

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.8.056

Программное обеспечение для проведения каротажа мгновенных нейтронов деления и интерпретации его результатов**В.Н. Конешов^а, Д.А. Легавко^а, А.В. Легавко^а, А.Р. Миносьянц^б**^а Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1. E-mail: direction@ifz.ru

^б АО «РУСБУРМАШ»

109004, Москва, ул. Земляной Вал, 59, стр. 2. E-mail: info@rbm-armz.ru

(Статья поступила в редакцию 25 июля 2024 г.)

Статья посвящена вопросам программно-математического обеспечения каротажа скважин методом мгновенных нейтронов деления с использованием двухзондовой аппаратуры АИНК-49 и автоматизации процесса обработки и интерпретации получаемых данных для определения содержания урана в рудах месторождений пластово-инфильтрационного (песчаникового) типа. Представлено программное обеспечение, разработанное авторами для проведения каротажа, и программное обеспечение, созданное ими для автоматизированной обработки и интерпретации получаемых каротажных материалов.

Ключевые слова: *гамма-каротаж, каротаж мгновенных нейтронов деления, инфильтрационные месторождения урана, подземное выщелачивание.*

DOI: 10.17072/psu.geol.23.3.234

Введение

Месторождения урана пластово-инфильтрационного типа, обрабатываемые методом подземного скважинного выщелачивания, обладают существенной радиологической особенностью – нарушением радиоактивного равновесия между ураном и продуктами его распада (Бровин и др., 1997). Метод гамма-каротажа, традиционно используемый при разведке и эксплуатации урановых месторождений, позволяет регистрировать только интегральный уровень гамма-излучения пород, который обусловлен преимущественно излучением радия и продуктов его распада. Поэтому при оценке запасов урана по результатам гамма-каротажа на стадии разведки месторождений приходится выполнять большой объём сопутствующих радиологических исследований кернового материала с целью изучения закономерностей нарушения радиоактивного равновесия между ураном и радием, радием и радоном и ряда других

радиологических характеристик руд (Хайкович, Ганичев, 2012). Таким образом, безошибочность количественной оценки запасов урана в недрах методом гамма-каротажа в значительной степени зависит от достоверности результатов проведённых радиологических изысканий.

Преодолеть проблему нарушения радиоактивного равновесия, а также повысить достоверность и оперативность оценки запасов урана в недрах позволяет применение одной из модификаций импульсных нейтрон-нейтронных методов каротажа – каротажа мгновенных нейтронов деления (КНД-М), который служит для «прямого» определения содержания урана в условиях естественного залегания (Abzalov et al., 2017). Также существенное преимущество метода КНД-М перед методом гамма-каротажа – возможность его применения для решения различных геотехнологических задач на действующих полигонах скважинного подземного выщелачивания в условиях техногенно нарушенного

равновесия между ураном и радием (Миносьянц и др., 2019).

В основе этого метода лежит свойство радионуклида ^{235}U делиться в поле тепловых нейтронов с испусканием мгновенных нейтронов деления. Источником тепловых нейтронов служат быстрые нейтроны, вырабатываемые импульсным генератором скважинного прибора, которые замедляются в исследуемой среде до тепловых энергий. Для выделения «мгновенных» нейтронов деления на фоне теплового нейтронного поля используются детекторы, экранированные кадмием, который имеет аномально высокое сечение поглощения тепловых нейтронов (Ганичев и др., 1986).

Длительное время отечественной аппаратуре КНД-М был присущ существенный недостаток – однозондовая схема реализации скважинного прибора. Во-первых, это делало принципиально невозможным измерение по данным каротажа влажности (водородосодержания) рудовмещающих пород. Во-вторых, расчёт времени жизни нейтронов по показаниям экранированного детектора не отличался достоверностью ввиду низких скоростей и плохой статистики счёта, особенно в рудных интервалах с невысоким содержанием урана. Оба параметра ощутимо влияют на результат вычисления массовой доли урана, обуславливая возникновение значительных погрешностей. При эксплуатации однозондовой аппаратуры на рудах с массовой долей урана 0,01 % относительная погрешность достигала 20 % (Liu et al., 2021).

Аппаратура нового поколения АИНК-49, созданная во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова, включает двухзондовую конструкцию скважинного прибора. К детектору мгновенных нейтронов деления (МНД) добавлен детектор тепловых нейтронов (ТН). Таким образом реализована возможность получения достаточно точной оценки влажности руд и значительно повышена достоверность определения времени жизни нейтронов при использовании существенно больших скоростей счёта неэкранированного детектора тепловых нейтронов.

Как и предыдущие версии, АИНК-49 сохранил в составе скважинного прибора блок мониторинга, обеспечивающий

непрерывный контроль за выходом нейтронов генератора в процессе каротажа, и вспомогательный блок гамма-каротажа. Для прибора был разработан импульсный нейтронный генератор ИНГ-12-50-100, вырабатывающий импульсные потоки быстрых нейтронов частотой 20 Гц и плотностью $2 \cdot 10^8$ нейтронов в секунду, отличающийся увеличенным до 250 ч ресурсом работы. Блок телеметрии скважинного прибора, отвечающий за передачу данных наземному пульту управления и получение от него команд, позволяет работать на стандартных одно- или трёхжильных каротажных кабелях. Диаметр скважинного прибора (СП) удалось снизить до 49 мм, что существенно расширило возможность его применения в скважинах малого диаметра. Кроме скважинного прибора, комплекс включает наземный блок управления и обработки информации (пульт управления ПУ-10) и блок градуировки мониторов (БГ) для калибровки блока мониторинга скважинного прибора. Для функционирования комплекса используется внешний источник стабилизированного напряжения 160–180 В, обеспечивающий питание всех его составных частей постоянным током в диапазоне от 50 до 250 мА, и компьютер с COM-портом для связи с ПУ-10 по интерфейсу RS-232.

В 2013 г. по результатам опытно-промышленных испытаний комплекс АИНК-49 прошёл метрологическую аттестацию во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург) и был утверждён в качестве типа средств измерений с внесением в Государственный реестр Российской Федерации.

В 2014 г. специалистами Федерального государственного унитарного научно-производственного предприятия «Геологоразведка» разработана «Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления на месторождениях урана с аппаратурно-методическим комплексом АМК КНД-М (в модификации АИНК-49)» (Хайкович, Ганичев, 2014), в которой представлена методика измерений и интерпретации получаемых материалов. Описанная в указанной выше инструкции методика также прошла метрологическую аттестацию в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

В процессе промышленного внедрения аппаратуры авторы взяли на себя задачу разработки программного обеспечения верхнего уровня для проведения каротажа с АИНК-49. Необходимость этой разработки обусловлена выявленными недостатками программного обеспечения, созданного ВНИИА (ПО АМК КНД-М) и использованного при опытно-промышленных испытаниях и метрологической аттестации АИНК-49.

С одной стороны, ПО АМК КНД-М чрезмерно перегружено избыточным функционалом в части настройки различных параметров работы скважинного прибора, наземного пульта управления и самого программного обеспечения, что привносило гибкость системы настроек комплекса и было необходимо на этапах отладки нового типа аппаратуры и её опытно-промышленных испытаний. Однако в условиях производственной эксплуатации избыток настроечных параметров, из которых суть многих совершенно не очевидна пользователю, создавало почву для появления непреднамеренных ошибок операторов в настройках комплекса и, как следствие, получения бракованных материалов исследований.

С другой стороны, пользовательский интерфейс ПО АМК КНД-М в части отображения текущей информации в режиме каротажа несколько ограничен в функциональном плане и имеет непривычный вид с точки зрения стандартов каротажных изысканий, что затрудняет работу с ним в реальных полевых условиях. Данные каротажа сохраняются в файлах нестандартного для каротажных исследований формата, исключающего их применение в программном обеспечении, которое используется геолого-геофизическими подразделениями уранодобывающих и разведочных предприятий.

Альтернативное программное обеспечение для проведения КНД-М

Таким образом, была поставлена задача разработки программного обеспечения для проведения каротажа мгновенных нейтронов деления с АИНК-49 с максимально простым, интуитивно понятным графическим интерфейсом, имеющим стандартную для каротажных работ реализацию, которое

позволило бы достоверно регистрировать наблюдаемые и расчётные данные в полном соответствии с методикой измерений и обеспечивало широкое промышленное применение АИНК-49.

В целях повышения надёжности функционирования аппаратурной части комплекса за счёт сокращения числа наземных блоков и межблочных соединений было принято решение использовать в его составе геофизический регистратор УГИ восьмой аппаратной версии (Легавко, Легавко, Василенко, 2014), повсеместно применяющийся при проведении каротажных работ на инфильтрационных месторождениях урана в России и странах СНГ.

Наличие в составе УГИ мощного программно-управляемого источника питания позволяет обеспечить скважинный прибор АИНК-49 и блок градуировки мониторов необходимым электрическим питанием. Реализованная в УГИ система приёма-передачи цифровых данных по цепи питания с возможностью программной настройки под большинство известных протоколов осуществляет устойчивый приём данных от скважинного прибора и передачу ему команд.

Кроме того, использование УГИ даёт возможность исключить из состава наземной аппаратуры пульт управления и контроля ПУ-10, отказаться от применения внешнего источника стабилизированного напряжения и осуществлять стандартную работу с датчиком глубины и датчиком меток каротажной станции. При разработке нового программного обеспечения за основу был взят программный комплекс проведения каротажей с регистратором УГИ *CobraWin*, созданный авторами ранее и длительное время успешно эксплуатируемый совместно с УГИ на добычных и геологоразведочных предприятиях для выполнения комплекса каротажных глубины, питания скважинного прибора и механизмов высокоточной привязки каротажных данных к показаниям датчиков глубины и десятиметровых меток кабеля; проект очистили от несущественных для КНД-М функций и интегрировали в него специальный функционал для работы с АИНК-49.

Разработанное программное обеспечение получило название *CobraAink*. Основу его

пользовательского интерфейса составляют окно настройки и тестирования аппаратуры, окна проверки и градуировки, окно каротажа.

Окно настройки и тестирования позволяет описывать и настраивать любое количество

скважинных приборов АИНК-49, подбирать параметры привязки глубины, устанавливать связь с УГИ и СП, просматривать текущие данные, вести мониторинг обмена данными со скважинным прибором (рис. 1).

Рис. 1. Окно настройки и тестирования программы *CobraAink*

Программа *CobraAink* осуществляет связь компьютера с регистратором УГИ посредством высокоскоростной сети *Ethernet*, передавая регистратору команды и запросы на передачу данных, принимает данные, проверяет, обрабатывает, отображает и сохраняет данные в текстовом и графическом виде.

Регистратор УГИ под управлением *CobraAink* обеспечивает питание скважинного прибора и его блока градуирования, приём импульсного выходного сигнала блока градуирования по первому счётному каналу УГИ, приём пакетов цифровых данных от скважинного прибора по цепи питания, формирование и передачу по цепи питания команд на включение/отключение генератора нейтронов, регистрацию и обработку сигналов датчиков глубины и меток кабеля каротажной станции.

Запитанный скважинный прибор, получающий команду на включение нейтронного генератора, испускает нейтронные импульсы длительностью 1–2 мкс с частотой 20 Гц.

После каждой вспышки генератора измеряются временные спектры счёта по шестидесяти 32-микросекундным окнам по каналам детектора МНД и детектора ТН. Далее следует пауза длительностью примерно 2000 мкс, измерение в течение 36 тыс. мкс скоростей счёта по каналам первого и второго мониторов и каналу гамма-каротажа, пауза ~10000 мкс перед следующей вспышкой. Скважинный прибор суммирует получаемые значения за четыре цикла «вспышка–измерения» и формирует 148-байтный пакет данных, дополненный стартовым синхробайтом и байтом контрольной суммы, для передачи наземному регистратору.

Регистратор УГИ непрерывно принимает пакеты данных от скважинного прибора, привязываясь к стартовым синхробайтам, и побайтно передаёт их программе *CobraAink*.

Программа получает пакеты данных, проверяет их целостность по совпадению контрольных сумм, суммирует и осредняет прошедшие проверку данные на временном

интервале опроса. Интервал опроса в режиме настройки и тестирования равен 1 с, в режиме каротажа соответствует времени прохождения скважинным прибором десятисантиметрового интервала глубины.

Осреднённые данные за временной интервал приводятся к размерности «имп./с» в режиме настройки и тестирования и «имп./мин» в режимах градуирования и каротажа. Данная процедура выполняется с учётом фактического времени измерения за вычетом времени вспышек генератора и измерительных пауз. В режиме настройки и тестирования по детекторам МНД и ТН берётся полный интегральный счёт. В режиме каротажа из временных спектров показаний детекторов МНД и ТН вырезаются заданные временные окна: $N1$ – скорость счёта сигнала МНД с задержкой 160 мкс относительно импульса нейтронного генератора и длительностью 1312 мкс; $N2$ – скорость счёта сигнала МНД с задержкой 352 мкс и длительностью 1120 мкс; $Nt1$ – скорость счёта сигнала ТН с задержкой 192 мкс и длительностью 1664 мкс; $Nt2$ – скорость счёта сигнала ТН с задержкой 384 мкс и длительностью 1472 мкс. Полученные значения по нейтронным каналам нормируются на поток нейтронов генератора с использованием показаний мониторинговых каналов и коэффициента мониторингования, определяемого при градуировании мониторов скважинного прибора. Дополнительно по показаниям детектора ТН рассчитывается

время жизни тепловых нейтронов τ для оперативного литологического расчленения разреза скважины.

Из окна тестирования и настройки вызываются окна проверки нейтронных детекторов, окна градуировки гамма-канала и блока градуирования, а также основное градуировочное окно – окно градуировки блока мониторов скважинного прибора.

Окна проверки нейтронных детекторов и градуировки блока градуирования позволяют в полуавтоматическом режиме проводить измерения с использованием источников ионизирующих излучений и вычислять чувствительность нейтронных детекторов и блока градуирования.

Окно градуировки гамма-канала способствует реализации в полуавтоматическом режиме стандартной последовательности измерений с использованием источников ионизирующих излучений для установления градуировочной характеристики гамма-канала скважинного прибора.

Окно градуирования мониторов полностью в автоматическом режиме осуществляет последовательность измерительных и вычислительных процедур с включением/отключением генератора нейтронов и использованием блока градуирования для определения коэффициента мониторингования скважинного прибора и плотности выходного потока быстрых нейтронов импульсного генератора (рис. 2).

Питание СП	Генератор СП	Принято кадров СП	Обработано кадров СП	Кадров с ошибкой
Вкл	Выкл	5	622	0

Рис. 2. Окно градуирования мониторов

После успешной настройки и градуировки аппаратуры на скважине, из окна тестирования и настройки можно перейти в окно каротажа.

Основные элементы окна каротажа – три синхронизированных по глубине графических планшета: на левом отображаются данные канала гамма-каротажа; на центральном – данные детектора МНД в виде кривых $M1$, $M2$; на правом – данные детектора ТН в виде кривой расчётного параметра τ (рис. 3).

Слева от планшетов находится панель текущих данных, в которой представлены значения глубины и скорости, измеряемых и расчётных параметров каротажа, параметров питания скважинного прибора. Справа расположена панель управления, которая содержит поля и клавиши для управления процессом каротажа, позволяющие осуществлять привязку глубины точки записи к меткам кабеля,

включать/выключать режим записи каротажа, включать/выключать генератор нейтронов скважинного прибора. В нижней части окна расположен статус-бар мониторинга связи со скважинным прибором и дополнительные планшеты, отображающие временные спектральные картины по детекторам мгновенных и тепловых нейтронов.

В процессе каротажа каждые 20 мс программа проводит опрос измерительных каналов и цифрового приёмника УГИ с последующим суммированием полученных значений по каждому каналу и подсчётом количества произведённых измерений. В момент изменения значения глубины на 0,1 м и более накопленные суммы значений по измерительным каналам делятся на количество измерений. В итоге получаются средние значения измеряемых параметров на пройденном интервале.

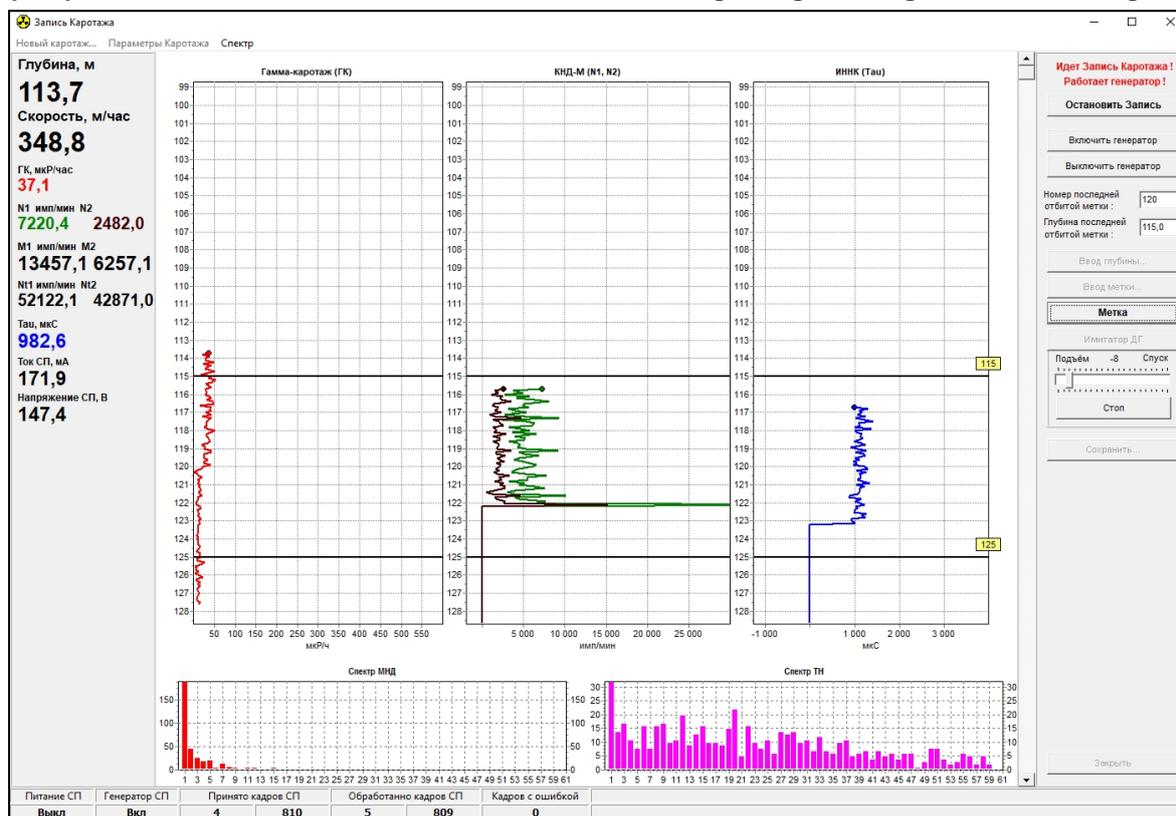


Рис. 3. Окно каротажа

По окончании каротажа осуществляется автоматическая корректировка его результатов по 10-метровым меткам глубины и сохранение результатов в виде стандартных каротажных LAS-файлов, дополненных файлами протоколов реализованных градуировочных процедур и протоколом самого каротажного исследования.

В результате выполненных работ авторам удалось не только разработать альтернативное программное обеспечение для проведения каротажа методом КНД-М с использованием аппаратуры АИНК-49, но и существенно реструктурировать сам имеющийся программно-аппаратный комплекс АИНК-49 (рис. 4).

Переработанный комплекс *CobraAink* позволяет избавиться от дополнительных коммутационных действий, необходимых для проведения каротажа мгновенных нейтронов деления с АИНК-49 на стандартной «урановой» каротажной станции. Из комплекта АИНК-49 используются только скважинный прибор и блок градуирования, подключаемые к панели коммутации скважинных приборов регистратора УГИ. Вся работа с датчиками глубины и меток каротажной станции реализуется в стандартном виде. Также стандартно осуществляется связь компьютера и регистратора по *Ethernet*-интерфейсу.

Разработанное программное обеспечение *CobraAink* предоставляет оператору станции привычный, удобный и понятный пользовательский интерфейс, обеспечивая при этом высокоточную регистрацию измеряемых и расчётных параметров в соответствии с требованиями (Хайкович, Ганичев, 2014).

Использование комплекса в варианте *CobraAink* может существенно повысить общую надёжность аппаратуры для проведения каротажа методом КНД-М с одновременным повышением точности измерений, удобства пользования и, как следствие, увеличением эффективности каротажных работ (Легавко, Легавко, 2022).

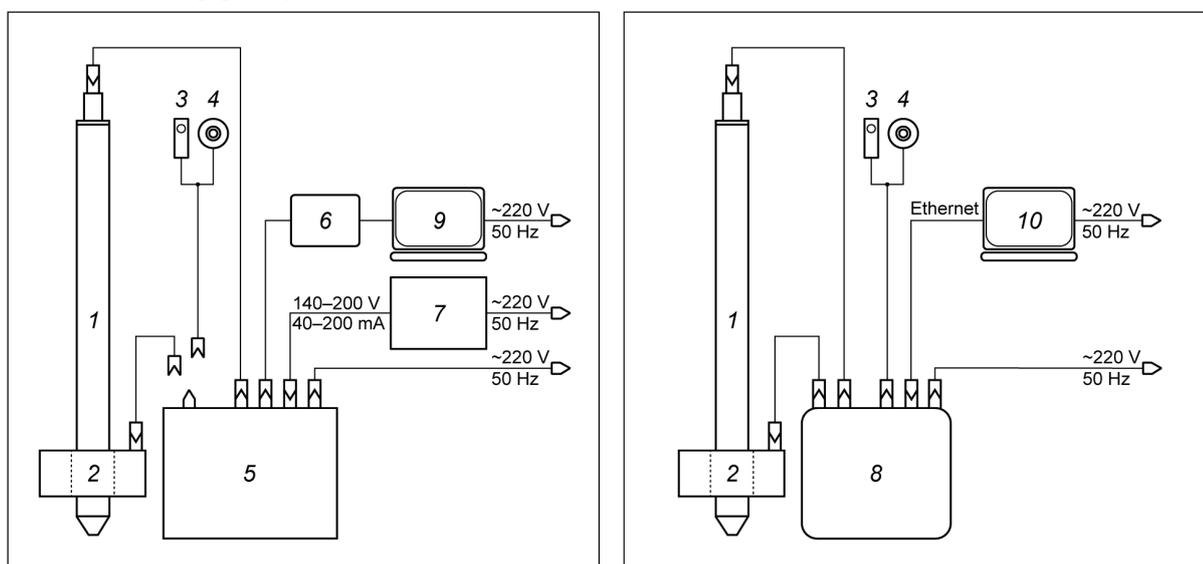


Рис. 4. Схема подключения оборудования комплекса в стандартном варианте (слева) и варианте *CobraAink* (справа): 1 – скважинный прибор АИНК-49; 2 – блок градуировки мониторов; 3 – датчик меток; 4 – датчик глубины; 5 – пульт управления ПУ-10; 6 – преобразователь интерфейса USB/RS232; 7 – источник стабилизированного напряжения; 8 – каротажный регистратор УГИ; 9, 10 – компьютер с программным обеспечением: ПО АМК КНД-М (9) и *CobraAink* (10)

Автоматизация обработки и интерпретации результатов КНД-М

Успешная опытная эксплуатация нового программно-аппаратного комплекса на действующих разведочных и уранодобывающих предприятиях России, Казахстана, Узбекистана и переход к его массовому использованию привели к необходимости программного обеспечения для автоматизированной интерпретации результатов каротажа.

Теоретически выполнение методических требований (Хайкович, Ганичев, 2014) по проведению интерпретационных процедур

возможно в полуавтоматическом режиме посредством стандартных приложений для работы с электронными таблицами, таких как *Microsoft Excel*. Однако, кроме многочисленных вычислительных действий с каротажными данными, остаётся значительный объём ручной работы: разбиение пропродуктивного горизонта на участки с однородными физическими свойствами, кропотливое использование палеток, высокоответственные процедуры по определению границ рудных интервалов и их геологически обоснованному объединению. Такой подход к интерпретации весьма трудоёмок, требует привлечения

высококвалифицированных специалистов и ощутимых затрат времени. Кроме того, результаты интерпретации подвержены ошибкам, вызванным слабой формализацией некоторых интерпретационных процессов и субъективизмом пользователя.

Таким образом, весьма актуальна задача разработки программного обеспечения для автоматизированной интерпретации данных КНД-М, которое позволяло бы оперативно и при минимальном участии оператора осуществлять все необходимые действия для высокоточного определения содержания урана вдоль ствола скважины и подсчёта его линейных запасов.

Физические и теоретические основы интерпретации данных КНД-М

Теория метода КНД-М базируется на предположении, что рудное тело можно представить в виде слоистой структуры и на следующих закономерностях, полученных в результате математического и физического моделирования.

– В однородной бесконечной среде плотность потока МНД N , сопровождающая реакцию деления ядер ^{235}U , и массовая доля урана q_U связаны соотношением

$$N = K_0 q_U, \quad (1)$$

в котором K_0 – пересчётный коэффициент, численно равный плотности потока МНД в расчёте на единичную массовую долю урана q_U и на единичный поток нейтронов генератора $Q=10^8 \text{ с}^{-1}$.

– В однородной среде площадь каротажной диаграммы $S_{\text{МНД}}$, построенная по плотности потока МНД N , пропорциональна метропроценту (линейному запасу) M

$$S_{\text{МНД}} = K_0 M, \quad M = m q_U, \quad (2)$$

где K_0 – пересчётный коэффициент; m – мощность рудного интервала.

– Пересчётный коэффициент K_0 можно представить в виде

$$K_0 = A K_\tau K_L \frac{\rho_p}{\rho_0}, \quad (3)$$

где A – градуировочный коэффициент скважинного прибора; K_τ и K_L – коэффициенты, учитывающие временное и пространственное распределения мгновенных нейтронов деления; ρ_p – плотность руды; ρ_0 – плотность рудного материала в стандартных образцах или плотность руды в контрольно-поверочных скважинах, которые использовались для определения градуировочного коэффициента A .

– Коэффициент временного распределения вычисляется по формуле

$$K_\tau = \tau e^{-\frac{t_{th}}{\tau}}, \quad (4)$$

где τ – время жизни мгновенных нейтронов деления; t_{th} – время термализации быстрых нейтронов генератора (для руд силикатного состава с коэффициентом влажности от 4 до 19 %, характерных для инфильтрационных месторождений урана, время термализации $t_{th} \approx 160 \pm 10$ мкс). Время жизни мгновенных нейтронов деления рассчитывается по асимптоте временного спектра надтепловых нейтронов. При наличии показаний детектора тепловых нейтронов, для вычисления K_τ можно использовать более статистически устойчивый параметр – время жизни тепловых нейтронов, который определяется по асимптоте временного спектра тепловых нейтронов.

– Коэффициент пространственного распределения K_L зависит от конструкции скважинного прибора, диаметра скважины D и коэффициента влажности руд W ; для его получения применяются предварительно рассчитанные зависимости $K_L = f(D, W)$.

– Для получения коэффициента влажности W используются предварительно вычисленные и откорректированные по результатам опытно-методических работ зависимости $G = f(D, W, C_6)$, где G – декремент затухания тепловых нейтронов $G = 1000/\tau$, мкс^{-1} ; τ – время жизни тепловых нейтронов, определяемое по асимптоте временного спектра тепловых нейтронов; C_6 – содержание условного бора, характеризующее суммарные нейтрон поглощающие и замедляющие свойства пород (Хайкович, Ганичев, 2014).

Инструктивная последовательность интерпретационных действий

Процесс получения результатов измерений, регламентированный (Хайкович, Ганичев, 2014), состоит из 14 вычислительных операций, разбитых на два основных блока – предварительную обработку данных каротажа и интерпретацию результатов измерений. Предварительная обработка данных включает нижеперечисленные процедуры.

1. Приведение числа точек измерений в соответствие с расстоянием между десятиметровыми метками кабеля, осуществляемое путём сравнения зафиксированного числа точек с расчётным. Недостающее (или избыточное) число точек можно добавить простым повторением (или стиранием) значений, соответствующих конечной точке между соседними метками.

2. Удаление выбросов по каналам МНД и ТН. Сигнал в точке z_i , идентифицируется как «выброс», если он резко выделяется от соседних значений в большую или меньшую сторону и определяется из следующих условий:

$$N(z_i) > \Lambda N(z_{i-1}) \cap N(z_i) > \Lambda N(z_{i+1})$$

или (5)

$$N(z_i) < N(z_{i-1})/\Lambda \cap N(z_i) < N(z_{i+1})/\Lambda,$$

где Λ выбирают с учётом контрастности оруденения (для инфильтрационных месторождений достаточно принять $\Lambda=5$). Значение, идентифицированное как выброс, заменяют средним значением в соседних точках.

3. Введение поправок на просчёт импульсов в каналах тепловых нейтронов. Исправленные значения скорости счёта Nt' вычисляются по формуле

$$Nt' = \frac{Nt}{1 - \frac{Nt\tau_p}{2Tf\tau}}, \quad (6)$$

в которой Nt – измеренные значения скорости счёта в каналах тепловых нейтронов $Nt1$ и $Nt2$; τ_p – разрешающее время каналов (2 мкс); T – приведённое время измерения (60 с); f – частота работы нейтронного генератора (20 Гц); τ – среднее время жизни тепловых нейтронов в породе (~220 мкс).

4. Устранение просчётов по каналам мониторов. Исправленные значения скорости счёта M' рассчитываются как

$$M' = M \left(1 + \frac{M\tau_p}{T(1-T_{\text{бл}}f)} \right), \quad (7)$$

где τ_p – разрешающее время мониторинговых каналов (из паспорта на скважинный прибор); T – приведённое время измерения (60 с); f – частота работы нейтронного генератора (20 Гц); $T_{\text{бл}}$ – значение временной задержки регистрации импульсов (15 мс); M – измеренные значения скорости счёта в каналах мониторов $M1$ и $M2$.

5. Нормирование сигналов детектора мгновенных нейтронов деления на поток нейтронов генератора 10^8 с^{-1} по формуле

$$N' = \frac{K_M N}{M'1 - M'2}, \quad (8)$$

где K_M – коэффициент мониторингования, определяемый при градуировании мониторов скважинного прибора; $M'1$ и $M'2$ – исправленные на просчёт результаты измерений в мониторинговых каналах; N – измеренные значения скорости счёта в каналах МНД $N1$ и $N2$.

6. Фильтрация методом скользящего осреднения по всем значениям зарегистрированных сигналов (с детекторов монитора, мгновенных нейтронов деления и тепловых нейтронов). Длина интервала осреднения зависит от уровня флуктуаций. Рекомендуемый интервал осреднения 30 см. Осреднённый сигнал относят к середине интервала осреднения.

7. Привязка массивов данных, зарегистрированных детекторами МНД и ТН, которая проводится путём расчёта глубины погружения этих детекторов по формулам

$$z_{\text{МНД}} = z_{\text{ГК}} + L_{\text{ГК}} + \frac{2}{3} L_{\text{МНД}},$$

$$z_{\text{ТН}} = z_{\text{ГК}} + L_{\text{ГК}} + \frac{2}{3} L_{\text{ТН}}, \quad (9)$$

в которых расстояние от мишени нейтронного генератора до центра детектора гамма-квантов обозначено $L_{\text{ГК}}$, до центра детектора МНД – $L_{\text{МНД}}$, до центра детектора ТН – $L_{\text{ТН}}$. Последующий «сдвиг» каждого массива МНД и ТН по глубине рассчитывают с помощью соотношений

$$\Delta z_{\text{МНД}} = z_{\text{ГК}} - z_{\text{МНД}}, \quad \Delta z_{\text{ТН}} = z_{\text{ГК}} - z_{\text{ТН}} \quad (10)$$

Далее следуют процедуры интерпретации данных.

8. Вычисление времени жизни тепловых нейтронов по данным ТД. Время жизни тепловых нейтронов $\tau(z_i)$ в точках z_i определяется из уравнения

$$\tau(z_i) = \frac{\Delta T}{\ln(Nt1'(z_i)/Nt2'(z_i))}, \quad (11)$$

где $\Delta T = t_1 - t_2 = 192$ мкс – разность временных задержек при регистрации сигналов тепловых нейтронов; $Nt1'(z_i)$ и $Nt2'(z_i)$ – исправленные на просчёт импульсов скорости счёта в каналах тепловых нейтронов $Nt1$ и $Nt2$ в точках z_i .

9. Выделение участков с «однородными» физическими свойствами (коэффициентом влажности и диаметром скважины), используя результаты измерений в каналах тепловых нейтронов и данных кавернометрии соответственно.

Кривая $\tau(z_i)$ – массив времён жизни тепловых нейтронов – разбивается на участки, в пределах которых значение коэффициента вариации менее 5 %, т.е.

$$v(\tau) = \frac{s(\tau)}{\bar{\tau}} < 0,05,$$

$$s(\tau) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau(z_i) - \bar{\tau})^2}, \quad (12)$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau(z_i),$$

где $\bar{\tau}$ – среднее значение времени жизни тепловых нейтронов, характеризующее каждый участок; n – число точек в пределах участка.

Кривая кавернометрии $D(z_i)$ – массив значений диаметра скважины – разбивается на участки, в пределах которых значение коэффициента вариации менее 3 %, т.е.

$$v(D) = \frac{s(D)}{\bar{D}} < 0,03,$$

$$s(D) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D(z_i) - \bar{D})^2}, \quad (13)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D(z_i),$$

где \bar{D} – среднее значение диаметра скважины, отличающее каждый участок.

10. Вычисление декремента затухания тепловых нейтронов G для каждого выделенного «однородного» участка из соотношения

$$G = \frac{1000}{\bar{\tau}} \quad (14)$$

и определение с помощью палеток зависимостей $G=f(D, W, C_0)$ коэффициента влажности W .

11. Расчёт пересчётного коэффициента K_0 (имп/мин на 0,01 % урана) для каждого рудного интервала по формуле (3). Если рудный интервал сложен из участков с различными физическими свойствами, то пересчётный коэффициент определяется для каждого участка.

Получение коэффициента временного распределения K_τ (мкс) по формуле (4). Для этого по каждому рудному интервалу (в границах, соответствующих участкам, которые характеризуются одним значением коэффициента влажности) следует найти средние значения скорости счёта по каналам тепловых нейтронов.

Коэффициент пространственного распределения МНД зависит от коэффициента влажности W и от диаметра скважины D и его находят по палеткам $K_L=f(D, W)$.

12. Определение сигналов МНД, которые соответствуют фоновым значениям по результатам каротажа безрудного интервала длиной не менее 1 м, пройденного с основным диаметром бурения, по формуле

$$\bar{N}_{j\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{j\phi}(z_i), \quad j=1,2, \quad (15)$$

в которой $N1_\phi$, $N2_\phi$ – значения сигналов МНД, зарегистрированные с временами задержки 160 и 352 мкс, нормированные на поток 10^8 с^{-1} нейтронов генератора и осреднённые по интервалам до 30 см.

13. Вычисление эквивалентных массовых долей урана $q_U(z_i)$ в каждой точке отсчёта z_i интерпретируемого интервала. Для этого достаточно значения сигналов МНД $N1(z_i)$ за вычетом фона $N1_\phi$

$$Y1(z_i) = N1(z_i) - \bar{N1}_\phi \quad (16)$$

поделить на соответствующие значения пересчётного коэффициента K_0

$$q_U(z_i) = \frac{Y1(z_i)}{K_0}. \quad (17)$$

14. Определение границ рудных интервалов и вычисление в них массовой доли урана по заданному бортовому значению. Для этого устанавливаются границы рудных интервалов, а по ним – мощность интервалов m , м; подсчитывается площадь под кривой массовой доли урана в единицах метропроцента S , м·%; рассчитывается средняя массовая доля C , % путём деления метропроцента S на мощность рудного интервала m (Хайкович, Ганичев, 2014).

Модернизация методики и программная реализация автоматизированной интерпретации

Для обработки и автоматизированной количественной интерпретации данных каротажа, получаемых с применением аппаратуры АИНК-49 и программного обеспечения *CobraAink*, авторами разработана программа *KNDM*. Алгоритм интерпретации в программе основан на методике, изложенной в (Хайкович, Ганичев, 2014). Вместе с тем методика частично модернизирована, а в последовательность интерпретационных действий внесён ряд изменений. Часть изменений связана с программно-технической реализацией комплекса регистрации данных каротажа *CobraAink*. Так, процедуры под пунктами 1, 4, 5 и 7, изложенными выше, выполняются непосредственно во время проведения каротажа.

В процессе исследования в каждой точке измерения осуществляется обработка сигналов мониторов по формуле (7) и нормирование сигналов детектора мгновенных нейтронов деления на поток нейтронов генератора по формуле (8). Аналогичным образом производится нормирование на поток нейтронов и сигналов детектора тепловых нейтронов. Процедура нормирования сигналов детектора тепловых нейтронов необязательна и не оказывает влияния на результаты расчёта времени жизни тепловых нейтронов. Тем не менее нормированные кривые обладают характерной формой, отражающей

особенности литологического строения рудного горизонта даже при нестабильном потоке нейтронов генератора, что облегчает их визуальный анализ на первом этапе интерпретации.

По завершении каротажа в программе *CobraAink* зарегистрированные данные автоматически корректируются по глубине с учётом зафиксированных десятиметровых меток каротажного кабеля и цены первой метки для каналов гамма-каротажа (ГК), МНД и ТН скважинного прибора. Коррекция выполняется с использованием алгоритма, позволяющего не просто удалять лишние или добавлять недостающие точки на десятиметровых интервалах, но и пересчитывать зарегистрированные массивы данных в скорректированные, сохраняя форму кривых между метками. Программа интерпретации *KNDM* имеет графический интерфейс, основанный на стандартных компонентах *Windows*. Центральную часть главного окна программы занимает планшет, созданный для отображения каротажных диаграмм, вспомогательных данных и результатов интерпретации в виде литологического разреза и выделенных рудных интервалов (рис. 5). Слева от планшета расположена панель, в верхней части которой находится список графической информации. Этот список обеспечивает доступ пользователя к свойствам элементов на планшете и функциям их масштабирования. Нижнюю часть панели занимает текстовый редактор, который предназначен для представления в табличном виде и редактирования данных элемента, выделенного в списке графической информации. В верхней части окна находятся главное меню и панель инструментов для управления функционалом программы. Основное подменю «Интерпретация КНД-М» содержит клавиши доступа к окну параметров интерпретации, окнам баз палеток и последовательный набор функциональных клавиш, позволяющий поэтапно осуществлять автоматизированную интерпретацию (рис. 6). Окно параметров интерпретации включает поля для ввода параметров, поправочных коэффициентов и кондиционных характеристик руд. Эти поля дают возможность настраивать программу для работы с данными конкретного скважинного прибора в

геотехнологических условиях конкретного месторождения. Окна баз палеток содержат расчётные таблицы палеток двух типов: зависимости декремента затухания нейтронов от коэффициента влажности для различных диаметров скважины и содержания условного бора, а также зависимости

коэффициента пространственного распределения нейтронов от влажности для различных диаметров скважины. В этих окнах предусмотрены инструменты для просмотра, редактирования и адаптации палеток к условиям месторождения по результатам опытно-методических работ.

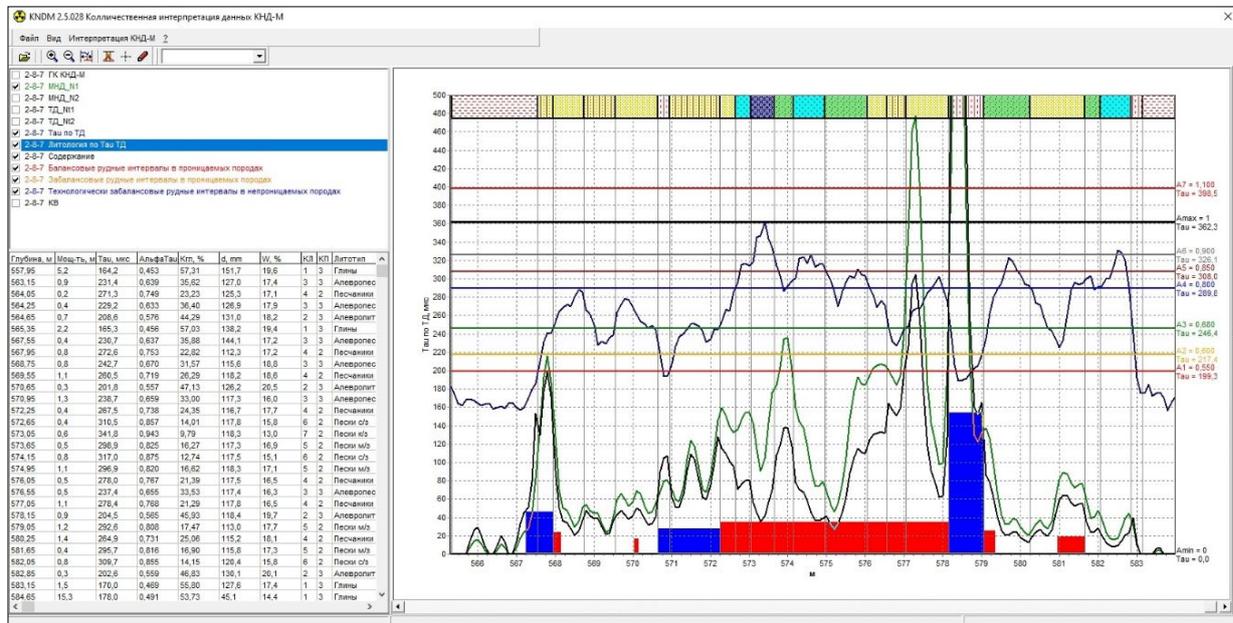


Рис. 5. Главное окно программы интерпретации

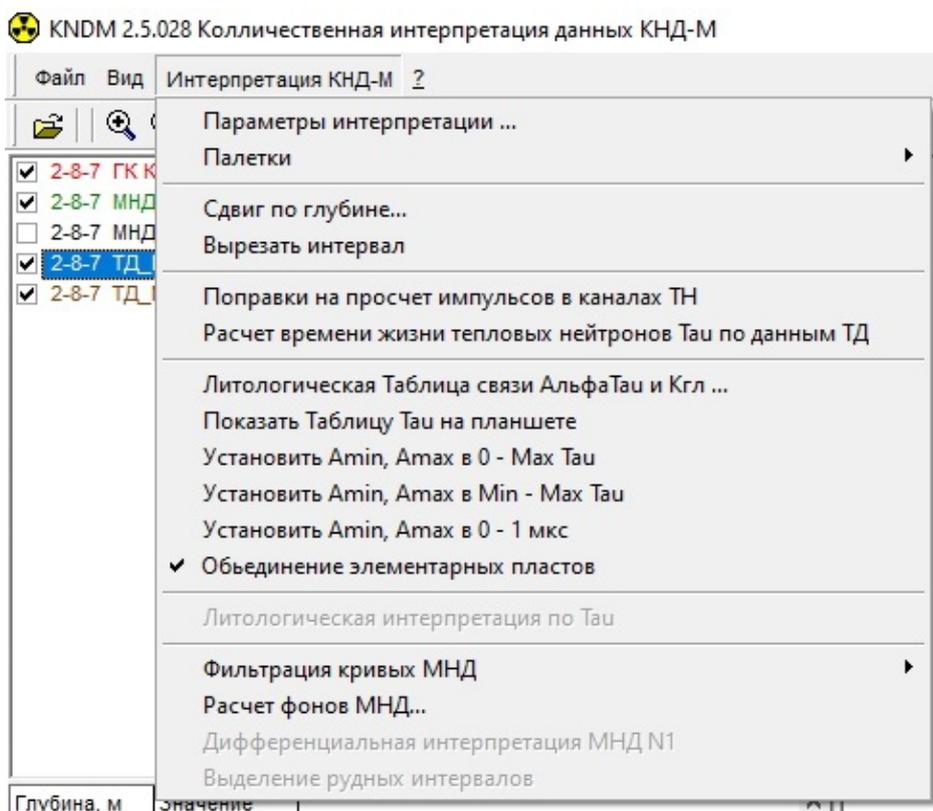


Рис. 6. Основное подменю «Интерпретация КНД-М»

Программа *KNDM* обеспечивает открытие данных, полученных с помощью комплекса АИНК-49 и зарегистрированных программой *CobraAink* путём чтения *LAS*-файла результатов каротажа. Автоматически извлекаются и отображаются на планшете каротажные кривые каналов гамма-каротажа, детектора тепловых нейтронов $Nt1$, $Nt2$ и детектора мгновенных нейтронов деления $N1$.

Программа также позволяет добавлять данные каротажей основного комплекса геофизических исследований скважины, такие как гамма-каротаж, кавернометрия, электрокаротаж и индукционный каротаж. Данные кавернометрии используются для расчётов по диаметру скважины, а результаты электрокаротажей и индукционного каротажа применяются для уточнения строения разреза скважины при литологической интерпретации данных теплового детектора. Гамма-каротаж необходим для увязки по глубине данных КНД-М и основного комплекса. С помощью функциональной клавиши «Сдвиг по глубине» можно корректировать глубину данных КНД-М на основе сопоставления глубин аномальных точек диаграмм гамма-каротажа.

После увязки данных по глубине пользователь определяет интервал интерпретации, исключая неинформативные части каротажных диаграмм. Границы интервала задаются в пределах глубин стабильной записи каротажа с включенным генератором нейтронов. Мощность фоновых интервалов выше и ниже рудных пересечений должна составлять не менее 2–3 м. Нижняя граница должна быть выше точки отрыва скважинного прибора от забоя скважины. Для выделения интервала используется клавиша «Вырезать интервал», обрезающая данные КНД-М на заданном пользователем отрезке глубин. Обрезанные диаграммы нейтронных каналов подвергаются визуальному контролю на предмет наличия случайных выбросов. Сигнал идентифицируется как выброс, если он резко контрастирует на фоне соседних значений и соответствует условиям (5). Устранение выбросов производится вручную с помощью текстового редактора программы путём замены значения, идентифицированного как выброс, средним значением в соседних точках. На этом завершается этап подготовки и предварительной обработки. Далее следуют вычислительные

процедуры интерпретации данных детектора тепловых нейтронов.

Нажатием клавиши «Поправки на просчёт импульсов в каналах ТН» вводятся поправки на просчёт в каналах детектора тепловых нейтронов по формуле (6). Клавишей «Расчёт времени жизни тепловых нейтронов Tau по данным ТД» запускается автоматический процесс определения $\tau(z_i)$ в точках глубины z_i по формуле (11).

Далее, согласно (Хайкович, Ганичев, 2014), должно проводиться выделение участков с однородными физическими свойствами (коэффициентом влажности и диаметром скважины) по кривой τ и кривой кавернометрии с применением формул (12) и (13).

Однако данный подход представляется недостаточно эффективным, трудно поддающимся автоматизации и усложняющим последующие вычислительные операции. Кроме того, для песчано-глинистых разрезов рудных горизонтов инфильтрационных месторождений урана, пройденных при разведочном бурении одним диаметром бурового инструмента, характерна зависимость изменений диаметра скважины от литологии. Глинистые породы в процессе бурения размываются, что приводит к увеличению диаметра скважины, в то время как песчаные покрываются глинистой коркой из-за проникновения фильтрата бурового раствора, что уменьшает диаметр. В целом диаметр скважины остаётся стабильным в пределах одних литологических интервалов. Учитывая это, было принято решение реализовать автоматизированную литологическую интерпретацию кривой τ , результатом которой будет дифференциация рудного горизонта по геотехнологическим литотипам пород на пласты, характеризующиеся однородностью физических свойств, с разделением их на водопроницаемые и непроницаемые. Последнее необходимо при подсчёте запасов урана отдельно по балансовому и технологически забалансовому сортам руды.

Для автоматизированной интерпретации применена технология, разработанная авторами ранее для литологической интерпретации данных электрокаротажа (Легавко, Легавко, 2011). При интерпретации кривой τ используется корреляционная зависимость

между коэффициентом глинистости пород $K_{гд}$ и временем жизни тепловых нейтронов τ – повышению $K_{гд}$ соответствует понижение значений τ . Такая зависимость строится для различных литотипов пород, слагающих рудный горизонт, путём сопоставления результатов геофизических исследований скважин с результатами гранулометрических анализов керна, а также данными опытных и

лабораторных гидрогеологических работ по исследуемому горизонту.

Зависимость задаётся в программе в виде таблицы связи граничных значений коэффициента глинистости, по которым породы рудного горизонта делятся на различные геотехнологические литотипы, и соответствующих им граничных значений нормированного параметра α_τ (рис. 7).

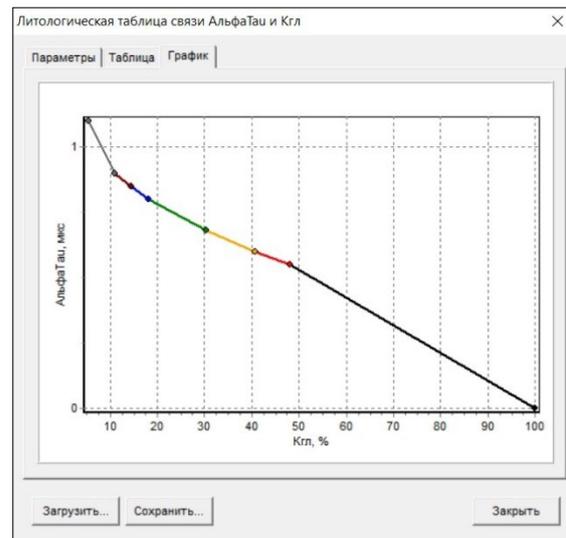
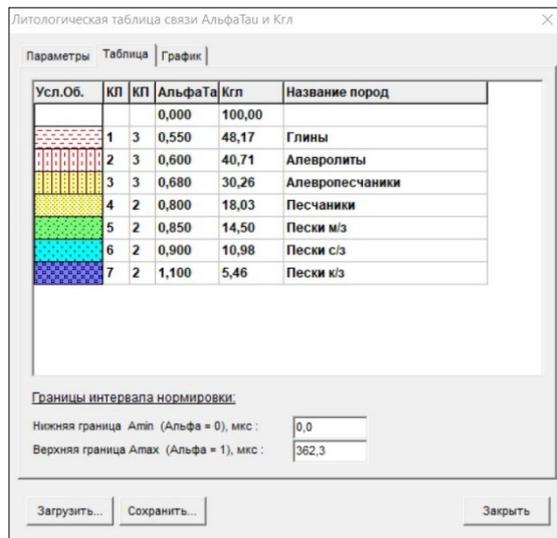


Рис. 7. Окно литологической таблицы. Табличное представление корреляционной зависимости между коэффициентом глинистости пород и нормированным временем жизни тепловых нейтронов (слева), графическое представление корреляционной зависимости (справа)

Нормирование τ осуществляется по максимуму значений в продуктивном горизонте. Нижняя граница нормировки, соответствующая стопроцентной глинистости пород, всегда равна нулю

$$\alpha_\tau = \frac{\tau - \tau_{\min}}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} = \frac{\tau}{\tau_{\max}}, \quad (18)$$

где τ_{\max} – максимальное значение τ в рудном горизонте; $\tau_{\min} = 0$ – границы нормировки.

Процесс интерпретации запускается клавишей «Литологическая интерпретация по Тау» и реализуется автоматически по следующему алгоритму.

Во всех точках максимума градиента кривой τ выставляются границы элементарных пластов. Для каждого выделенного пласта определяется среднее значение $\bar{\tau}$, рассчитываемое как $\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau(z_i)$, где n – число точек в пласте. Средние пластовые значения $\bar{\tau}$

переводятся в значения нормированного параметра α_τ по формуле (18). С помощью линейно аппроксимированной в пределах границ литотипов зависимости α_τ и $K_{гд}$ вычисляются коэффициенты глинистости $K_{гд}$ выделенных пластов. Соседние элементарные пласты, коэффициенты глинистости которых относятся к одному литотипу, объединяются с суммированием мощностей.

Для объединённого пласта переопределяются значения $\bar{\tau}$, α_τ и $K_{гд}$. В границах выделенных и объединённых пластов рассчитывается средний диаметр скважины с использованием данных кавернометрии, как

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D(z_i), \text{ где } n - \text{число точек в пласте.}$$

Для каждого пласта по палеткам зависимости декремента затухания от коэффициента влажности $G=f(D, W, C_6)$ вычисляется пластовое значение влажности W . Программа

автоматически выбирает из базы палетку, соответствующую среднему пластовому значению $\bar{\tau}$ (содержанию условного бора), и рассчитывает значение влажности W линейной интерполяцией значений между ближайшими точками декремента затухания $G = 1000/\bar{\tau}$ и диаметра скважины \bar{D} . В результате интерпретации получаем литологический разрез скважины в исследуемом интервале глубин. Для каждого выделенного пласта определены: глубина кровли и мощность, м; среднее значение времени жизни тепловых нейтронов $\bar{\tau}$, мкс; расчётное значение коэффициента глинистости $K_{гн}$, %; среднее значение диаметра скважины \bar{D} , мм; расчётное значение влажности W , %; код литологии и код проницаемости.

Такая интерпретация не претендует на полную геологическую идентификацию руд и пород, однако обеспечивает детальное расчленение продуктивного горизонта на водопроницаемые и непроницаемые геотехнологические пласты с однородными физическими свойствами. В программе предусмотрена возможность ручной коррекции границ выделенных пластов с автоматическим пересчётом их пластовых параметров.

После завершения литологической интерпретации данных детектора тепловых нейтронов выполняется количественная интерпретация данных детектора мгновенных нейтронов деления с определением подсчётных параметров рудных интервалов.

Работа с данными детектора МНД начинается с фильтрации кривой $N1$. В программе реализована процедура итерационной фильтрации, которая осуществляется автоматически по описанному далее алгоритму.

Результат первой фильтрации исходной кривой одиннадцати-точечным фильтром вычитается из исходных данных. Полученная разностная кривая многократно подвергается фильтрации тем же фильтром до выполнения заданного критерия, а результат фильтрации разностной кривой суммируется с результатом первой фильтрации. Применение процедуры итерационной фильтрации способствует минимизации искажения границ аномальных интервалов.

Затем производится определение и вычитание фонового значения скорости счёта.

Функция «Расчёт фонов МНД...» в программе позволяет выполнять эту процедуру в автоматическом режиме. Пользователь задаёт максимальное значение фона, которое определено на безрудной модели в процессе калибровки аппаратуры. Программа сортирует отфильтрованный массив данных $N1$ в порядке возрастания и разделяет его на две части – значения счёта, лежащие ниже и выше заданного максимального значения фона. Для каждой части упорядоченного массива строится уравнение линейной регрессии. Ордината точки пересечения регрессионных прямых принимается в качестве значения фона и вычитается из данных $N1$.

Отфильтрованные данные после вычитания фона используются для вычисления содержания урана вдоль ствола скважины – дифференциальной интерпретации. Дополнительно применяются характеристики геотехнологических пластов, полученные в процессе литологической интерпретации данных детектора тепловых нейтронов. Расчёт содержания урана осуществляется автоматически по нажатию клавиши «Дифференциальная интерпретация МНД $N1$ ».

Основная процедура дифференциальной интерпретации – поиск пересчётного коэффициента K_0 для каждого элементарного десятисантиметрового прослоя (точки) в интервале интерпретации. Значение $K_0(z_i)$ для точки z_i рассчитывается программой на основе формулы (3) как

$$K_0(z_i) = AK_{\tau}(z_i)K_L(z_i)\frac{\rho_p(z_i)}{\rho_0}, \quad (19)$$

где $\rho_p(z_i)$ – объёмный вес руды в естественно-влажном состоянии, вычисляемый

по формуле $\rho_p(z_i) = \frac{\rho_{mc}}{1 + (\rho_{mc} - 1)W(z_i)}$, в кото-

рой $W(z_i)$ – значение влажности для пласта, включающего в себя точку z_i ; ρ_{mc} – плотность минерального скелета; ρ_0 – объёмный вес рудного материала модели или контрольно-поверочной скважины, в которой определялся градуировочный коэффициент A ; $K_{\tau}(z_i)$ – коэффициент временного распределения тепловых нейтронов; $K_L(z_i)$ –

коэффициент пространственного распределения мгновенных нейтронов деления.

Коэффициент временного распределения $K_\tau(z_i)$ принимается постоянным в границах каждого пласта, выделенного при литологической интерпретации, соответствует средним пластовым значениям $\bar{\tau}$ и рассчитывается на основе формулы (4)

$$K_\tau(z_i) = \bar{\tau}(z_i) e^{-\frac{t_{th}}{\bar{\tau}(z_i)}}, \quad (20)$$

где $\bar{\tau}(z_i)$ – среднее значение времени жизни тепловых нейтронов для пласта, включающего в себя точку z_i ; $t_{th} = 160$ мкс – время термализации быстрых нейтронов генератора.

Коэффициент пространственного распределения $K_L(z_i)$ определяется по палеткам зависимости K_L от влажности для различных диаметров скважины $K_L = f(D, W)$. Диаметр $D(z_i)$ вычисляется по данным кавернометрии для каждой точки z_i , а значение влажности $W(z_i)$ берётся из результатов литологической интерпретации для пласта, включающего в себя точку z_i .

Содержание урана $C_U(z_i)$ в точках z_i подсчитывается по формуле

$$C_U(z_i) = \frac{NI(z_i)}{K_0(z_i)}, \quad (21)$$

где $NI(z_i)$ – нормированные на поток нейтронов генератора, фильтрованные скорости счёта канала МНД NI после вычитания фона; $K_0(z_i)$ – значение пересчётного коэффициента.

Результаты дифференциальной интерпретации отображаются на планшете в виде диаграммы содержаний урана в десятисантиметровых прослоях, а также в текстовом редакторе в виде таблицы распределения расчётного содержания урана по глубине.

После завершения описанной выше процедуры, клавишей «Выделение рудных интервалов» запускается процедура автоматического определения границ интервалов, их объединения и подсчёта линейных запасов урана. Для установления границ рудных интервалов выделяются участки диаграммы C_U ,

где содержание урана в десятисантиметровых прослоях превышает бортовое содержание C_U^b . Установленные таким образом границы определяют мощность рудных интервалов m . Среднее содержание урана в интервале \bar{C} вычисляется как среднее арифметическое значение содержаний в десятисантиметровых прослоях, заключённых в его границах. Линейный запас урана в рудном интервале определяется метропроцентом – произведением мощности на среднее содержание $m\bar{C}$. Соседние рудные интервалы, разделённые безрудным пропластком мощностью не более 20 см, объединяются, за исключением случаев, когда один из рудных интервалов вместе с безрудным пропластком имеет среднее содержание урана меньше бортового. Рудные интервалы в проницаемых породах проверяются на принадлежность к балансовой руде. Интервалы, где среднее содержание ниже установленного минимального значения для балансового пересечения, относятся к забалансовой руде. Рудные интервалы в непроницаемых породах относятся к технологически забалансовому (не извлекаемому) сорту руд.

Дополнительно, для упрощения морфологии рудных пересечений и повышения точности подсчёта извлекаемых запасов урана, в программе использован алгоритм морфологического объединения рудных интервалов, разработанный для интерпретации данных гамма-каротажа (Легавко, Легавко, 2017).

Морфологическое строение рудных залежей инфильтрационных месторождений урана характеризуется развитием языков и апофизов по фронту мешковой части, а также наличием останцев уранового оруденения в тыловой части ролловой залежи (Бровин и др., 1997). Вдоль скважины часто наблюдается ситуация, когда мощный интервал богатых балансовых руд сопровождается ореолом бедных и маломощных интервалов на небольших расстояниях друг от друга. Обычно эти интервалы относятся к одному морфологическому элементу рудной залежи и в процессе добычи охватываются общим контуром закисления. Уран, содержащийся в пропластках, разделяющих условные рудные интервалы, неминуемо подлежит извлечению в рамках этого контура. Поэтому при подсчётах

извлекаемых запасов необходимо учитывать наравне с ураном балансовых пересечений.

Процедура морфологического объединения выполняется только для балансовых рудных интервалов по приведённому ниже алгоритму.

Выявляется основной рудный интервал, обладающий наибольшим линейным запасом (метропроцентом). Балансовые интервалы, отделённые от основного безрудными интервалами мощностью менее установленной максимальной мощности безрудного слоя, проверяются на возможность присоединения по удовлетворению следующим условиям:

- безрудный интервал не содержит интервалов непроницаемых пород мощностью более установленной максимальной мощности непроницаемых пропластков;

- среднее содержание урана в присоединяемом рудном интервале и безрудном пропластке больше произведения бортового содержания на максимально допустимый коэффициент разубоживания;

- среднее содержание урана в объединённом рудном пересечении больше установленного минимального содержания для балансового пересечения.

Если произошло объединение интервалов, снова выявляется основной рудный интервал с наибольшим метропроцентом. В случае, если объединения не произошло, следующий по метропроценту балансовый рудный интервал рассматривается как основной. Важно отметить, что присоединяемыми могут быть только те рудные интервалы, линейные запасы которых меньше, чем у текущего основного. Этот процесс сортировки и проверки условий объединения продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все балансовые рудные интервалы.

Выделенные рудные интервалы и пересечения, сформированные при объединении, отображаются на планшете главного окна в виде прямоугольников. Ширина каждого прямоугольника соответствует мощности интервала, а высота представляет среднее содержание в нем урана. Цветом отображается разделение рудных интервалов по сортам руды: балансовые интервалы в проницаемых породах, забалансовые интервалы в проницаемых породах и технологически забалансовые интервалы в непроницаемых породах.

Параметры интервалов (глубина кровли и подошвы, мощность, среднее содержание и метропроцент) отображаются в текстовом редакторе.

По завершении интерпретации программа сохраняет результаты в виде выходного XLS-файла. Файл содержит табуляграммы основных расчётных параметров: времени жизни тепловых нейтронов, нормированных отфильтрованных скоростей счёта мгновенных нейтронов деления, содержания урана и накопленного метропроцента и т.д. Также в файле представлены таблица геотехнологических пластов с расчётными значениями их пластовых характеристик, таблицы рудных интервалов по различным сортам руд и таблица суммарных линейных запасов урана по скважине.

Оценка достоверности результатов автоматизированной интерпретации

В качестве оценки достоверности результатов автоматизированной интерпретации программой *KNDM* приведём оценку общей достоверности результатов КНД-М из отчёта по керновому бурению контрольных скважин на одной из залежей Хиагдинского рудного поля. Работы выполнены с использованием двух разных скважинных приборов АИНК-49, работающих под управлением программного обеспечения *CobraAink*. Интерпретация данных каротажа реализована в программе *KNDM*.

Статистическая обработка данных с целью оценки достоверности проводилась по схеме, принятой в (Хайкович, Ганичев, 2014) сопоставлением результатов интерпретации с результатами геологического опробования (ГО) керна. Достоверность результатов каротажа определялась путём оценки систематических расхождений и подсчёта случайных погрешностей между параметрами рудных интервалов (m и mC), полученными по КНД-М и ГО.

Систематическое расхождение мощностей (или массовой доли урана) между данными КНД-М и ГО керна вычисляются путём оценки статистической значимости отличия разности средних значений от нуля

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i, \quad z_i = (x_i - y_i), \quad (22)$$

где x_i и y_i – результаты единичных определений мощности (или массовой доли урана) по основному и контрольному методам; $i=1, 2, \dots, n$; n – число сопоставляемых пар. Статистическую значимость расхождений получают сравнением t -статистики

$$t(z) = \frac{|\bar{z}| \sqrt{n}}{s(z)}, \quad (23)$$

$$s(z) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2},$$

которая имеет распределение Стьюдента с $(n-1)$ степенями свободы, с её критическим значением $t_{кр}$.

Принято считать, что $t(z)$ незначимо отличается от нуля, если $t(z) \leq t_{кр}^{(1)}$ при доверительной вероятности $P=0,95$; если $t(z) > t_{кр}^{(2)}$ при $P=0,99$, то $t(z)$ значимо отличается от нуля; вопрос о принятии той или иной гипотезы при $t_{кр}^{(1)} < t(z) \leq t_{кр}^{(2)}$ решается в зависимости от конкретных условий.

Аналогичным образом оценивают значение систематических расхождений в определении метропроцента, но при расчёте t -статистики абсолютные значения z_i в формуле (22) заменяют относительными

$$t(z) = \frac{|\bar{z}| \sqrt{n}}{s(z)}, \quad (24)$$

$$s(z) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}.$$

При отсутствии статистически значимых систематических расхождений между параметрами рудных интервалов, оценёнными по результатам каротажа x и по данным контрольного метода опробования y , подсчитывают случайные погрешности, которые характеризуют значениями среднего квадратичного отклонения и находят по формулам

$$S = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2},$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{x_i - y_i}{y_i} \right]^2}, \quad (25)$$

соответственно для мощностей рудных интервалов S и для метропроцента S_0 .

Для оценки достоверности каротажа КНД-М контрольных скважин были использованы данные по десяти кондиционно опробованным рудным интервалам (с выходом керна более 75%), представленным как проницаемыми, так и непроницаемыми рудами, и выделенным по бортовому содержанию урана 0,01%.

По результатам сопоставления, представленным в табл. 1, можно сделать вывод, что расхождения между подсчётными параметрами рудных пересечений, определяемыми двумя методами, имеют случайный характер. Расчётные значения t -статистики для m , C и mC не превышают критического значения $t_{кр}^{(1)}$ для доверительной вероятности 0,95, равного 2,26. Случайные относительные расхождения, характеризующиеся средней квадратической погрешностью, между линейными запасами mC рудных пересечений, составляют 15,8% и не превышают регламентированных допустимых значений в 25%. Случайные расхождения между мощностями m рудных пересечений составляют 0,17 м и не превышают допустимого значения в 0,20 м.

Приведённые материалы свидетельствуют, что результаты КНД-М в части оценки линейных запасов урана в рудных интервалах могут быть признаны достоверными, как и оценка мощностей для рудных сечений. Относительно высокие значения случайных расхождений для мощности рудных интервалов между КНД-М и ГО обусловлены небольшим объёмом выборки и недостатками кернового опробования, связанными в основном с пропусками на отдельных интервалах даже при кондиционном выходе керна. Пример сопоставления результатов ГО и КНД-М по скважине представлен на рис. 8.

Таблица 1. Результаты сопоставления параметров рудных интервалов по данным ГО и КНД-М (контрольные скважины залежи Хиагдинского рудного поля)

№ п.п	№ скв.	КНД-М					ГО				
		От	До	<i>m</i> , м	<i>C</i> , %	<i>mC</i> , м·%	От	До	<i>m</i> , м	<i>C</i> , %	<i>mC</i> , м·%
1	х.х.27-К	167,65	175,85	8,2	0,0404	0,3311	167,65	175,15	7,5	0,0633	0,4745
2	х.х.12-К	127,85	134,65	6,8	0,0131	0,0892	127,95	134,65	6,7	0,0122	0,0819
3	х.х.12-К	146,95	147,25	0,3	0,0161	0,0048	147,05	147,35	0,3	0,0208	0,0062
4	х.х.12-К	151,45	152,45	1,0	0,1096	0,1096	151,25	152,35	1,1	0,1117	0,1228
5	х.х.12-К	153,55	154,45	0,9	0,0138	0,0124	153,35	154,45	1,1	0,0106	0,0117
6	х.х.12-К	157,05	158,55	1,5	0,0194	0,0290	157,45	158,95	1,5	0,0144	0,0215
7	х.х.15-К	120,25	121,65	1,3	0,0133	0,0174	120,15	121,65	1,5	0,0169	0,0254
8	х.х.15-К	122,05	123,85	1,8	0,0281	0,0506	122,05	123,85	1,8	0,0367	0,0660
9	х.х.15-К	123,85	124,85	1,0	0,1327	0,1327	123,85	124,85	1,0	0,1094	0,1094
10	х.х.15-К	124,85	130,35	5,5	0,2221	1,2217	124,85	130,35	5,5	0,1975	1,0860
Сумма				28,3		1,9986			28,0		2,0056
Среднее				2,83	0,0706	0,1999			2,80	0,0716	0,2006
Средняя квадратическая погрешность определения <i>m</i> (м), <i>C</i> (%) и <i>mC</i> (%)									0,17	0,0095	15,8 %
<i>t</i> -статистика						$t_{кр.}^{(1)}=2,26$ для $P=0,95$; $t_{кр.}^{(2)}=3,25$ для $P=0,99$	0,33	0,30	0,42		

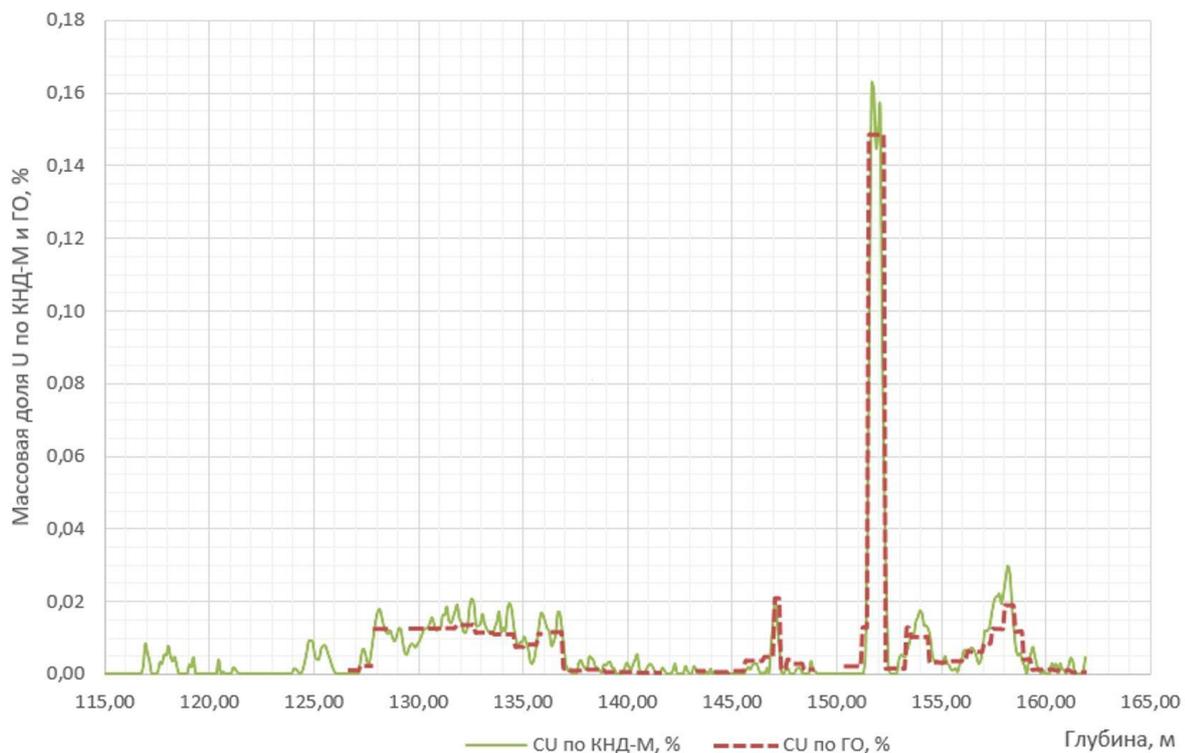


Рис. 8. Пример сопоставления результатов интерпретации и геологического опробования по скважине х.х.12-К. 1 – содержание урана по результатам интерпретации данных каротажа; 2 – содержание урана по результатам геологического опробования

Заключение

Разработанное программное обеспечение *CobraAink* для проведения КНД-М, а также схема реструктуризации программно-аппаратного комплекса АИНК-49 с использованием каротажного регистратора УГИ значительно повышают общую надёжность аппаратуры, точность измерений и удобство пользования, что в итоге увеличивает продуктивность каротажных работ. Эксплуатация реструктурированного комплекса с новым программным обеспечением на разведочных и уранодобывающих предприятиях в России, Казахстане и Узбекистане демонстрирует его высокую эффективность и достоверность получаемых каротажных данных.

Программно-математическое обеспечение *KNDM*, созданное для обработки и интерпретации данных каротажа, получаемых с использованием аппаратуры АИНК-49 под управлением *CobraAink*, автоматизирует процесс до уровня, приемлемого для проведения поточных интерпретационных работ. Методические дополнения и приёмы, реализованные в программе интерпретации, не нарушают основных положений методики обработки данных детектора мгновенных нейтронов деления и определения содержания урана вдоль ствола скважины. Однако они значительно улучшают результативность обработки данных детектора тепловых нейтронов в части литологического расчленения разреза рудного горизонта и оценки водно-фильтрационных свойств слагающих его пластов, а также повышают точность определения извлекаемых запасов урана.

Опыт эксплуатации программы интерпретации в составе реструктурированного каротажного комплекса АИНК-49 на уранодобывающих предприятиях России подтверждает достоверность определения подсчётных параметров рудных интервалов и увеличения эффективности применения всего аппаратно-методического комплекса для оценки запасов урана на исследуемых объектах.

Библиографический список

Бровин К.Г., Грабовников В.А., Шумилин М.В., Язиков В.Г. Прогноз, поиски, разведка и

промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. Алматы: Гылым, 1997. 384 с.

Ганичев Г.И., Золотницкий В.А., Кошелев А.П., Красильников В.В., Логинов Ю.А., Макаров Н.А., Меньшутин Ю.Б., Подгурский А.М., Подпоякин В.А., Сазонов И.Н., Саргаев И.М., Торпов И.В., Уваров Э.Ф., Хайкович И.М., Хасанов Э.Г. Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при изучении урановых месторождений гидрогенного типа. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1986. 65 с.

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.

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

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.

Легавко А.В., Легавко Д.А. Новое программное обеспечение каротажа мгновенных нейтронов деления с аппаратно-методическим комплексом АМК КНД-М АИНК-49 // Геофизические исследования. 2022. Т. 23, № 3. С. 35–47.

Миносьянц А.Р., Солодов И.Н., Гурулев Е.А. Применение каротажа мгновенных нейтронов на разных стадиях освоения урановых месторождений методом СПВ // Разведка и охрана недр. 2019. № 7. С. 22–30.

Хайкович И.М., Ганичев Г.И. Инструкция по гамма-каротажу на месторождениях урана. СПб: ФГУНПП «Геологоразведка», 2012. 135 с.

Хайкович И.М., Ганичев Г.И. Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления на месторождениях урана с аппаратно-методическим комплексом АМК КНД-М (в модификации АИНК-49). СПб: ФГУНПП «Геологоразведка», 2014. 61 с.

Abzalov M., Drobov S., Gorbatenko O., Vershkov A., Bertoli O., Renard D., Beucher H. Resource estimation of in situ leach uranium projects // Applied Earth Science. 2014. Vol. 123, No. 2. P. 71–85.

Liu Z., Ding C., Wang R., Cao J. Current Status and Development Trend Analysis of Neutron Logging in Uranium Mines in China // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1865, No. 2. 7 p.

Software for Prompt Fission Neutron Logging and its data interpretation

V.N. Koneshov^a, D.A. Legavko^a, A.V. Legavko^a, A.R. Minosyantz^b

^a Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russia. E-mail: direction@ifz.ru

^b JSC Rusburmash, 59-2 Zemlyanoy Val Str., Moscow 109004, Russia. E-mail: info@rbm-armz.ru

The article deals with the issues of software and mathematical support for the prompt fission neutron logging method using the dual-probe equipment AINK-49. Standalone software provides the automation of its log data processing and interpretation for determining uranium content in ores of sandstone-type deposits. The description of the software for logging survey and automated processing and interpretation of the obtained log data is presented.

Key words: *gamma-ray logging, prompt fission neutrons logging, infiltration uranium deposits, in situ leaching.*

References

- Abzalov M., Drobov S., Gorbatenko O., Vershkov A., Bertoli O., Renard D., Beucher H., 2014. Resource estimation of in situ leach uranium projects. *Applied Earth Science*. 123(2):71-85.
- Brovin K.G., Grobovnikov V.A., Shumilin M.V., Yazikov V.G., 1997. Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaya otsenka mestorozhdeniy urana dlya otrabotki podzemnym vyshchelachivaniem [Forecast, prospecting, exploration and industrial evaluation of uranium fields for underground leaching]. Almaty, Gylym, p. 384. (in Russian)
- Ganichev G.I., Zolotnitskiy V.A., Koshelev A.P., Krasilnikov V.V., Loginov Yu.A., Makarov N.A., Menshutina Yu.B., Podgurskiy A.M., Podpoyaskin V.A., Sazonov I.N., Sargaev I.M., Toropov I.V., Uvarov E.F., Khaikovich I.M., Khasanov E.G. 1986. Instruktsiya po karotazhu metodom mgnovennykh neytronov deleniya pri izuchenii uranovykh mestorozhdeniy gidrogenogo tipa [The instruction for prompt fission neutrons logging at study of hydrogen type uranium fields]. Leningrad, NPO Rudgeofizika, p. 65. (in Russian)
- Haykovich I.M., Ganichev G.I. 2012. Instruktsiya po gamma-karotazhu na mestorozhdeniyakh urana [The instruction for gamma-ray logging at uranium fields]. Sankt-Peterbúrg, FGUNPP Geologorazvedka, p. 135. ([in Russian])
- Haykovich I.M., Ganichev G.I. 2014. Instruktsiya po karotazhu metodom mgnovennykh neytronov deleniya na mestorozhdeniyakh urana s apparaturno-metodicheskim kompleksom AMK KND-M (v modifikatsii AINK-49) [The instruction for prompt fission neutrons logging at uranium fields with hardware-methodical complex AMC KND-M (AINK-49 version)]. Sankt-Peterbúrg, FGUNPP Geologorazvedka, p. 61. (in Russian)
- Legavko A.V., Legavko D.A. 2011. Novyy podkhod k interpretatsii rezultatov elektrokartazha skvazhin v usloviyakh peschano-glinistogo razreza uranovykh mestorozhdeniy, otrabatyvaemykh metodom podzemnogo skvazhinnogo vyshchelachivaniya [A new approach to the interpretation of electrical log data and its application in the sandy-clay rock conditions of uranium mine fields exploited by in situ underground leaching]. *Geofizicheskie issledovaniya*. 12(3):55-63. (in Russian)
- Legavko A.V., Legavko D.A., Vasilenko S.N. 2014. Karotazhyy registrator UGI-01 [Logging recorder UGI-01]. *Sejsmicheskie pribory*. 50(3):56-62. (in Russian)
- Legavko A.V., Legavko D.A. 2017. Osobennosti interpretatsii dannykh gamma-karotazha pri podschete zapasov na infiltratsionnykh mestorozhdeniyakh urana [Features of gamma-ray logging data interpretation for resource estimation on sandstone-hosted uranium mine fields]. *Geofizicheskie issledovaniya*. 18(2):55-64. (in Russian)
- Legavko A.V., Legavko D.A. 2022. Novoe programmnoe obespechenie karotazha mgnoven-nykh neytronov deleniya s apparaturno-metodicheskim kompleksom AMK KND-M AINK-49 [New software for prompt fission neutron logging with hardware-methodical complex AMC KND-M AINK-49]. *Geofizicheskie issledovaniya*. 23(3):35-47. (in Russian)
- Liu Z., Ding C., Wang R., Cao J. 2021. Current Status and Development Trend Analysis of Neutron Logging in Uranium Mines in China. *Journal of Physics: Conference Series*. 1865(2):7.
- Minosyants A.R., Solodov I.N., Gurulev E.A. 2019. Primenenie karotazha mgnovennykh neytronov na raznykh stadiyakh osvoeniya uranovykh mestorozhdeniy meodom SPV [Application of instantaneous fission neutron logging at different stages of ISL uranium mining]. *Razvedka i ochrana nedr*. 7:22-30. (in Russian)