

УДК 550.8.056

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ КАРОТАЖА СКВАЖИН ПРИ ОТРАБОТКЕ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

© 2019 г. Д.А. Легавко

*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Представлено описание программной реализации методики автоматизированной интерпретации результатов комплекса первичного каротажа открытого ствола технологических скважин, сооружаемых при отработке инфильтрационных месторождений урана методом подземного выщелачивания. Описан программный модуль, обеспечивающий разработанный ранее методический прием интерпретации результатов электрокаротажа скважин в условиях песчанно-глинистого разреза. Даны краткие характеристики программы интерпретации данных гамма-каротажа и расчета линейных запасов урана с использованием методики морфологического объединения рудных интервалов.

**Ключевые слова:** гамма-каротаж, электрокаротаж кажущихся сопротивлений, автоматизированная интерпретация, инфильтрационные месторождения урана, подземное выщелачивание.

### Введение

В последние десятилетия с открытием инфильтрационных месторождений урана началось бурное развитие наиболее прогрессивного метода добычи этого ценного сырья – метода подземного выщелачивания (ПВ). Этот метод широко применяется во всем мире на инфильтрационных месторождениях, сформированных в проницаемых осадочных породах депрессионных зон земной коры. Вскрытие рудных тел и добыча урана на подобных месторождениях осуществляется через сеть технологических скважин глубиной от 50 до 800 м, 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 [Язиков, Легавко, 2012]. На этапе разведки месторождения и эксплуатационного опыта ГИС проводятся в комплексе с лабораторными исследованиями керна, кустовыми гидрогеологическими наблюдениями и рядом других гидрологических и инженерно-геологических исследований, что позволяет расширить базу статистической информации для эффективного применения методов ГИС в дальнейшем при решении геологических и геотехнологических задач на стадии добычи.

При переходе к разработке месторождения процесс сооружения скважин и проведения в них геофизических исследований принимает поточный характер. Данные ГИС при этом становятся практически единственной достоверной основой для расчета запасов урана и проектирования оптимальных систем вскрытия рудных тел; при этом результаты их интерпретации необходимо получать в сжатые сроки для принятия обоснованных решений о дальнейшем проведении работ, связанных с сооружением и эксплуатацией добычных блоков и отдельных технологических скважин. Огромные объемы ГИС, строгое ограничение времени, отпускаемого на регистрацию и обработку гео-

физических данных, и высокая значимость результатов геофизических исследований требуют максимальной формализации методик и автоматизации процессов регистрации и интерпретации данных ГИС, что особенно важно на этапе эксплуатации месторождений. Однако, несмотря на повсеместное применение цифровой регистрации данных каротажных исследований и бурное развитие электронной техники, на большинстве урановых месторождений России и стран СНГ до сих пор для проведения ГИС используются устаревшая скважинная и наземная геофизическая аппаратура и программное обеспечение, имеющее ряд технических и методических ограничений. Помимо этого основные интерпретационные процедуры зачастую осуществляются в ручном режиме.

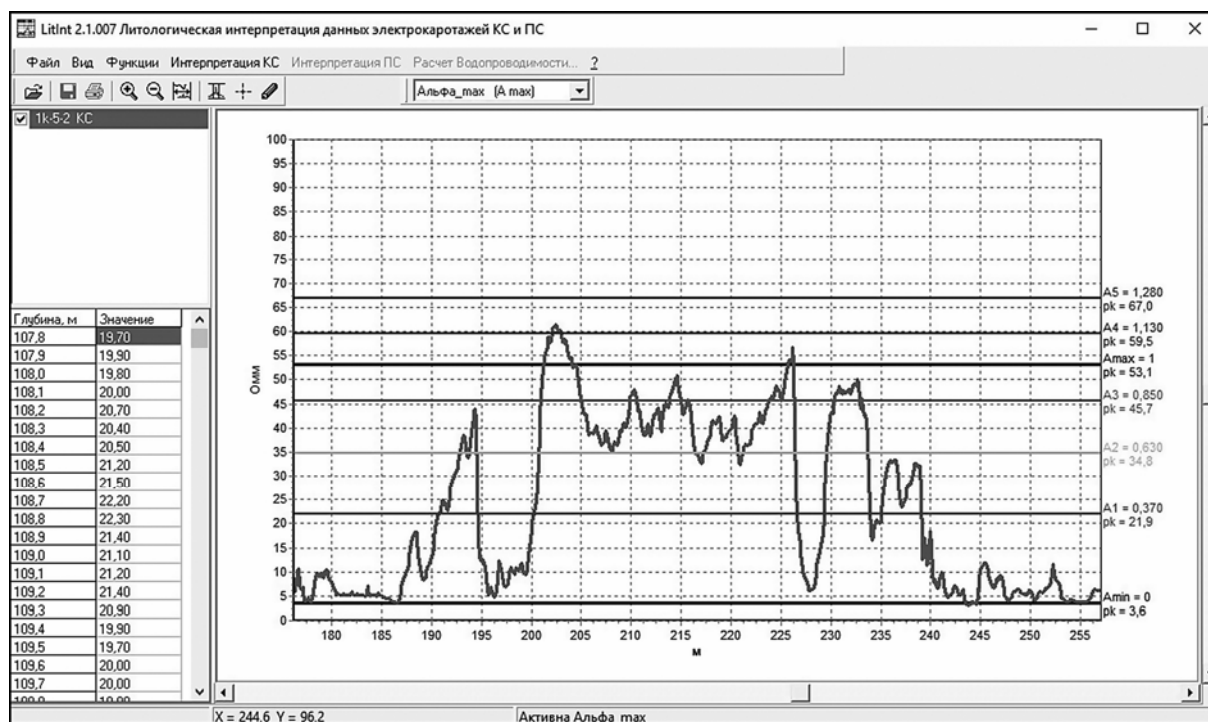
### **Постановка задачи**

Для повышения точности результатов и обеспечения их повторяемости, а также для сокращения временных и производственных затрат на проведение ГИС и обработку получаемых при этом данных требуются новые более совершенные аппаратные решения, современные методики автоматизированной регистрации данных и их последующей интерпретации. В первую очередь необходима максимальная автоматизация интерпретационных процессов для решения двух основных задач геофизического обеспечения добычи урана на инфильтрационных месторождениях, которыми являются литологическое расчленение разреза с определением послойного коэффициента фильтрации пород по данным электрокаротажа кажущихся сопротивлений (КС) и расчет ствольных запасов урана по данным гамма-каротажа (ГК).

### **Автоматизированная интерпретация электрокаротажа**

Разработанная методика автоматизированного литологического расчленения разреза с получением по результатам электрокаротажа КС пластовых фильтрационных характеристик пород подробно описана в статье [Легавко, Легавко, 2011]. К настоящему времени автором представляемой статьи разработано программное обеспечение для реализации вышеназванной методики и ведется его опытная эксплуатация на одном из уранодобывающих предприятий Республики Узбекистан. Программное обеспечение представлено приложением *LitInt*, реализованным в среде программирования *Delphi* и функционирующим под управлением операционной системы *Windows*. Приложение рассчитано на одновременную работу с каротажными данными по одной скважине и проведение интерпретации в пределах одного непрерывного интервала. Интерпретация по нескольким рудным горизонтам, вскрываемым одной скважиной и имеющим существенные различия в параметрах геологического разреза, осуществляется путем последовательной интерпретации данных каротажа скважины отдельно на интервале каждого рудного горизонта. Основные сервисные функции программы и собственно интерпретационные процессы практически полностью автоматизированы, что обеспечивает возможность успешного применения приложения *LitInt* для поточных интерпретационных работ.

Приложение *LitInt* 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. 1). Слева от планшета расположена панель, верхнюю часть которой занимает список графической информации, отображаемой программой на планшете. Нижнюю часть панели занимает многофункциональный текстовый редактор, предназначенный для отображения каротажных данных и результатов интерпретации в текстовом виде.



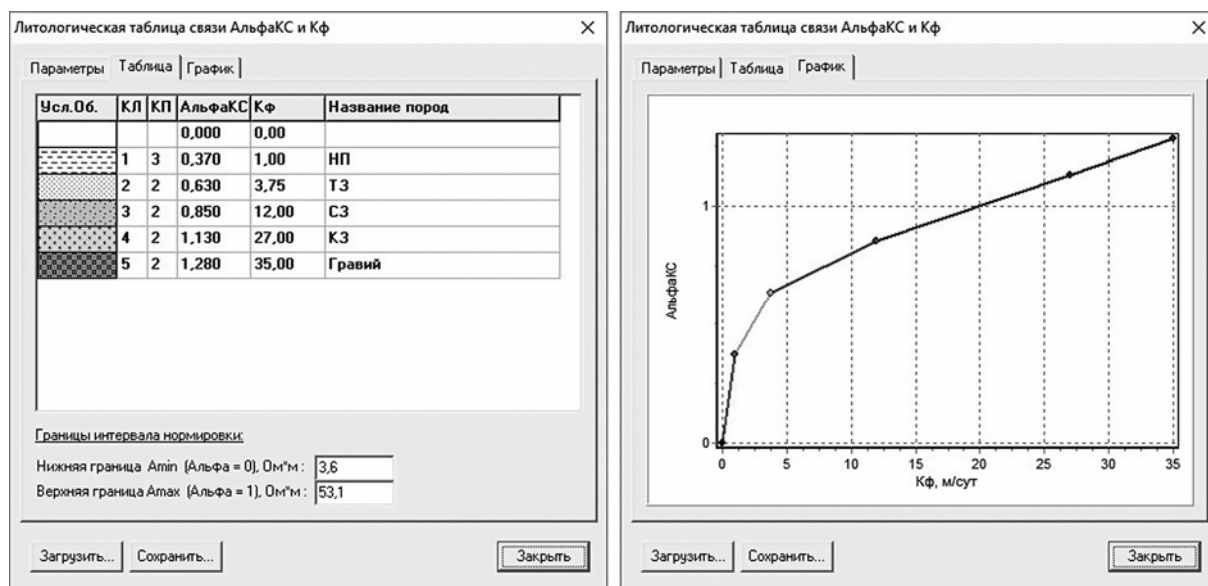
**Рис. 1.** Главное окно приложения *LitInt*, используемого для интерпретации данных электрокаротажа КС

**Fig. 1.** Main window of the *LitInt* application used for the electric log data interpretation

В верхней части окна расположено главное меню программы и панель инструментов, содержащая кнопки управления основными функциями программы. Планшет программы представляет собой область построения графической информации. Горизонтально располагается ось глубин, вертикально – ось значений. Ось глубин едина для всех диаграмм, отображаемых на планшете. Единицы измерения и масштаб оси значений соответствуют отмеченной в списке графической информации диаграммы.

Планшет имеет горизонтальную и вертикальную полосы прокрутки, что позволяет проматывать отображаемую информацию в соответствующих направлениях. В приложении реализованы функции вертикального и горизонтального масштабирования. Доступно несколько способов управления свойствами отображаемых диаграмм – изменение цвета, исходного масштаба значений; включение/отключение визуализации данных и их удаление осуществляется при помощи списка графической информации. Для работы с этими функциями необходимо “щелкнуть” правой кнопкой мыши на выбранном элементе в списке графической информации и воспользоваться появившимся меню.

Для литологического разделения пород и определения коэффициента фильтрации  $K_f$  выделяемых пластов используется корреляционная зависимость между сопротивлением пород и их коэффициентом фильтрации. При этом сопротивление пород опосредуется нормированным геофизическим параметром  $\alpha_p$ , получаемым нормированием данных каротажа КС способом двойного разностного параметра, а корреляционная зависимость задается в виде таблицы связи граничных значений  $\alpha_p$  и  $K_f$  для литологических типов пород, слагающих исследуемый рудный горизонт. Для задания приложению корреляционной связи между  $\alpha_p$  и  $K_f$  используется окно “Литологическая таблица” (рис. 2).



**Рис. 2.** Окно “Литологической таблицы”. Отображение связи граничных значений  $\alpha_p$  и  $K_f$  в табличном (слева) и графическом (справа) виде

**Fig. 2.** “Lithology table” window. Displaying of the relation between the boundary values  $\alpha_p$  and  $K_f$  in a tabular (left) and graphic (right) view

В таблице пользователь может описать любое количество литологических типов пород, на которые необходимо расчленять разрез исследуемого горизонта, указывая для них соответствующий цифровой код, условное обозначение, описание, а также граничные значения коэффициентов фильтрации  $K_f$  и соответствующие им значения  $\alpha_p$ .

Границы интервала нормировки и таблица связи граничных значений отображаются на графическом планшете программы интерпретации в виде линий, параллельных оси глубин, отрисовываемых поверх кривой каротажа КС (см. рис. 1). Линии таблицы связи имеют смысл граничных коэффициентов фильтрации. Перемещая их вдоль оси сопротивлений, интерпретатор может менять граничные значения параметра  $\alpha_p$ , изменяя таким образом исходную таблицу связи  $\alpha_p$  и  $K_f$ . При этом наглядно визуализируется связь между кривой кажущегося сопротивления и таблицей связи граничных значений  $\alpha_p$  и  $K_f$ , по которой осуществляется литологическое расчленение разреза.

В начале интерпретации прямые, соответствующие границам интервала нормировки, выставляются на уровень минимального и максимального значения кажущегося сопротивления кривой каротажа, а линии граничных значений коэффициента фильтрации на уровень, соответствующего им по исходной таблице связи значения  $\alpha_p$  в получившихся границах интервала нормировки. Интерпретатору предоставляется возможность последовательно скорректировать положение границ интервала нормировки, передвигая их вдоль оси сопротивлений при помощи “мыши” или стрелок на клавиатуре. При этом линии таблицы связи автоматически перемещаются на новый уровень соответствующего им в новых границах интервала нормировки значения  $\alpha_p$ . После установки линий границ интервала нормировки интерпретатор может, если это необходимо, последовательно менять положение линий таблицы связи, тем самым меняя саму исходную таблицу. При этом на планшете справа от линии отображается значение параметра  $\alpha_p$ , соответствующее положению передвигаемой линии.

Визуализация таблицы связи граничных значений нанесением её узловых точек на интерпретируемую диаграмму и возможность управления таблицей перемещением этих линий вдоль оси сопротивлений позволяет не только наглядно связать кривую каротажа с корреляционной зависимостью  $\alpha_p$  и  $K_f$ , но и получить удобный интерпретационный инструмент, своего рода палетку. Такая палетка позволяет расчленять разрез на заданное количество типов породы по граничным значениям искомого параметра. И в случаях, когда по каким-либо причинам нет возможности настроить таблицу связи на опорной скважине, но известно, на какие литотипы должен быть расчленен разрез и каковы граничные значения коэффициента фильтрации для каждого литотипа, программа, работающая в “ручном” режиме (режиме ручного управления таблицей связи) оказывается незаменимым инструментом в руках опытного интерпретатора.

После установки интервала нормировки и корректировки линий таблицы граничных значений запускается процесс автоматической интерпретации – программа обрабатывает описанный в статье [Легавко, Легавко, 2011] алгоритм и отрисовывает в верхней части планшета получаемый литологический разрез. Для каждого выделенного слоя в разрезе определены его границы, мощность, код литотипа и коэффициент фильтрации (рис. 3). Пользователь имеет возможность просматривать и редактировать полученный литологический разрез посредством текстового редактора главного окна программы или, продвигая вдоль разреза курсор, добавляя или убирая границы пластов и, если нужно, меняя литотипы пород отдельных пластов и их коэффициенты фильтрации.

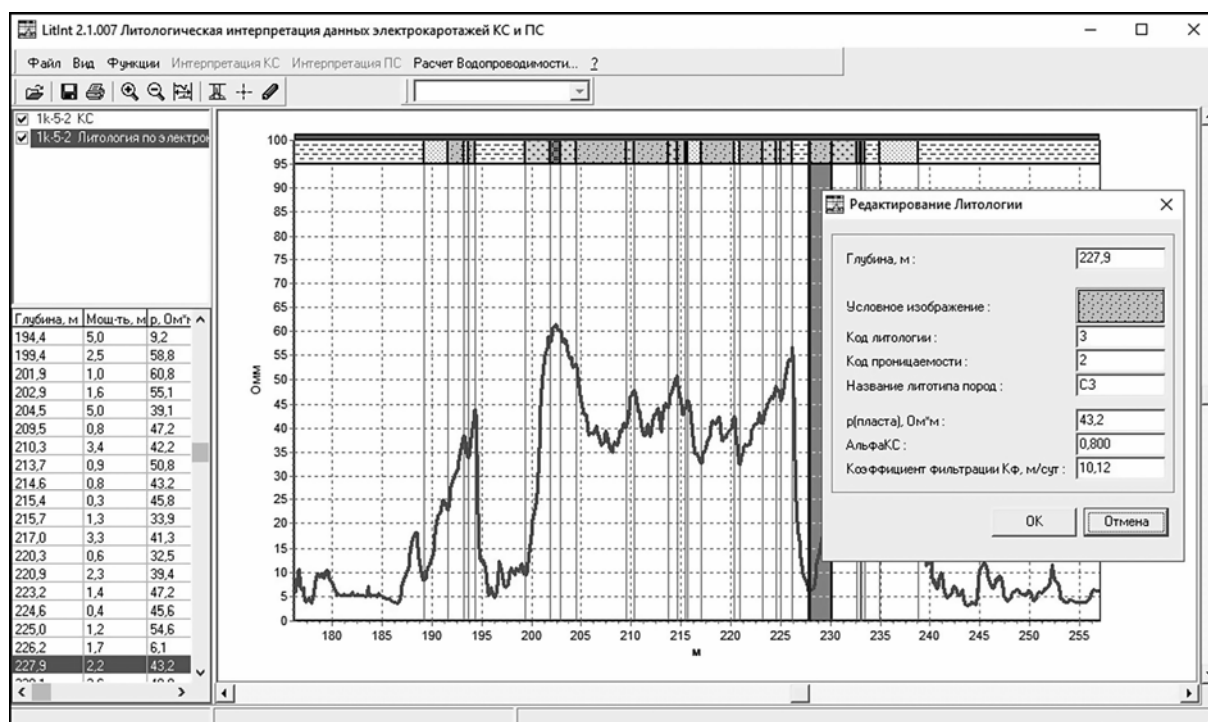


Рис. 3. Пример литологического расчленения разреза

Fig. 3. Example of lithologic interpretation result

Для настройки таблицы связи граничных значений  $\alpha_p$  и  $K_f$  на данных опорной гидрогеологической скважины в приложение входит процедура расчета по результатам интерпретации коэффициента водопроводимости пород в любом заданном интервале глубин рудного горизонта. Коэффициент водопроводимости для указанного интерпре-

татором интервала определяется как сумма коэффициентов водопроницаемости пластов, входящих в этот интервал, причем последние определяются как произведение коэффициента фильтрации на мощность пласта.

Если процесс интерпретации успешно завершен, то становятся доступными функции сохранения и печати результатов интерпретации. Программа сохраняет результаты в формате текстового файла в виде границ выделенных литологических интервалов и их расчетных параметров. Этот файл используется при автоматизированной интерпретации гамма-каротажа для разделения разреза на проницаемые и непроницаемые породы.

Кроме того, приложение создает и выводит на принтер текстовый отчет о проведенной интерпретации и графическое представление обработанных диаграмм и результатов интерпретации. Текстовый отчет содержит “Параметры интерпретации” – список значений параметров, использованных при интерпретации, и “Результат интерпретации” – литологическую таблицу, содержащую данные о глубинах границ, мощностях литологических интервалов выделенных в разрезе скважины и их коэффициентах фильтрации.

### **Автоматизированная интерпретация гамма-каротажа**

Доработанная в части морфологического объединения элементарных рудных интервалов инструктивная методика автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа подробно описана в статье [Легавко, Легавко, 2017]. В настоящее время автором разработано программное обеспечение для реализации вышеуказанной методики и ведется его опытная эксплуатация на уранодобывающих предприятиях России и Республики Узбекистан. Программное обеспечение представлено приложением “*Gamma*”, реализованным в среде программирования *Delphi* и функционирующим под управлением операционной системы *Windows*. Приложение имеет графический интерфейс, построенный на основе стандартных визуальных компонентов *Windows*, аналогичный интерфейсу приложения для интерпретации данных электрокаротажа КС. Основную часть главного окна программы занимает планшет, предназначенный для отображения обрабатываемых каротажных диаграмм, вспомогательных данных и результатов интерпретации (рис. 4).

При открытии данных гамма-каротажа программа автоматически осуществляет поиск в том же каталоге файлов с данными кавернометрии и результатами литологической интерпретации данных электрокаротажа. Если приложению удастся найти и прочитать такие файлы и в них обнаруживается информация по скважине с номером, соответствующим номеру скважины гамма-каротажа, то автоматически осуществляется открытие данных кавернометрии и литологической колонки, а также создается единая на всем интервале записи кавернометрии зона равного диаметра, значение которого получается осреднением данных кавернометрии.

Если же не удастся обнаружить или открыть требуемые файлы, а также если в них отсутствует информация по скважине с текущим номером, то на всем интервале записи гамма-каротажа создается зона равного диаметра, значение которого отвечает номинальному диаметру бурения, считываемому из файла гамма-каротажа, и литологический интервал, представленный проницаемыми породами. Пользователь может добавлять, удалять и редактировать зоны равного диаметра и литологические интервалы.

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 при наличии данных кавернометрии рассчитываются в каждой точке глубины в зависимости от диаметра

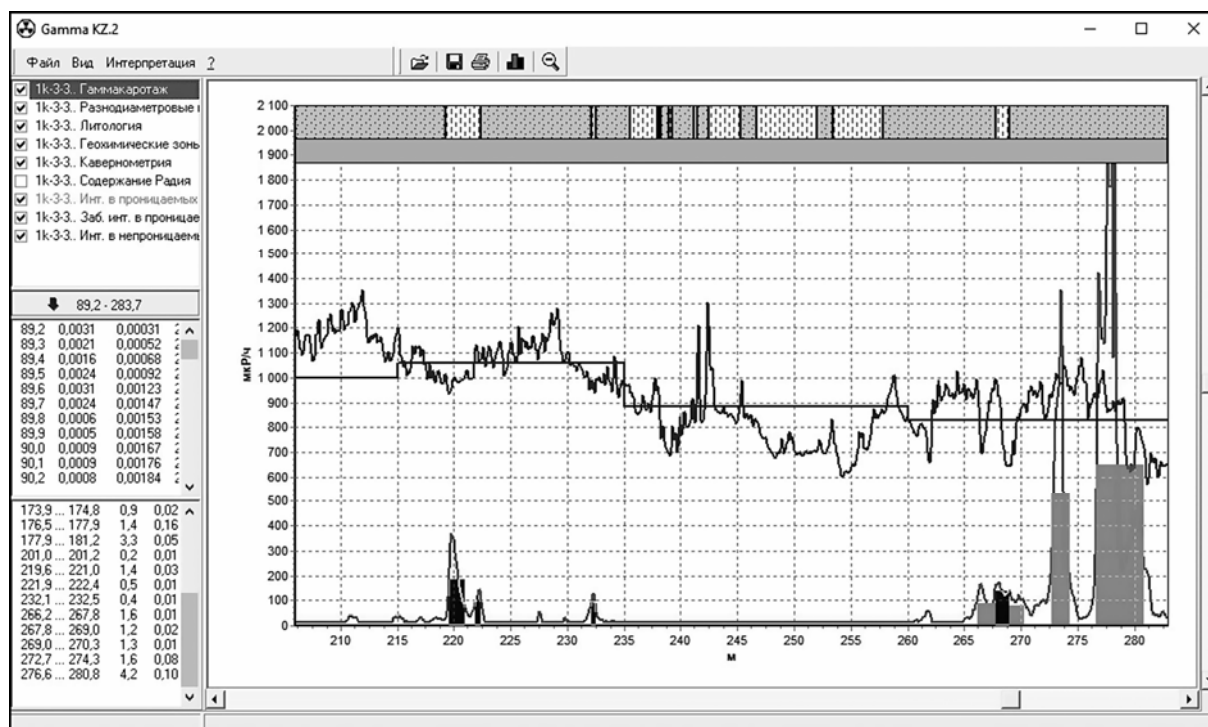


Рис. 4. Главное окно программы интерпретации данных гамма-каротажа “Gamma”

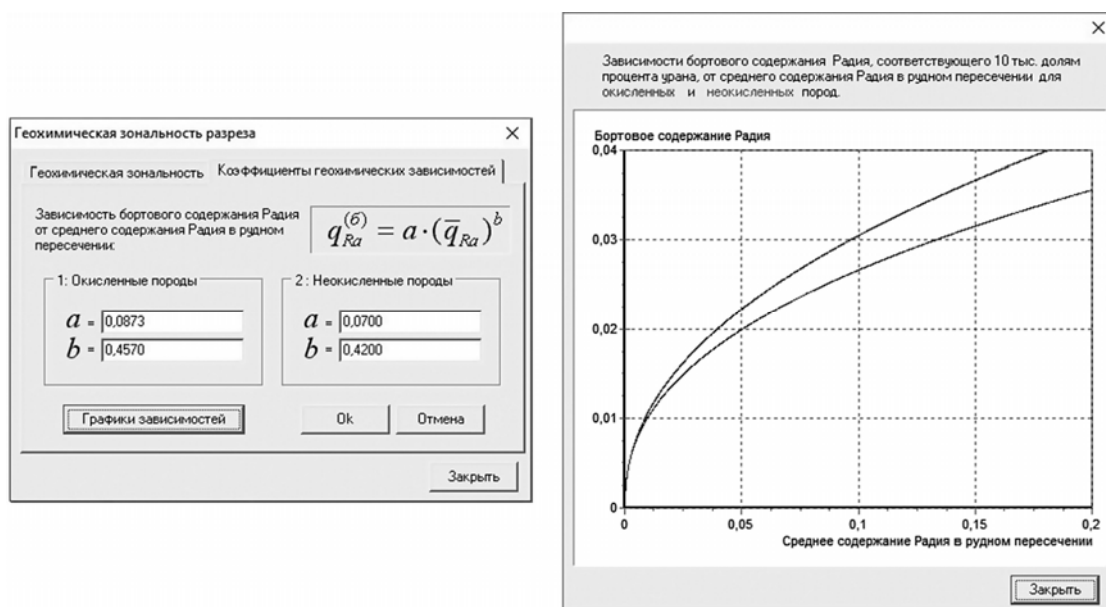
Fig. 4. Main window of the interpretation program of gamma ray logging data “Gamma”

скважины для повышения точности расчетов. Выбор коэффициентов  $B_k$  осуществляется для средних значений зон равного диаметра, так как смена коэффициентов цифрового фильтра скачком приводит к изменению площади под кривой гамма-каротажа в точках пересечения фильтров с разными коэффициентами. Поэтому границы смены зон равного диаметра должны устанавливаться оператором аккуратно и мотивированно. Чем меньше границ смены зон равного диаметра, тем меньше погрешности вычислений, вызванные изменением значений коэффициентов цифрового фильтра. По возможности необходимо воздерживаться от установки границ зон равного диаметра в интервалах интенсивного оруденения.

Литологическая колонка, полученная в результате интерпретации данных электрокаротажа или введенная вручную пользователем, используется в упрощенном виде, предполагающем разбиение разреза на проницаемые и непроницаемые породы. Разделение разреза по проницаемости используется для решения двух задач. Первая из них – разделение рудных интервалов на балансовые (находящиеся в проницаемых породах и пригодные для извлечения подземным выщелачиванием) и технологически забалансовые (находящиеся в непроницаемых породах, извлечение которых подземным выщелачиванием технологически невозможно); вторая – корректный ввод 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 задавать границы геохимических зон разреза скважины. По умолчанию считается, что весь разрез скважины представлен восстановленными породами, что соответствует “мешковой” зоне рудной залежи. Пользователь может добавлять интервалы окисленных пород, основываясь на форме гамма-аномалий, литологическом разрезе скважины и дополнительной геологической информации.

Геохимическая зональность разреза используется при интерпретации в двух направлениях – во-первых, для выбора зависимости бортового содержания радия от среднего содержания радия в рудном интервале. Зависимости бортового содержания от среднего (рис. 5) строятся отдельно для восстановленных и окисленных пород; при этом 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 их принадлежность к морфологическим элементам рудной залежи. Интервалы, и кровля, и подошва которых попадают в зону восстановленных пород, относятся к “мешковой” части залежи. Интервалы, кровля которых попадает в зону восстановленных пород, а подошва – в зону окисленных, относятся к верхнему крылу. К нижнему крылу относятся интервалы, кровля которых попадает в зону окисленных, а подошва в зону восстановленных пород. Интервалы, обе границы которых находятся в зоне окисленных пород, относятся к останцовой части залежи. Для интервалов, имеющих разную морфологическую принадлежность, при интерпретации автоматически выбираются различные значения коэффициента радиоактивного равновесия.



**Рис. 5.** Окно зависимостей бортового содержания радия от его среднего содержания в рудном пересечении в аналитическом (слева) и графическом (справа) представлении

**Fig. 5.** Window of dependences of radium cutoff grade on its average ore intersection in analytical (left) and graphical (right) representation

Коэффициенты радиоактивного равновесия, другие поправочные коэффициенты и параметры вместе с настройками алгоритма интерпретации доступны в окне параметров интерпретации (рис. 6). Часть полей этого окна заполняется автоматически при чтении файла с данными гамма-каротажа. Остальные поля заполняются оператором при настройке приложения для работы в условиях конкретной залежи конкретного месторождения.

После открытия данных гамма-каротажа, автоматического или ручного заполнения литологической колонки, установки границ зон равного диаметра и геохимических границ разреза скважины оператором запускается процесс интерпретации, в ходе которого полностью автоматически осуществляются вычисления по алгоритму, описанному в [Легавко, Легавко, 2017].



Рис. 6. Окно параметров интерпретации

Fig. 6. Window of interpretation parameters

Производится 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 суммарного линейного запаса урана вдоль ствола скважины.

Рудные интервалы, полученные в результате интерпретации, в виде прямоугольников, ширина которых соответствует мощности рудных интервалов, а высота – среднему содержанию в них урана, отображаются на планшете главного окна программы и выводятся на печать. Приложение способно осуществлять масштабную графическую печать входных каротажных диаграмм, вспомогательной информации и результатов интерпретации.

Управление содержанием графического документа и масштабами осей со значениями представленной в нем информации осуществляется посредством списка графической информации главного окна программы. На печать выводятся графические элементы, отображенные на планшете главного окна, с масштабом по оси значений, соответствующим масштабу на планшете.

Сравнение результатов интерпретации данных гамма-каротажа типичных скважин на разных инфильтрационных месторождениях урана, полученных с использованием морфологического объединения, описанного в статье [Легавко, Легавко, 2017], и результатов, полученных с использованием стандартной инструктивной методики [Хайкович и др., 1987], показало эффективность применения предлагаемого алгоритма.

## Заключение

Результаты опытной эксплуатации представленного в настоящей статье программного обеспечения показали, что его внедрение обеспечивает приемлемый уровень

автоматизации процессов интерпретации комплекса первичного каротажа открытого ствола технологических скважин, сооружаемых при обработке инфильтрационных месторождений урана методом подземного выщелачивания.

Использование методики морфологического объединения рудных интервалов, реализованной в программе интерпретации гамма-каротажа (при корректном определении морфологических и геотехнологических параметров объединения), обеспечивает повышение точности определения извлекаемых стволовых запасов урана в интервале рудного горизонта.

### Литература

- 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. Особенности интерпретации данных гамма-каротажа при подсчете запасов на инфильтрационных месторождениях урана // Геофизические исследования. 2017. Т. 18, № 2. С.55–64.
- Хайкович И.М., Зернов Л.В., Уваров Э.Ф., Серых А.С., Лучин И.А., Овчинников А.К., Бондарев В.М., Кириллов П.И. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений. М.: Министерство геологии СССР, 1987. 115 с.
- Язиков В.Г., Легавко А.В. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (водородных) месторождений урана. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 95 с.

#### Сведения об авторе

ЛЕГАВКО Дмитрий Александрович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 258-59-19. E-mail: legavko@mail.ru

## IMPROVEMENT OF METHODOICAL RECEPTIONS FOR LOG DATA INTERPRETATION AT EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF INFILTRATION URANIUM MINE FIELDS

D.A. Legavko

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The description of the software realization for automated interpretation method of primary logging complex data in open hole of technological wells, constructed during the development of infiltration uranium mine fields by in situ leaching method is presented. The description of the software module that implements the previously developed methodical approach for interpretation of resistance logging data in the sandy-clay section is provided. Short characteristics of the program for gamma-ray logging data interpretation and calculation of linear stocks of uranium with using the method of morphological join of balance ore intervals are given.

**Keywords:** gamma-ray logging, resistance logging, automated interpretation, infiltration uranium deposits, underground leaching.

### References

- Haykovich I.M., Zernov L.V., Uvarov E.F., Seryh A.S., Luchin I.A., Ovchinnikov A.K., Bondarev V.M., Kirillov P.I., *Instrukcia po gamma-karotazhu pri poiskah i razvedke uranovyh mestorozhdeniy* (The instruction for gamma-ray logging at searches and exploration of uranium fields), Moscow: Ministry of Geology of the USSR, 1987. 115 p.
- Legavko A.V., Legavko D.A., 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 issledovania* (Geophysical research), 2011, vol. 12, no. 3, pp. 55-63.
- Legavko A.V., Legavko D.A., Features of gamma-ray logging data interpretation, at resource estimation on sandstone-hosted uranium mine fields, *Geofizicheskie issledovania* (Geophysical research), 2017, vol. 18, no. 2, pp. 55-64.
- Yazikov V.G., Legavko A.V. Osobennosti provedeniya geofizicheskikh issledovaniy v skvazhinah pri izuchenii i osvoenii infiltracionnyh (gidrogennyh) mestorozhdenij urana (Features of the geophysical logging at exploration and development of infiltration (hydrogenous) uranium fields), Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2012. 95 p.