: **Общество с ограниченной ответственностью «Радионда», г.Москва**

Защита диссертации состоится **16 апреля 2020 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Подземное выщелачивание (ПВ) – прогрессивный метод добычи урана, широко применяемый во всем мире на инфильтрационных месторождениях, сформированных в проницаемых осадочных породах депрессионных зон земной коры. Вскрытие рудных тел и добыча урана на этих месторождениях осуществляется через сеть технологических скважин, количество которых на действующих предприятиях исчисляется сотнями и тысячами единиц. Сооружение такого количества скважин сопровождается большими объемами геофизических исследований скважин (ГИС) на всех стадиях разведки и эксплуатации месторождения.

На этапе разведки применение ГИС дополняется исследованиями керна, гидрогеологическими наблюдениями и, в целом, имеет размеренный научно-исследовательский характер. При переходе к отработке месторождения процесс сооружения скважин и проведения в них геофизических исследований принимает поточный характер. Данные ГИС становятся практически единственно достоверной основой для расчета запасов урана и проектирования оптимальных систем вскрытия рудных тел, а результаты их интерпретации необходимо получать в сжатые сроки.

Огромные объемы ГИС, строгие пределы времени, отпускаемого на регистрацию и обработку каротажных данных, и высокая значимость их результатов требуют максимально возможной формализации методик и автоматизации процессов регистрации и интерпретации.

Однако до сих пор для проведения ГИС на урановых месторождениях России и стран СНГ используются устаревшие скважинная и наземная геофизическая аппаратура, имеющее ряд функциональных и методических ограничений программное обеспечение, а основные интерпретационные процедуры зачастую осуществляются в ручном режиме.

Для повышения точности результатов и сокращения временных и производственных затрат на проведение и обработку ГИС требуются новые усовершенствованные методические приемы автоматизированной регистрации данных ГИС и, особенно, их последующей интерпретации, а также новые аппаратурные и программные решения.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии, методики, аппаратурного и программного обеспечения автоматизированной регистрации и интерпретации данных основных методов геофизических исследований скважин, сооружаемых при отработке методом подземного выщелачивания инфильтрационных месторождений урана.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Анализ существующих методических решений, применяемых при литологическом расчленении разреза рудного горизонта и определении фильтрационных характеристик пород по комплексу методов электрокаротажа. Разработка методики и программного обеспечения для автоматизированной литологической интерпретации данных электрокаротажа с получением попластовых значений коэффициента фильтрации пород.

2. Анализ существующей методики автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа для выявления причин систематического занижения расчетных извлекаемых запасов на месторождениях урана инфильтрационного типа. Разработка методических дополнений к существующей методике и программного обеспечения для автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа с повышенной точностью определения извлекаемых запасов урана.

3. Разработка нового поколения скважинных приборов и наземного каротажного регистратора с целью повышения надежности аппаратуры, улучшения ее метрологических характеристик и повышения качества результатов каротажных исследований.

4. Разработка современного программного комплекса для проведения и регистрации результатов ГИС при поисках, разведке и эксплуатации урановых месторождений.

5. Экспериментальное опробование разработанного аппаратурного, методического и программно-математического обеспечения на действующих месторождениях уранодобывающих предприятий.

Научная новизна

1. Разработана методика автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа, позволяющая удовлетворительно решать задачу литологического расчленения разреза рудного горизонта с получением послойных значений коэффициента фильтрации пород.

2. Разработаны методические дополнения к существующей методике автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа, программная реализация которых позволяет повысить точность подсчета извлекаемых запасов урана применительно к месторождениям инфильтрационного типа.

Практическая значимость работы

Разработанные аппаратура, методическое и программное обеспечение регистрации и интерпретации результатов комплекса методов ГИС внедрены и успешно эксплуатируются в разных составах на добычных и геологоразведочных предприятиях России, Республики Казахстан, Республики Узбекистан и на геологоразведочных предприятиях Объединённой Республики Танзания.

Полученные результаты могут быть использованы при подготовке новой редакции «Инструкции по каротажу при поисках и разведке урановых месторождений».

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Методика построения корреляционной зависимости нормированного геофизического параметра и коэффициента фильтрации пород рудного горизонта и применения этой зависимости для автоматизированной литологической интерпретации данных электрокаротажа.

2. Методика морфологического объединения рудных пересечений при автоматизированной количественной интерпретации данных гамма-каротажа.

3. Усовершенствованный программно-методический и аппаратно-технический комплекс для автоматизированной регистрации и интерпретации данных ГИС инфильтрационных месторождений урана, обрабатываемых методом ПВ.

Личный вклад

Решение различных вопросов, связанных с геофизическим обеспечением добычи урана на месторождениях, обрабатываемых методом ПВ – основное направление деятельности автора в период с 2000 года по настоящее время. За этот период, помимо представляемой работы, был решен ряд задач, связанных с проведением, регистрацией и интерпретацией результатов ГИС. Автор принимал непосредственное участие в разработке, производстве и внедрении усовершенствованных методик, программно-математического обеспечения, геофизической аппаратуры и оборудования.

Апробация результатов

Результаты выполненной работы доложены на следующих конференциях:

1. Конференция молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 2002 г.

2. Конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва, 2013 г.
3. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» ПГНИУ, Пермь, 2015 г.
4. Международная геолого-геофизическая конференция «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии», Москва, 2018 г.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 публикациях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК для предоставления основных научных результатов диссертации, 3 – в сборниках трудов и тезисов конференций и прочих изданиях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 141 страница текста, включая 51 рисунок, 5 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 21 наименование.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. В.Н. Конешову за помощь на всех этапах выполнения работы, а также выражает признательность руководству НАК «Казатомпром», ГК НГМК, ООО «Геофизсервис», АО «Русбурмаш» за поддержку и содействие в выполнении этой работы. За консультации и помощь в сборе материала во время работы над диссертацией автор благодарит С.Н. Василенко, А.В. Киселева, А.В. Легавко, А.Р. Миносьянца, М.Ю. Ревва, С.Н. Тригубова, В.Г. Язикова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, отражена практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Анализ особенностей комплекса методов геофизических исследований скважин, применяемого при отработке инфильтрационных месторождений урана методом подземного выщелачивания.

В первой главе дан анализ типового комплекса методов ГИС, применяемых на урановых месторождениях, обрабатываемых методом ПВ. Рассмотрены действующие методики проведения и интерпретации основных видов исследований, конструктивные особенности и недостатки существующей скважинной и наземной аппаратуры, недостатки программного обеспечения для регистрации и интерпретации данных ГИС. На основе проведенного анализа сформулированы задачи усовершенствования аппаратного и программно-методического комплекса регистрации и интерпретации данных ГИС.

В разделе 1.1 приведено схематическое описание процесса ПВ, дана краткая характеристика геоморфологических особенностей пластово-инфильтрационных месторождений урана, показана исключительная роль буровых скважин и их геофизических исследований в процессе разведки и отработки месторождений.

В разделе 1.2 рассмотрены основные особенности проведения геологических, гидрогеологических и геофизических исследований на разных этапах изучения инфильтрационных месторождений – от детальной разведки до сооружения и эксплуатации добычных блоков.

В разделе 1.3 рассматривается комплекс основных методов геофизических исследований, проводимых в открытом стволе сооружаемых скважин для решения геологических задач эксплуатационной разведки вскрываемых рудных залежей. Основными видами ГИС, требующими количественной оценки результатов, являются метод гамма-каротажа, по результатам которого подсчитываются запасы урана, и методы электрокаротажа, по результатам которых осуществляют литологическое расчленение разреза рудного горизонта и определяют фильтрационные характеристики пород. Так же рассматривается комплекс дополнительных методов ГИС для решения задач контроля за сооружением и эксплуатацией технологических скважин.

Раздел 1.4 посвящен анализу технических особенностей скважинной и наземной геофизической аппаратуры, функциональных и методических особенностей программного обеспечения регистрации и интерпретации, используемых на уранодобывающих предприятиях.

Парк скважинных приборов уранодобывающих предприятий разнообразен. В эксплуатации находятся приборы разных производителей и поколений. Значительная часть из них характеризуется устаревшими схмотехническими и конструкторскими решениями, низкой надежностью, плохой ремонтпригодностью и несоответствием метрологическим стандартам. Аналогична ситуация и с каротажными регистраторами. Однако самой слабой составляющей программно-аппаратного комплекса является программное обеспечение.

Существующий комплекс программ для проведения каротажных исследований и регистрации их результатов чрезвычайно устарел и обладает целым рядом функциональных, методических и алгоритмических ограничений, делающих его применение не эффективным.

Специализированного программного обеспечения для интерпретации данных ГИС на месторождениях урана практически не существует. Решение же двух основных задач геофизического обеспечения – литологического расчленения разреза рудного горизонта с определением послойного коэффициента фильтрации пород по данным электрокаротажа и расчета запасов урана по данным гамма-каротажа – требует максимально возможной автоматизации интерпретационных процессов.

Однако до сих пор не предложено ни одной простой и эффективной методики автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа, позволяющей оперативно расчленять песчано-глинистый разрез с достоверным определением значений коэффициента фильтрации пород.

Алгоритм автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа существует, но опыт его применения на инфильтрационных месторождениях показывает значительное систематическое занижение извлекаемых запасов.

Выводы по первой главе:

1. При отработке инфильтрационных месторождений урана методом ПВ, геофизические исследования скважин являются практически единственным источником получения геологической информации, необходимой для решения вопросов, связанных с их эксплуатацией.

2. Огромные объемы ГИС и высокая значимость их результатов требуют максимально возможной формализации методик и автоматизации процессов регистрации и интерпретации данных каротажа.

3. Необходима разработка методики и программного обеспечения для автоматизированного литологического расчленения разреза рудного горизонта с получением попластовых фильтрационных характеристик пород по комплексу методов электрокаротажа.

4. Необходимо провести анализ существующей методики автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа для выявления причин систематического занижения расчетных извлекаемых запасов на месторождениях урана инфильтрационного типа, разработать методические дополнения к существующей методике и программное обеспечение для автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа.

5. Для повышения уровня автоматизации, надежности аппаратуры, качества результатов каротажных исследований необходима разработка усовершенствованных скважинных приборов, наземного каротажного регистратора и программного комплекса проведения и регистрации ГИС при поисках, разведке и эксплуатации урановых месторождений.

Глава 2. Разработка методики автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа.

Во второй главе рассматриваются предлагаемые методические приемы, позволяющие решать задачу оперативной автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа в части литологического расчленения разреза продуктивного горизонта и определения значений коэффициента фильтрации выделенных пластов.

В разделе 2.1 рассматривается существующая методика применения электрокаротажа на инфильтрационных месторождениях урана. Для литологического расчленения разреза и оценки фильтрационных свойств пород и руд применяют два вида электрокаротажных исследований: метод кажущегося сопротивления (КС) и метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС).

Между сопротивлением осадочных пород и их глинистостью, а также между диффузионно-абсорбционной активностью и глинистостью пород существуют определённые корреляционные связи. Изучение корреляционных связей проводится по сопоставлению результатов гранулометрических анализов керновых проб и результатов электрокаротажа на этапе разведки месторождения. По результатам сопоставления строятся корреляционные графики $\rho_{II} = f(C_{21})$ и $\Delta U_{ПС} = f(C_{21})$. Также изучаются корреляционные связи между глинистостью и проницаемостью пород.

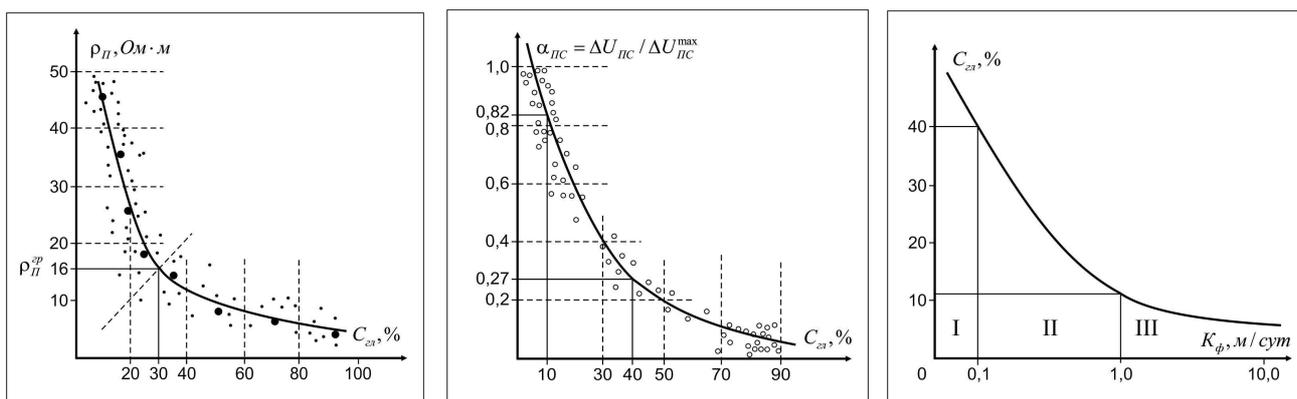


Рис. 1. Примеры графиков корреляционных зависимостей между электрическим сопротивлением пластов ρ_{II} и глинистостью пород C_{21} (слева), между относительной амплитудой ПС и глинистостью пород C_{21} (в центре), между глинистостью пород C_{21} и коэффициентом фильтрации K_{ϕ} (справа).

По результатам гранулометрического анализа керна в каждом продуктивном горизонте месторождения выделяют следующие литологические типы, каждый из которых характеризуется определенным диапазоном фракций частиц доминирующего класса: глина – менее 0,005 мм, алевролит – от 0,005 до 0,05 мм, тонкозернистый песок – от 0,05 до 0,1 мм, мелкозернистый песок – от 0,1 до 0,25 мм, среднезернистый песок – от 0,25 до 0,5 мм, крупнозернистый песок – от 0,5 до 1,0 мм, гравий – от 1 до 20 мм.

Для каждого выделенного литотипа пород на основании эмпирических формул рассчитывают коэффициент фильтрации и определяют его граничные значения. Расчетные значения коэффициента фильтрации являются приближенными, так как не полностью учитывают особенности естественного залегания, текстур и структур пород. Опыт работ показывает, что коэффициент фильтрации песков обычно составляет более 1 м/сут, а глинистых песков и песчаников на слабом глинистом цементе – 0,1 – 1 м/сут. Обычно значение коэффициента фильтрации равно 1 м/сут принимаю граничным для разделения пород на проницаемые и непроницаемые литологические разности.

Интерпретацию данных электрокаротажа технологических скважин, сооружаемых при отработке месторождения, осуществляют на основе результатов опытно-методических работ, полученных на этапе разведки, стандартными методами графической интерпретации, используя корреляционные зависимости и типовые геоэлектрические разрезы. При этом возникает ряд сложностей в применении описанной методики, обусловленных следующими причинами.

При непрерывной деятельности полигона, в условиях высокой насыщенности месторождения различными промышленными электроустановками и постоянной циркуляции в рудном горизонте технологических растворов возникают интенсивные помехи разного рода, искажающие результаты каротажа ПС. Поэтому литологическое расчленение и определение коэффициентов фильтрации осуществляют в основном по данным каротажа КС.

Интерпретация данных электрокаротажа КС на основе корреляционных зависимостей сопротивления и коэффициента глинистости пород и данных о коэффициенте фильтрации пород, полученных по результатам гранулометрического анализа, позволяет лишь качественно разделять породы на проницаемые и непроницаемые. Количественное определение коэффициентов фильтрации выделенных пластов по описанной методике не дает надежных результатов, поскольку само определение коэффициентов фильтрации при гранулометрическом анализе дает приближенные значения.

Кроме того, результаты определения литологических границ и коэффициентов фильтрации методами ручной интерпретации сильно подвержены ошибкам, вызванным слабой формализацией интерпретационного процесса и субъективизмом интерпретатора.

Указанные причины приводят к повсеместной практике упрощенной литологической интерпретации с определением только границ, разделяющих породы на проницаемые и непроницаемые. Дифференциация проницаемых пластов по величине коэффициента фильтрации и определение его значений не осуществляется.

В разделе 2.2 описывается предлагаемая усовершенствованная методика использования результатов гранулометрического анализа керновых проб для автоматизированного определения коэффициента фильтрации пород по данным электрокаротажа КС.

Для обеспечения автоматизации интерпретационного процесса и количественного определения послойных значений коэффициента фильтрации предлагается перейти от корреляционных зависимостей, связывающих электрические параметры пород с их глинистостью к зависимостям, связывающим электрические параметры непосредственно с

коэффициентом фильтрации пород. Построение корреляционной зависимости между коэффициентом фильтрации и сопротивлением пород рудного горизонта возможно разными способами – либо по зависимости сопротивления и глинистости пород и зависимости глинистости и коэффициента фильтрации пород, либо по литологическим таблицам пород рудного горизонта, в которых даны средние значения сопротивления и коэффициента фильтрации различных литологических разностей. В любом случае корреляционная зависимость сопротивления и коэффициента фильтрации, построенная по результатам гранулометрического анализа, назовем её исходной, всегда будет носить приближенный характер. Такую зависимость необходимо уточнять и верифицировать.

Для уточнения и верификации зависимости могут быть использованы данные гидрогеологических исследований опорных гидрогеологических скважин, проводимых на этапе разведки месторождения. В каждой такой скважине в интервале рудного горизонта проводятся опытные откачки, по результатам которых определяют значение интегрального фильтрационного параметра – коэффициента водопроницаемости пород в интервале установки скважинного фильтра.

Применив исходную корреляционную зависимость для интерпретации данных электрокаротажа опорной скважины и определив с её помощью послойные значения коэффициента фильтрации пород в пределах рудного горизонта, рассчитаем коэффициент водопроницаемости в интервале установки скважинного фильтра. Сравнивая расчетное значение коэффициента водопроницаемости со значением, определенным по данным опытных откачек, будем корректировать исходную зависимость с целью достижения соответствия расчетных результатов последующих интерпретаций и эмпирических данных. Зависимость, при которой результат интерпретации совпадает с результатами гидрогеологических исследований, является искомой и может быть использована для интерпретации данных электрокаротажа эксплуатационных скважин в пределах распространения рудного тела, на опорной скважине которого была проведена корректировка зависимости.

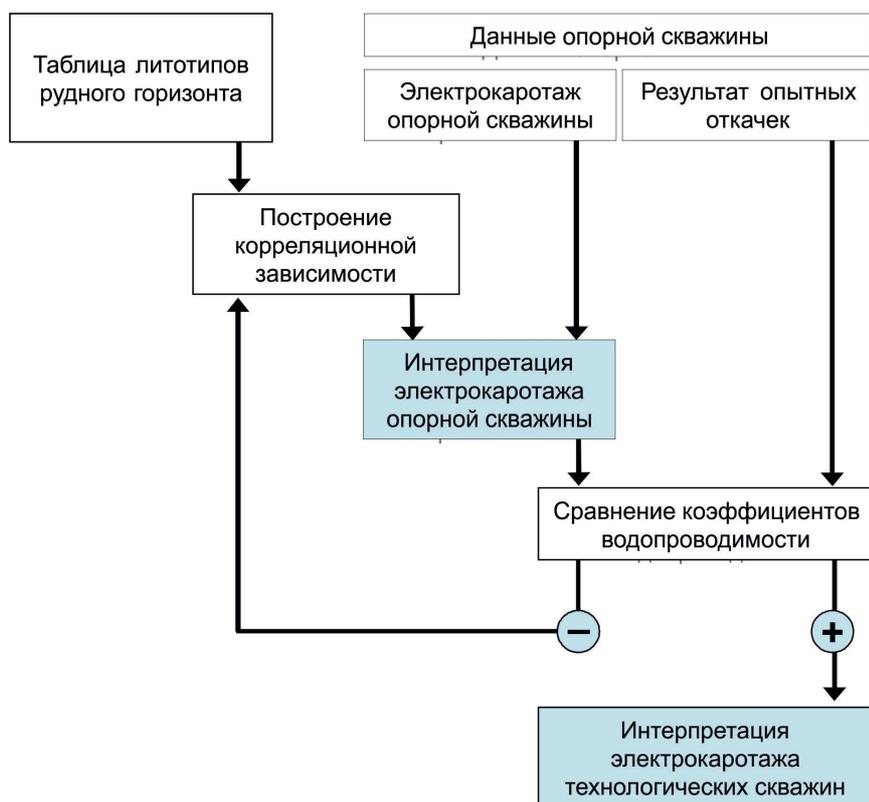


Рис.2. Блок схема методики настройки корреляционной зависимости и ее применения для интерпретации данных электрокаротажа.

В связи с необходимостью увязывать и сопоставлять данные каротажа технологических скважин с каротажными материалами по опорным скважинам предлагается применять нормирование данных каротажа КС способом двойного разностного параметра. Нормирование диаграмм КС только на кажущееся сопротивление глин, широко используемое в практике электрокаротажа, вызывает ошибки при сопоставлении разведочных и эксплуатационных каротажных данных. Режим бурения и свойства используемых буровых растворов существенно отличаются на этапах разведки и эксплуатации, а это приводит к значительному изменению удельного сопротивления пород в области непосредственно примыкающей к скважине.

Соответственно, первый шаг работы с разведочными данными – переход от значений кажущегося сопротивления нормированного на сопротивление глин к относительным значениям нормированного геофизического параметра α_ρ , определяемого по формуле:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_k - \rho_k^{\min}}{\rho_k^{\max} - \rho_k^{\min}}, \quad (1)$$

где ρ_k – значения кажущегося сопротивления; ρ_k^{\min} и ρ_k^{\max} – границы интервала нормировки.

При таком способе границы интервала нормировки выбираются соответствующими кажущемуся сопротивлению двух пластов хорошо выдержанных по всей площади распространения рудного тела в низкоомной и высокоомной части разреза.

Границы интервала нормировки будем определять для каждой конкретной залежи месторождения по результатам анализа кривых кажущегося сопротивления опорных гидрогеологических скважин и общих геологических данных о строении рудного горизонта. Для низкоомной части разреза границей нормировки, в подавляющем числе случаев, будет служить «линия глин». Пласты глин практически всегда встречаются в разрезе рудного горизонта в качестве нижнего и верхнего водоупорного интервала, обычно имеют значительную мощность, хорошо выдержаны по площади распространения рудного тела и характеризуются наименьшими значениями кажущегося сопротивления.

В высокоомной части ситуация несколько сложнее. В разрезе рудного горизонта инфильтрационных месторождений редко встречаются хорошо выдержанные по мощности пласты высокого сопротивления. Часто высокопроницаемые породы, характеризующиеся максимальными значениями кажущегося сопротивления, встречаются в виде чередующихся прослоев нестабильной мощности и выклинивающихся линз. Эти особенности не позволяют осуществлять нормировку по максимальному кажущемуся сопротивлению. Поэтому для определения верхней границы интервала нормировки предлагается использовать уровень среднего кажущегося сопротивления пачки наиболее высокопроницаемых пород рудного горизонта, стабильно присутствующих в разрезе.

После определения нормирующих значений осуществим построение в текущих условиях нормировки исходной корреляционной зависимости параметра α_ρ и коэффициента фильтрации. Для этого средние значения сопротивления литологических разностей рудного горизонта пересчитываем в значения нормированного параметра α_ρ и вместе со средними значениями коэффициента фильтрации выносим на график. По оси абсцисс откладываем значения K_ϕ , а по оси ординат соответствующие им значения α_ρ . Через точки, связывающие средний коэффициент фильтрации пород с соответствующими ему значениями α_ρ , проводим гладкую кривую, получая исходную корреляционную зависимость $\alpha_\rho = f(K_\phi)$ (рис. 3).

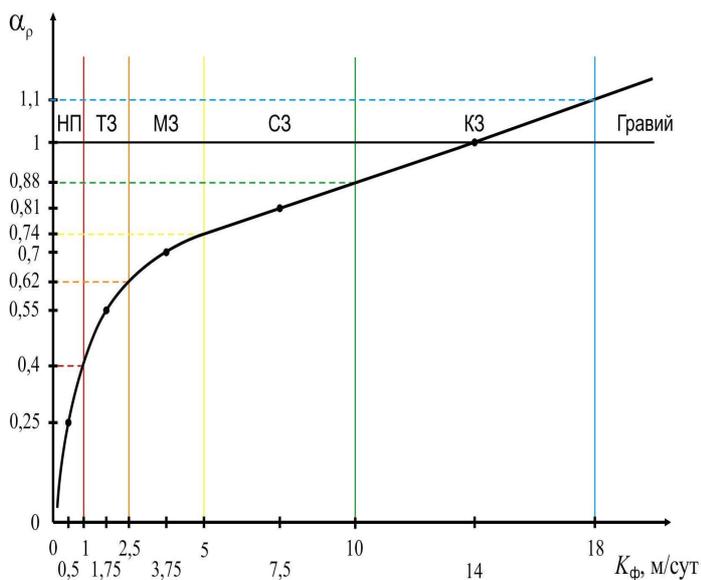


Рис. 3. Пример исходной корреляционной зависимости между нормированным геофизическим параметром α_ρ и коэффициентом фильтрации пород K_ϕ . Выделенные точки на графике соответствуют средним значениям α_ρ и K_ϕ для литотипов пород продуктивного горизонта. Горизонтальная линия $\alpha_\rho = 1$ – верхняя граница нормировки; вертикальные линии – границы между литотипами по коэффициенту фильтрации (НП – непроницаемые породы, МЗ, ТЗ, СЗ, КЗ – мелко-, тонко-, средне- и крупнозернистые пески).

Так как зависимость носит приближенный характер, для обеспечения автоматизации вычислений и реализации возможности управления её параметрами предложено использовать зависимость в упрощенном виде, используя её кусочно-линейную аппроксимацию в границах электрических и фильтрационных параметров, выделяемых литологических разностей.

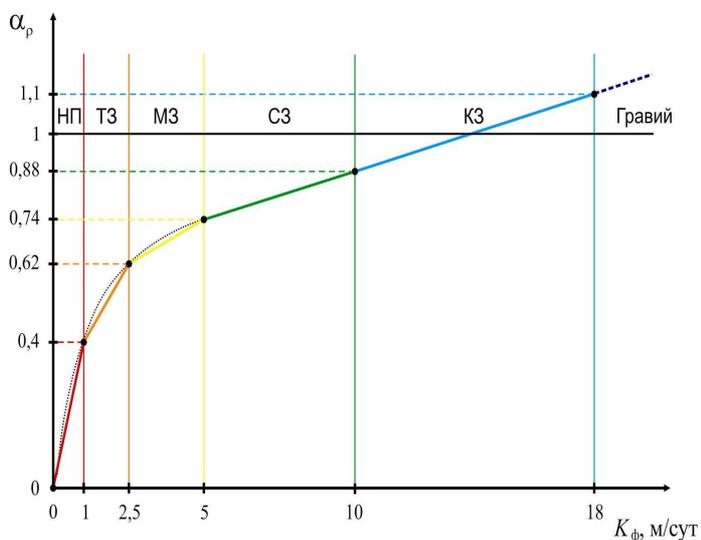


Рис.4. Пример кусочно-линейной аппроксимации корреляционной зависимости между нормированным геофизическим параметром α_ρ и коэффициентом фильтрации пород K_ϕ . Выделенные точки на графике соответствуют граничным значениям α_ρ и K_ϕ для литотипов пород продуктивного горизонта.

Таким образом, на основе построенной зависимости $\alpha_\rho = f(K_\phi)$ получена таблица пар чисел, отображающая связь граничных значений коэффициента фильтрации K_ϕ , по которым породы горизонта делятся на различные технологические литотипы, с соответствующими им граничными значениями нормированного геофизического параметра α_ρ , называемая далее таблица связи граничных значений α_ρ и K_ϕ (см. таблицу 1).

Для настройки таблицы связи, при интерпретации данных электрокаротажа опорной скважины, предложено организовать интерфейс доступа к граничным значениям нормированного параметра α_ρ . При изменении граничных значений α_ρ , изменяется

зависимость $\alpha_\rho = f(K_\phi)$ без изменения заданных граничных значений коэффициента фильтрации разных геотехнологических литотипов.

Таблица 1. Пример таблицы связи граничных значений α_ρ и K_ϕ технологических литотипов пород рудоносного горизонта.

Литотип	НП	МЗ	ТЗ	СЗ	КЗ	Гравий
α_ρ	0	0,4	0,62	0,74	0,88	1,1
K_ϕ , м/сут	0	1	2,5	5	10	18

Для автоматического определения границ литологических интервалов, электрических и фильтрационных характеристик выделяемых пластов предложен следующий алгоритм.

1. Последовательно пробегая по точкам кривой кажущегося сопротивления, рассчитывается значение градиента кажущегося сопротивления на интервале между двумя соседними точками. Для кривых, зарегистрированных градиент-зондами, выставляются границы элементарных пластов в каждой точке экстремума каротажной кривой, то есть в точках перемены знака градиента кажущегося сопротивления. Для кривых, зарегистрированных потенциал-зондами, границы элементарных пластов выставляются в точках максимума градиента, находящихся на интервалах между двумя точками экстремума.

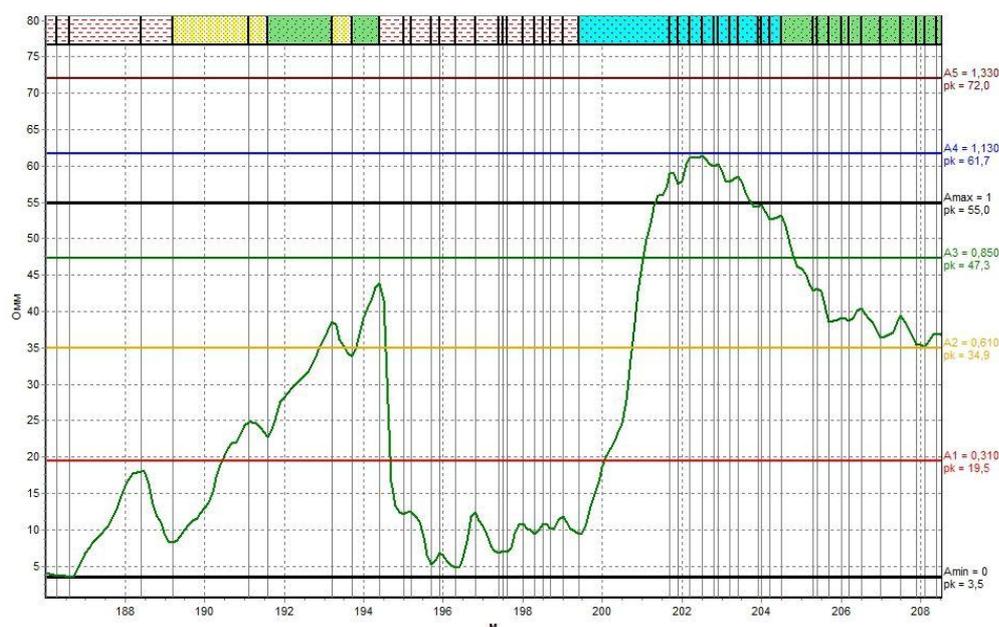


Рис. 5. Пример автоматического определения границ элементарных пластов для кривой каротажа КС, полученной подошвенным градиент зондом.

2. Определяются значения сопротивления ρ_Π каждого выделенного элементарного пласта. Сопротивление пласта вычисляются как среднее значение кажущегося сопротивления по всем точкам записи, попадающим в границы пласта. Далее сопротивления элементарных пластов переводятся в значения нормированного параметра α_ρ по формуле:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_\Pi - \rho_\kappa^{\min}}{\rho_\kappa^{\max} - \rho_\kappa^{\min}}, \quad (2)$$

где ρ_Π – сопротивление выделенного элементарного пласта; ρ_κ^{\min} и ρ_κ^{\max} – границы интервала нормировки (опорные значения кажущихся сопротивлений).

3. Значения нормированного параметра α_p каждого элементарного пласта пересчитываются в значения коэффициента фильтрации с использованием кусочно-линейно аппроксимированной зависимости $\alpha_p = f(K_\phi)$.

4. Элементарные пласты объединяются в литологические. Объединению подлежат соседние элементарные пласты, значения параметров (α_p и K_ϕ) которых находятся в границах одного технологического литотипа согласно таблице связи граничных значений α_p и K_ϕ . В границах объединенных пластов рассчитывается средний коэффициент фильтрации по формуле:

$$K_\phi = \frac{\sum_{i=1}^N K_{\phi i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad (3)$$

где $K_{\phi i}$ – значение коэффициента фильтрации i -го элементарного пласта; m_i – мощность i -го элементарного пласта; N – число объединяемых элементарных пластов.



Рис. 6. Пример объединения элементарных пластов, относящихся к одним геотехнологическим литотипам.

Результатом интерпретации, выполненной по описанному алгоритму, является литологический разрез рудного горизонта, в котором для каждого выделенного пласта определены его геотехнологический литотип, среднее значения нормированного параметра α_p и среднее расчетное значение коэффициента фильтрации K_ϕ .

Для сопоставления результатов интерпретации данных электрокаротажа опорной гидрогеологической скважины с результатами проведенных в ней опытных откачек осуществим расчет коэффициента водопроводимости пород в интервале установки скважинного фильтра. Полученное расчетное значение сравним со значением, полученным по результатам опытных откачек. Если разница значений превышает пять процентов, то корректируем корреляционную зависимость α_p и K_ϕ и повторяем интерпретацию.

Корректировку зависимости осуществляем, плавно изменяя граничные значения нормированного параметра α_p для границ разных геотехнологических литотипов. При изменении параметров зависимости следим за тем, чтобы в целом не видоизменялась форма кривой зависимости. Кроме того, недопустимы такие изменения, при которых суммарные мощности проницаемых и непроницаемых пород рудного горизонта, определенные по результатам интерпретации, отличаются от суммарных мощностей, определенных по данным анализа керна, на величину более 10 %.

При достижении удовлетворительных результатов интерпретации данных электрокаротажа опорной гидрогеологической скважины, уточненная корреляционная зависимость может использоваться для автоматизированной интерпретации по описанному алгоритму данных электрокаротажа рядовых технологических скважин, вскрывающих тот же рудный горизонт месторождения, что и опорная скважина. Изменение параметров уточненной зависимости при этом недопустимо, а границы интервала нормировки (опорные значения кажущегося сопротивления ρ_k^{\min} и ρ_k^{\max}) должны определяться строго по аналогии с их определением при построении исходной зависимости и интерпретации данных электрокаротажа опорной скважины.

В разделе 2.3 описывается разработанное автором программное приложение для автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа КС, реализующее предлагаемые методический подход и алгоритм.

Приложение имеет графический интерфейс, построенный на основе стандартных визуальных компонентов Windows. Основную часть главного окна программы занимает планшет, предназначенный для отображения обрабатываемых каротажных диаграмм, вспомогательных данных и результатов интерпретации.

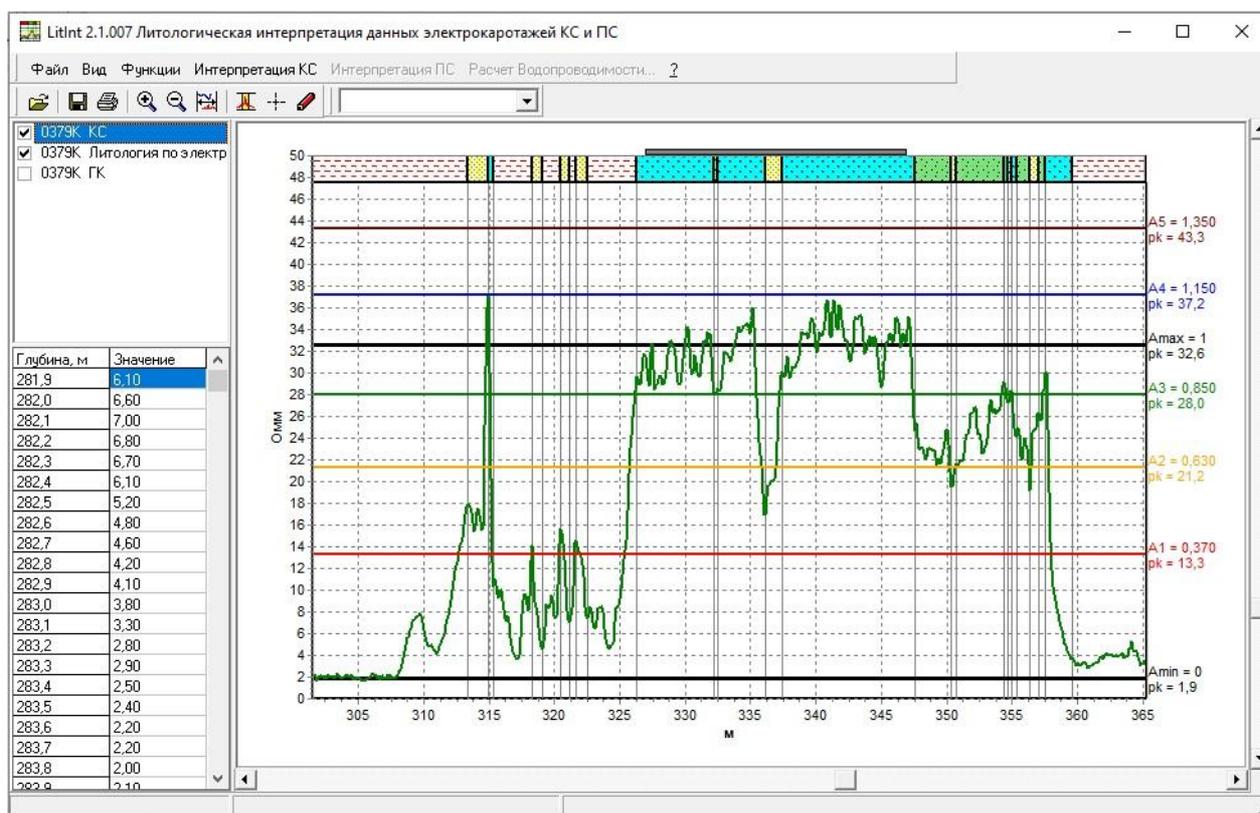


Рис. 7. Главное окно программы интерпретации электрокаротажа.

Для задания приложению таблицы связи граничных значений α_p и K_ϕ , опосредующей корреляционную зависимость, используется окно, отображающее в табличном и графическом виде текущую таблицу связи. Пользователь может описывать таблицы, состоящие из любого количества литотипов, на которые необходимо расчленять разрез рудного горизонта.

Границы интервала нормировки и таблица связи граничных значений отображаются на планшете в виде линий, параллельных оси глубин, отрисовываемых поверх кривой каротажа (см. рисунок 7). Линии таблицы связи имеют смысл граничных значений коэффициента фильтрации. Перемещая их вдоль оси сопротивлений, интерпретатор может менять граничные значения параметра α_p , изменяя, таким образом, корреляционную зависимость α_p и K_ϕ . При этом наглядно визуализируется связь между кривой кажущегося сопротивления и таблицей связи граничных значений, по которой осуществляется литологическое расчленение разреза. При перемещении линий нормировки линии таблицы связи автоматически перемещаются на новый уровень, соответствующего им в новых границах нормирования значения α_p .

В процессе автоматической интерпретации программа обрабатывает описанный в пункте 2.2 алгоритм и отрисовывает в верхней части планшета полученный в результате интерпретации литологический разрез. Для каждого выделенного пласта в литологическом разрезе определены его границы, мощность, литотип и средний коэффициент фильтрации.

В разделе 2.4 приведены результаты экспериментального опробования методики и программного обеспечения автоматизированной интерпретации на примере данных по основному рудовмещающему горизонту месторождения Канжуган, расположенного в южном Казахстане и являющегося типичным представителем урановых месторождений инфильтрационного типа.

Основываясь на данных разведки месторождения в виде таблицы литотипов уюкского рудного горизонта, данных электрокаротажа КС опорной гидрогеологической скважины и результатов опытных откачек построена и скорректирована корреляционная зависимость и таблица связи граничных значений α_p и K_ϕ . Таблица связи использована для интерпретации данных электрокаротажа технологических скважин в пределах распространения залежи 5у уюкского горизонта. Сравнение результатов интерпретации с фактическими данными о водопроницаемости пород, полученными при эксплуатации скважин, показало более чем удовлетворительную сходимость результатов – расчетные значения коэффициента водопроницаемости в интервалах установки скважинных фильтров отличаются от фактических на величину, не превышающую 5–10%.

Выводы по второй главе:

1. Разработана методика построения на основе данных гранулометрического анализа зерна корреляционной зависимости между коэффициентом фильтрации и нормированным геофизическим параметром, её настройки с использованием гидрогеологических данных и использования для автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа.

2. Разработанный алгоритм автоматизированной интерпретации диаграмм электрокаротажа КС позволяет быстро и эффективно производить литологическое расчленение разреза рудного горизонта с получением послойных значений коэффициента фильтрации.

3. Разработанные методические приемы позволяют удовлетворительно решать задачу оперативной автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа технологических скважин урановых месторождений инфильтрационного типа.

Глава 3. Совершенствование существующей методики автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа.

В третьей главе приводится анализ существующего алгоритма автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа с целью выявления причин систематического занижения расчетных извлекаемых запасов на инфильтрационных месторождениях урана. Показана необходимость проведения морфологического объединения рудных интервалов. Предложен алгоритм дополнительных вычислительных процедур, направленных на формирование по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов.

В разделе 3.1 проанализирован существующий инструктивный алгоритм автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа, реализующий двухэтапный процесс вычислений. На первом этапе вычисляют концентрацию радия вдоль ствола скважины, на втором этапе находят границы рудных интервалов и рассчитывают содержание в них урана.

Концентрацию радия в точках x_n вдоль ствола скважины получают реализацией счета по формуле:

$$C_{Ra}(x_n) = \frac{P_{Rn}}{K_0 \cdot P_m \cdot P_H} \sum_{k=-N}^N B_k \cdot I(x_n + k\Delta) - C_{ThK}, \quad (4)$$

где K_0 – пересчетный коэффициент скважинного прибора; P_m – поправочный коэффициент на поглощение гамма-излучения промывочной жидкостью; P_{Rn} – поправка на нарушение радиоактивного равновесия между радоном и радием («отжатие радона»); P_H – поправка на влажность руды; $I(x_n + k\Delta)$ – результаты измерений гамма-излучения в точках $x = x_n + k\Delta$, мкР/ч; Δ – шаг квантования по глубине; B_k – коэффициенты цифрового фильтра, зависящие от плотности руды, конструкции скважины и скважинного прибора; N – число точек цифрового фильтра с коэффициентами B_k ; C_{ThK} – поправка на наличие в рудах тория и калия.

Первый этап может вносить лишь незначительный вклад в формирование систематической ошибки при подсчете запасов. Во-первых, опыт применения такой методики на эндогенных («коренных») месторождениях говорит о достаточной ее надежности. Во-вторых, методики определения поправочных коэффициентов четко формализованы и обеспечивают правильность их использования. Погрешности определения поправочных коэффициентов не велики, причем обычно они не имеют систематического характера. Поэтому причины систематического занижения расчетных значений запасов урана на инфильтрационных месторождениях необходимо искать в алгоритме второго этапа интерпретации.

Границы рудных интервалов и содержание в них урана определяют в зависимости от типа месторождения. На месторождениях эндогенного типа вблизи рудных тел отсутствуют радиевые ореолы, приводящие к изменению коэффициента радиоактивного равновесия K_{pp} у границ рудных интервалов. Значения содержания радия, вычисленные по формуле (4), делят на K_{pp} , получая кривую содержания урана. Границы рудных интервалов устанавливают по кондиционному бортовому содержанию урана.

Алгоритм выделения рудных интервалов, предложенный в инструкции для инфильтрационных месторождений, которые характеризуются наличием радиевых ореолов, базируется на классическом представлении о строении ролловой ураноносной залежи и для

определения границ рудных по урану интервалов используется зависимость бортового содержания радия от среднего содержания радия в рудном интервале. Графики таких зависимостей строят на этапе разведки месторождений по данным радиологического опробования керна в граничных зонах для каждой отдельной залежи.

При выделении рудного интервала, в предварительно определённых границах, подсчитывается значение среднего содержания радия. По зависимости бортового содержания радия от среднего определяется бортовое содержание радия для выделяемого интервала и его границы переопределяются в условиях нового бортового содержания. Такая процедура позволяет исключать из контура рудного пересечения радиевые ореолы.

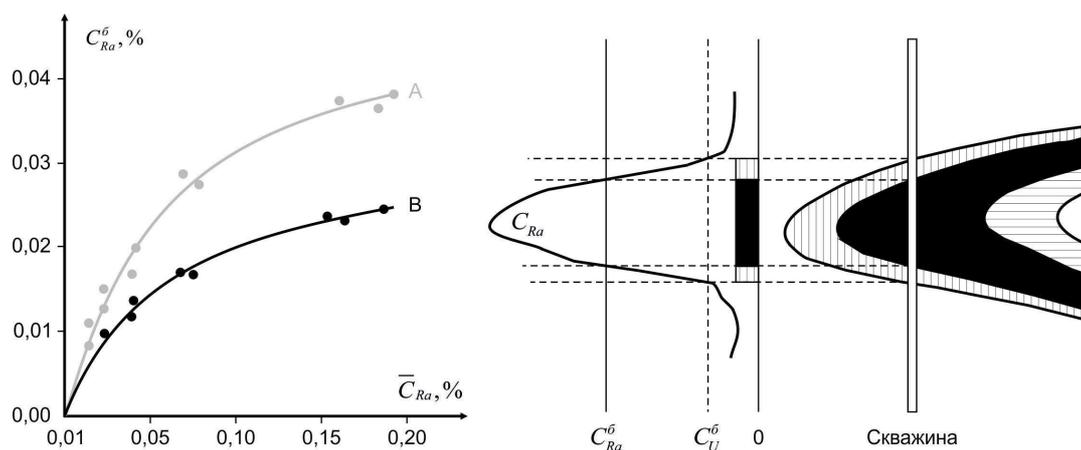


Рис. 8. График зависимости бортового содержания радия от его среднего содержания в рудном интервале и схема, иллюстрирующая использование зависимости при определении границ рудного интервала для ролловой ураноносной залежи.

Не оспаривая в общем виде положение о наличии радиевых ореолов и необходимости их отсечения, следует отметить, что морфология рудных залежей инфильтрационных месторождений обычно много сложнее схематического представления “классического” ролла. По фронту залежи часто развиваются языки и апофизы уранового оруденения, характеризующиеся слабым развитием радиевых ореолов и принадлежностью к одному элементу рудного тела. Довольно часто вдоль скважины наблюдается ситуация, когда мощный интервал богатых балансовых руд сопровождается ореолом бедных и маломощных интервалов. Обычно эти интервалы морфологически относятся к одной рудной залежи и на небольшом расстоянии от скважины могут сливаться в единое тело.

Существенный недостаток инструктивного алгоритма состоит в исключении из подсчета запасов урана, содержащегося в пропластках, разделяющих условные рудные интервалы, морфологически принадлежащие одному рудному телу. Этот металл неминуемо подлежит извлечению в рамках контура закисления, охватывающего рудное тело, и должен быть учтен наравне с ураном балансовых пересечений.

В разделе 3.2 представлена предлагаемая методика формирования по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов.

Основным морфологическим параметром будет являться максимально допустимая мощность (L) безрудного слоя, разделяющего элементарные рудные интервалы, проверяемые на возможность объединения.

Кроме того, важным параметром является наличие непроницаемых пород в безрудном слое, разделяющем элементарные рудные интервалы, проверяемые на возможность объединения. Если в разрезе продуктивного горизонта месторождения часто встречаются маломощные прослои непроницаемых пород, не нарушающие морфологической цельности рудных тел, объединение рудных интервалов, разделенных непроницаемыми породами, может проводиться. При этом должна быть определена максимально допустимая мощность непроницаемого слоя (L_H), включаемого в рудный контур. Если же слои непроницаемых пород разделяют технологические этажи оруденения либо существенно нарушают технологический процесс ПВ, то объединение рудных интервалов с включением в рудный контур непроницаемых пород не допускается.

Основное геотехнологическое условие объединения рудных интервалов, удовлетворяющих морфологическим параметрам – среднее содержание урана во всем объединенном интервале должно быть не ниже кондиционного бортового.

Включение в объединенный интервал безрудного пропластка вместе с присоединяемым рудным вызывает снижение концентрации металла в присоединяемом интервале – «разубоживание». Для недопущения чрезмерного разубоживания вводится максимальный коэффициент разубоживания K_p . Дополнительное геотехнологическое условие – среднее содержание в присоединяемых рудном и безрудном интервалах должно быть не менее произведения кондиционного бортового содержания на максимальный коэффициент разубоживания.

Значения параметров L , L_H и коэффициента разубоживания K_p могут быть определены по результатам анализа материалов и результатов разведочных работ, геотехнологических характеристик месторождения и опыта эксплуатации его отдельных частей.

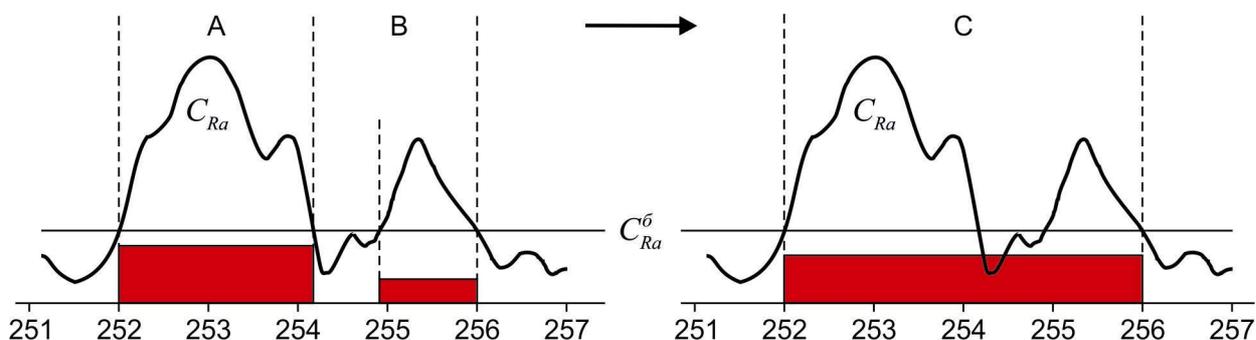


Рис. 9. Схематическое представление морфологического объединения рудных интервалов: A – основной интервал; B – присоединяемый интервал; C – объединенный интервал.

В ситуации, когда мощный интервал богатых балансовых руд сопровождается ореолом бедных и маломощных интервалов, формальное выполнение геотехнологических условий при объединении может обеспечиваться основным богатым интервалом, что может приводить к необоснованно сильному разубоживанию. Поэтому при объединении должна проверяться возможность присоединения “бедных” интервалов с меньшим значением линейного запаса mC (произведение мощности рудного интервала m на содержание в нем урана C) к более “богатым” с большим значением mC , но не наоборот.



Рис. 10. Алгоритм морфологического объединения рудных интервалов.

Таким образом, в ходе процесса объединения, в последовательности “богатые-бедные” интервалы, должны быть проверены на соответствие геотехнологическим условиям объединения все элементарные рудные интервалы, разделенные безрудными пропластками мощностью не более L , с непроницаемыми слоями мощностью не более L_H и элементарными рудными интервалами, содержания в которых недостаточно высоки, чтобы самостоятельно обеспечить условия присоединения к основному интервалу.

Алгоритм автоматизированной интерпретации предлагается строить на основе инструктивного алгоритма, используя усовершенствованные механизмы ввода поправочных коэффициентов и дополнительный алгоритм процедуры морфологического объединения рудных интервалов.

1. Расчет содержания радия вдоль ствола скважины осуществляется согласно инструкции по формуле (4).

2. Выделяются интервалы, внутри которых содержание радия больше или равно бортовому. В выделенных границах каждого интервала подсчитывается среднее содержание радия \bar{C}_{Ra} как среднее арифметическое значение содержаний радия в точках заключенных в границах этого интервала.

3. Для найденного значения \bar{C}_{Ra} по зависимости бортового содержания радия C_{Ra}^b от \bar{C}_{Ra} находится значение C_{Ra}^b , выделяется интервал, в котором содержание радия больше C_{Ra}^b и в границах этого интервала снова подсчитывается среднее значение содержания радия. Процедура по пункту 3 повторяется до тех пор, пока границы рудного интервала не перестанут изменяться. Эти границы определяют мощность элементарного рудного интервала.

4. Для расчета среднего содержания урана среднее содержание радия элементарных рудных интервалов делится на значение коэффициента радиоактивного равновесия K_{pp} .

5. После выделения всех элементарных рудных интервалов осуществляется процедура их морфологического объединения. Рассмотрение условий объединения элементарных рудных

интервалов начинается с нахождения основного интервала с наибольшим линейным запасом mC . Потенциально присоединяемые интервалы, удовлетворяющие морфологическим параметрам объединения, оцениваются на возможность объединения по геотехнологическим условиям. Если объединение рудных интервалов состоялось, начинается рассмотрение возможности нового объединения – определение интервала с наибольшим mC и выявление потенциально присоединяемых интервалов. Если объединение не состоялось, на предмет объединения рассматривается следующий (с меньшим значением mC) рудный интервал. Процесс продолжается до тех пор, пока на предмет объединения не будут рассмотрены все элементарные рудные интервалы.

6. После окончания процедуры объединения, на основе результатов литологической интерпретации данных электрокаротажа, осуществляется вычленение рудных интервалов, расположенных в непроницаемых породах – технологического забаланса.

7. Окончательно рассчитываются и заносятся в память ЭВМ мощности рудных интервалов, средние содержания и линейные запасы в них урана.

В разделе 3.3 описывается разработанное автором программное приложение для автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа, реализующее предложенный алгоритм.

Приложение имеет стандартный графический интерфейс, аналогичный интерфейсу приложения для интерпретации данных электрокаротажа. При открытии данных гамма-каротажа программа автоматически осуществляет открытие данных кавернометрии и литологической колонки. Пользователь может добавлять, удалять и редактировать зоны равного диаметра и литологические интервалы.

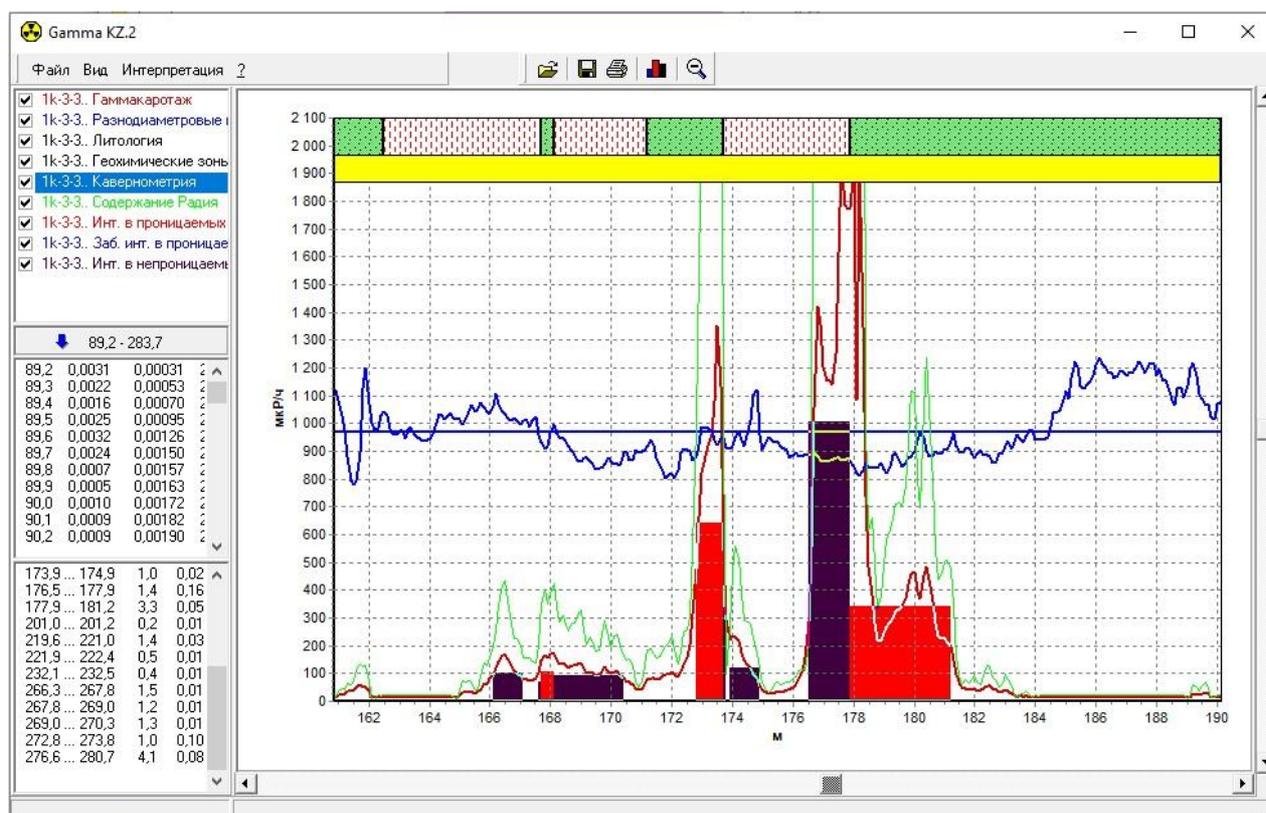


Рис. 11. Главное окно программы интерпретации гамма-каротажа.

Данные кавернометрии и зоны равного диаметра используются для ввода поправок за поглощение гамма-излучения буровым раствором и для выбора коэффициентов цифрового фильтра B_k . Поправки на поглощение гамма-излучения рассчитываются в каждой точке глубины в зависимости от диаметра скважины. Выбор коэффициентов B_k осуществляется для средних значений зон равного диаметра.

Литологическая колонка, полученная в результате интерпретации данных электрокаротажа или введенная вручную пользователем, используется в упрощенном виде – в виде разбиения разреза на проницаемые и непроницаемые породы. Разделение разреза по проницаемости используется для решения двух задач. Во-первых, для разделения рудных интервалов на балансовые (находящиеся в проницаемых породах и пригодные для извлечения урана методом ПВ) и технологически забалансовые (находящиеся в непроницаемых породах, извлечение урана из которых методом ПВ технологически невозможно). Во-вторых, для корректного ввода поправочных коэффициентов (влажность и плотность пород, поправка на отжатие радона), зачастую существенно отличающихся для проницаемых и непроницаемых пород.

Кроме границ зон равного диаметра и литологической колонки, пользователь имеет возможность задать границы геохимических зон разреза скважины. По умолчанию весь разрез скважины считается представленным восстановленными породами, что соответствует мешковой части рудной залежи. Геохимическая зональность разреза используется в двух направлениях. Во-первых, для выбора зависимости бортового содержания радия от среднего содержания радия в рудном интервале. Зависимости бортового от среднего строятся отдельно для восстановленных и окисленных пород, соответственно для каждой из границ рудного интервала выбирается своя зависимость, соответствующая геохимической зоне, в которую попадает граница интервала. Во-вторых, по расположению границ рудных интервалов в геохимических зонах определяется принадлежность рудных интервалов к морфологическим элементам рудной залежи и выбираются соответствующие им значения коэффициента радиоактивного равновесия.

Коэффициенты радиоактивного равновесия, поправочные коэффициенты и параметры вместе с настройками алгоритма интерпретации доступны в окне параметров интерпретации. Часть полей этого окна заполняется автоматически при чтении файла данных гамма-каротажа. Остальные поля заполняются оператором при настройке приложения для работы в условиях конкретной залежи конкретного месторождения.

В процессе интерпретации, полностью в автоматическом режиме, производятся: расчет содержания радия вдоль ствола скважины; определение границ элементарных рудных пересечений с использованием геохимической зональности и зависимостей бортового содержания радия от среднего; морфологическое объединение элементарных рудных пересечений; сортировка рудных интервалов на балансовые и технологически забалансовые, согласно литологической колонке скважины; расчет средних содержаний урана в выделенных интервалах и подсчет линейных запасов урана вдоль ствола скважины.

Полученные в результате интерпретации рудные интервалы отображаются на планшете главного окна программы в виде прямоугольников, ширина которых соответствует мощности рудных интервалов, а высота – среднему содержанию в них урана. Интервалы разных сортов руды отображаются разным цветом. Обычно балансовые интервалы – красным, а технологически забалансовые – черным.

В разделе 3.4 приведены обобщенные результаты экспериментального опробования морфологического объединения рудных интервалов на ряде характерных скважин различных инфильтрационных месторождений.

Сравнение результатов интерпретаций данных гамма-каротажа, проведенных с использованием алгоритма морфологического объединения и без него, показывает удовлетворительные результаты. При использовании процедуры объединения и корректном определении морфологических и геотехнологических параметров расчетные ствольные запасы урана в интервале рудного горизонта увеличиваются в среднем на 10-15 %.

Кроме того, благодаря процедуре объединения существенно упрощается морфология балансовых рудных пересечений, что позволяет более точно и оперативно решать задачи подсчета объемных запасов и выбора интервала установки скважинного фильтра.

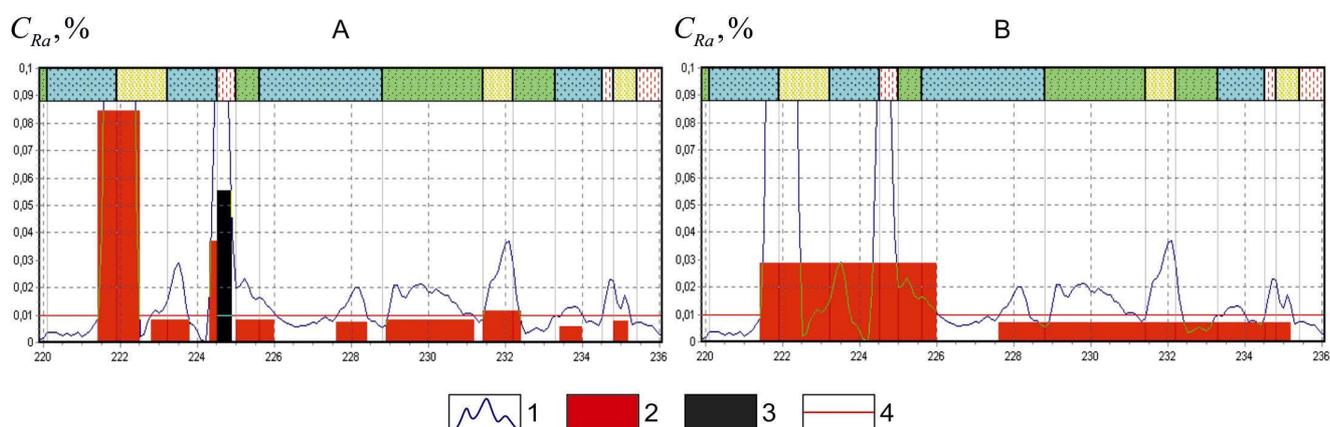


Рис. 12. Пример интерпретации гамма-каротажа с использованием морфологического объединения рудных интервалов (В) и без него (А): 1 – кривая содержания радия, 2 – интервалы балансовых руд, 3 – интервалы технологически забалансовых руд, 4 – бортовое содержание.

Выводы по третьей главе:

1. В результате анализа инструктивной методики автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа выявлена необходимость проведения дополнительных вычислительных процедур, направленных на морфологическое объединение рудных пересечений.

2. Предложены методические дополнения и алгоритм автоматизированного формирования по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов.

3. Программная реализация алгоритма морфологического объединения рудных интервалов позволяет повысить точность подсчета извлекаемых запасов урана применительно к месторождениям инфильтрационного типа.

Глава 4. Развитие аппаратного и программно-методического комплекса для проведения, регистрации и интерпретации геофизических исследований скважин инфильтрационных месторождений урана.

В четвертой главе приводится описание усовершенствованного аппаратного и программно-методического комплекса для проведения, регистрации и интерпретации геофизических исследований скважин инфильтрационных месторождений урана, разработанного при непосредственном участии автора.

В разделе 4.1 описывается разработанная при участии автора линейка современных скважинных приборов для нужд урановой геофизики. Это скважинные радиометры, электрзонды, термометр, резистивиметр, прибор индукционного каротажа. Все приборы выполнены по модульной схеме на современной элементной базе с применением микроконтроллеров и отличаются стабильностью метрологических характеристик, высокой надежностью и хорошей ремонтпригодностью.

В разделе 4.2 описывается разработанный при активном участии автора каротажный регистратор нового поколения. Регистратор построен на современных промышленных электронных компонентах, оснащен мощным источником питания, обеспечивает повышенное качество регистрации геофизических сигналов при очень высокой надежности и одновременном снижении эксплуатационных требований.

В разделе 4.3 описан разработанный лично автором программный комплекс для проведения каротажных исследований и регистрации их результатов с использованием разработанного регистратора. Программное обеспечение позволяет проводить весь спектр ГИС на урановых месторождениях различными типами скважинных приборов, обеспечивает высокую точность и повышенную степень автоматизации каротажных исследований.

В разделе 4.4 описан разработанный лично автором программный комплекс для проведения автоматизированной интерпретации основных видов каротажных исследований на инфильтрационных месторождениях урана и технология его применения. Пользовательский интерфейс программного комплекса позволяет настраивать параметры интерпретации и механизмы их использования для работы в условиях разных месторождений. Настройка программного комплекса – ответственный этап, требующий внимания высококвалифицированного специалиста. Применение настроенных программ для интерпретации данных каротажа эксплуатационных скважин – процесс практически полностью автоматизированный, в штатном режиме не требующий больших затрат времени и квалифицированного внимания.

Выводы по четвертой главе:

1. При участии автора разработана линейка современных скважинных приборов для нужд урановой геофизики, отличающихся повышенной надежностью и ремонтпригодностью, стабильностью метрологических характеристик.

2. При участии автора разработан современный каротажный регистратор, отличающихся высокой надежностью и повышенной точностью проведения каротажных исследований.

3. Автором разработан современный программный комплекс проведения каротажных исследований и регистрации их результатов, обеспечивающий высокий уровень автоматизации проводимых работ с одновременным расширением функциональных возможностей, повышением точности производимых измерений и облегчением функций управления и контроля над ходом геофизических исследований со стороны оператора.

4. На основе предложенных автором методики автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа и методических дополнений к инструктивной методике автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа разработан программно-методический комплекс, позволяющий осуществлять оперативную автоматизированную интерпретацию данных электро- и гамма-каротажа с минимальным участием со стороны оператора и повышенной точностью определения количественных результатов интерпретации.

Глава 5. Опыт-методическое опробование предлагаемых защищаемых положений.

В пятой главе приводится краткое описание опыта использования разработанного аппаратного и программно-методического комплекса разведочными и добывающими предприятиями России, стран СНГ и дальнего зарубежья для решения задач геофизического сопровождения разведки и отработки урановых месторождений инфильтрационного типа.

В разделе 5.1 приводится опыт применения комплекса на территории РФ.

В разделе 5.2 приводится опыт применения комплекса на территории стран СНГ.

В разделе 5.3 рассматривается опыт применения комплекса на территории стран дальнего зарубежья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённой работы:

1. Выявлены наиболее актуальные проблемы урановой скважинной геофизики.
2. Разработана методика и программное обеспечение автоматизированной интерпретации данных электрокаротажа для литологического расчленения разреза рудного горизонта и определения послойного коэффициента фильтрации пород.
3. Разработаны методические дополнения к существующей методике интерпретации данных гамма-каротажа и программное обеспечение для автоматизированной интерпретации, позволяющее повысить точность определения извлекаемых запасов урана на месторождениях инфильтрационного типа.
4. Разработан усовершенствованный программно-аппаратный комплекс проведения геофизических исследований скважин для нужд урановой отрасли, включающий линейку скважинных приборов, каротажный регистратор и программное обеспечение проведения каротажа и регистрации его результатов.
5. Возможным продолжением работы по данной тематике будет дальнейшее совершенствование методических приёмов и программного обеспечения автоматизированной интерпретации данных как электро- и гамма-каротажа, так и других методов ГИС, выполняемых на инфильтрационных месторождениях урана, с одновременным развитием программно-аппаратного комплекса проведения каротажа и регистрации его результатов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для предоставления основных научных результатов диссертации:

1. Легавко А.В., **Легавко Д.А.** Новый подход к интерпретации результатов электрокаротажа скважин в условиях песчано-глинистого разреза урановых месторождений, обрабатываемых методом подземного скважинного выщелачивания // Геофизические исследования. 2011. – Т.12. – № 3. – С. 55-63.

2. Легавко А.В., **Легавко Д.А.**, Василенко С.Н. Каротажный регистратор УГИ-01 // Сейсмические приборы. 2014. – Т.50. – № 3. – С.56-62.

3. Легавко А.В., **Легавко Д.А.** Особенности интерпретации данных гамма-каротажа при подсчете запасов на инфильтрационных месторождениях урана // Геофизические исследования. 2017. – Т.18. – № 2. – С. 55-64.

4. **Легавко Д.А.** Совершенствование методических приемов интерпретации данных каротажа скважин при отработке инфильтрационных месторождений урана // Геофизические исследования. 2019. – Т.20. – № 2. – С. 28-38.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

5. Ференцев А.А., **Легавко Д.А.** Автоматизированная система интерпретации данных гамма-каротажа для добычи урана методом подземного выщелачивания // Труды конференции молодых ученых. – Новосибирск, 2002 г. – С.170-182.

6. Легавко А.В., **Легавко Д.А.** Интерпретация результатов электрокаротажа и его применение в условиях песчано-глинистого разреза месторождений урана, обрабатываемых методом подземного выщелачивания // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: статьи по материалам Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Пермь 2015 г. – С.221-232.

7. **Легавко Д.А.** Автоматизированная интерпретация результатов электрокаротажа скважин в условиях песчано-глинистого разреза инфильтрационных месторождений урана, обрабатываемых методом подземного выщелачивания. // Труды международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». – Тверь 2018 г. – С.720-723.

Подписано в печать 20.02.2020 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru