

УДК 550.8.056

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГАММА-КАРОТАЖА ПРИ ПОДСЧЕТЕ ЗАПАСОВ НА ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА

© 2017 г. А.В. Легавко, Д.А. Легавко

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

Приводится анализ существующего алгоритма автоматизированной количественной интерпретации данных гамма-каротажа с целью выявления причин систематического занижения расчетных “извлекаемых запасов” на инфильтрационных месторождениях урана, обрабатываемых методом подземного выщелачивания.

Показана необходимость морфологического объединения балансовых рудных пересечений в подсчетные интервалы, подлежащие извлечению в общем контуре закисления.

Предложен алгоритм дополнительных вычислительных процедур, направленный на формирование по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов с целью повышения точности расчета “извлекаемых запасов” урана.

Ключевые слова: гамма-каротаж, автоматизированная интерпретация, инфильтрационные месторождения урана, подземное выщелачивание.

Введение

Основными исходными данными для подсчета запасов урановых месторождений всех типов сегодня остаются результаты количественной интерпретации гамма-каротажа, при которой определяется мощность рудных интервалов, содержание в них урана и подсчитываются линейные запасы урана по стволу скважины. Достоверность результатов гамма-каротажа и возможность их применения для подсчета запасов обоснованы большим объемом сопоставления результатов интерпретации данных каротажа с результатами кернового опробования, выполненного на многочисленных месторождениях разного типа.

При поисках и разведке инфильтрационных гидрогенных урановых месторождений, обрабатываемых методом скважинного подземного выщелачивания, а также при эксплуатационной разведке и отработке месторождений этого типа методу гамма-каротажа отводится особое место. Главным техническим средством отработки таких месторождений являются буровые скважины, используемые на всех стадиях разведки и эксплуатации месторождений. Однако разрез рассматриваемых месторождений, как правило, представлен рыхлыми или слабосцементированными породами, что при бурении препятствует высокому выходу керна. В результате, основным, а зачастую и единственным, источником данных для подсчета запасов становится гамма-каротаж.

Длительный опыт применения метода гамма-каротажа при разведке и эксплуатации эндогенных месторождений урана, обрабатываемых горным способом, показал его достаточную надежность. Вместе с тем, применение этого метода на месторождениях пластового окисления, обрабатываемых методом подземного выщелачивания, представляется не столь успешным – значения расчетных “извлекаемых запасов”, получаемых

при интерпретации данных гамма-каротажа, оказываются систематически на 15–20 % ниже по сравнению с фактически добытыми.

Авторами рассматриваются особенности автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа на месторождениях урана инфильтрационного типа и предлагается алгоритм дополнительных вычислительных процедур, направленных на формирование по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов с целью повышения точности определения “извлекаемых запасов” урана.

Интерпретация данных гамма-каротажа

Как известно, природный уран представляет собой смесь двух изотопов – ^{238}U (99.28 %) и ^{235}U (0.71 %). Среди продуктов их распада присутствует ряд гамма-излучающих изотопов, включая радий, с которым в основном, как принято считать на практике, связано все гамма-излучение природных урансодержащих образований.

В длительно живущих замкнутых природных системах между содержанием урана, радия и других гамма-активных продуктов распада устанавливается равновесие, позволяющее по интенсивности гамма-излучения определять содержания урана. Однако природные системы всегда в какой-то степени не замкнуты, и в них может “теряться” часть промежуточных продуктов и, как следствие, нарушаться радиоактивное равновесие. Чаще всего такое нарушение бывает связано с разной геохимической подвижностью двух элементов – самого урана и радия.

Соотношение между содержанием радия и урана принято выражать коэффициентом радиоактивного равновесия $K_{\text{P.P.}}$:

$$K_{\text{P.P.}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{C_{\text{U}}}, \quad (1)$$

где C_{Ra} – массовая доля радия в единицах равновесного урана ($1 \text{ г U} \approx 3.4 \cdot 10^{-7} \text{ г Ra}$); C_{U} – массовая доля урана. Для равновесных руд $K_{\text{P.P.}}=1$; при избытке радия $K_{\text{P.P.}}>1$, при недостатке – $K_{\text{P.P.}}<1$.

Таким образом, соотношение между концентрацией урана и интенсивностью гамма-излучения зависит, во-первых, от коэффициента радиоактивного равновесия $K_{\text{P.P.}}$, а, во-вторых, от химического состава среды, плотности и влажности руд, наличия других гамма-активных элементов и технических характеристик измерительной аппаратуры. Строго говоря, связь между концентрацией урана и интенсивностью гамма-излучения имеет статистический, а не функциональный характер. Однако количество факторов, влияющих на это соотношение, не столь велико, и все они, в принципе, поддаются учету и контролю. Поэтому концентрация урана может быть определена как функция интенсивности излучения при введении разных поправок [Язиков, Легавко, 2012].

Министерством геологии СССР в 1987 г. была разработана и утверждена Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений [Хайкович и др., 1987], которая действует по настоящее время, строго регламентируя все этапы работ методом гамма-каротажа на месторождениях урана – от проведения скважинных исследований до камеральной обработки данных.

Особое внимание в инструкции уделяется автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа с помощью ЭВМ, для чего предлагается инструктивный алгоритм, реализующий двухэтапный процесс вычислений. На первом этапе определяется концентрация радия вдоль ствола скважины; на втором находятся границы рудных интервалов и рассчитывается содержание в них урана.

Для расчета концентрации радия в точках x_n вдоль ствола скважины используется формула

$$C_{\text{Ra}}(x_n) = \frac{P}{K_0 M (1 - W)} \sum_{k=-N}^N B_k I(x_n + k\Delta) - C_0, \quad (2)$$

в которой K_0 – пересчетный коэффициент скважинного прибора; M – поправочный коэффициент, учитывающий поглощение гамма-излучения промывочной жидкостью; P – поправка за нарушение радиоактивного равновесия между радоном и радием в около-скважинном пространстве вследствие “отжатия” от скважины радонсодержащих вод фильтратом бурового раствора (“отжатие радона”); W – влажность руды; $I(x_n + k\Delta)$ – результаты измерения гамма-излучения в точках $x = x_n + k\Delta$; Δ – шаг квантования по глубине; B_k – коэффициенты цифрового фильтра, зависящие от плотности руды, конструкции скважины и скважинного прибора; N – число точек цифрового фильтра с коэффициентами B_k , выбираемое так, чтобы $\sum_{k=-N}^N B_k$ отличалась от единицы не более чем на 0.005; C_0 – поправка за наличие в рудах тория и калия [Хайкович и др., 1987].

Границы рудных интервалов и содержание в них урана определяются в зависимости от типа месторождения. На месторождениях эндогенного (“коренного”) типа вблизи рудных тел отсутствуют радиевые ореолы, приводящие к изменению коэффициента $K_{\text{Р.Р.}}$ у границ рудных интервалов. Содержание урана получается путем деления значения содержания радия, вычисленного по формуле (2), на коэффициент $K_{\text{Р.Р.}}$. Границы рудных интервалов устанавливаются в пределах интервалов, содержание урана в которых превышает его кондиционное бортовое содержание.

На месторождениях гидрогенного (инфильтрационного) типа, для которых характерно наличие радиевых ореолов вблизи рудных тел, определение границ рудных по урану интервалов проводится с использованием зависимости бортового содержания радия от его среднего содержания в рудном интервале. Границы устанавливаются итерационно в пределах интервалов с содержанием радия больше бортового, определяемого по зависимости от среднего содержания радия в границах выделяемых интервалов. В выделенных рудных интервалах значение среднего содержания урана рассчитывается путем деления среднего содержания радия на коэффициент $K_{\text{Р.Р.}}$ [Хайкович и др., 1987].

Анализ инструктивного алгоритма автоматизированной интерпретации

Первый этап автоматизированной интерпретации – пересчет интенсивности гамма-излучения вдоль ствола скважины в содержание радия по формуле (2) – может внести лишь незначительный вклад в формирование систематической ошибки при подсчете линейных запасов. Во-первых, как отмечалось выше, опыт применения такой методики для интерпретации данных гамма-каротажа на эндогенных месторождениях урана говорит о ее достаточной надежности. Во-вторых, методика определения поправочных коэффициентов довольно точно формализована и обеспечивает правильность их использования. Погрешности определения поправочных коэффициентов невелики (3–5 %) и обычно не носят систематического характера. В связи с отмеченным причины систематического занижения расчетных значений запасов урана на экзогенных месторождениях необходимо искать не в алгоритме первого этапа интерпретации, а в алгоритме второго, на котором происходит определение границ рудных интервалов и подсчет содержания в них урана.

Гидрогенные месторождения урана отличаются пространственной изменчивостью коэффициента радиоактивного равновесия, наличием радиевых ореолов вблизи рудных тел и, как следствие, нечеткими границами оруденения, что требует специальных методов определения и учета соответствующих поправок.

Алгоритм выделения рудных интервалов, предложенный для экзогенных инфильтрационных месторождений [Хайкович и др., 1987], базируется на классическом представлении о строении ролловой ураноносной залежи (рис. 1).

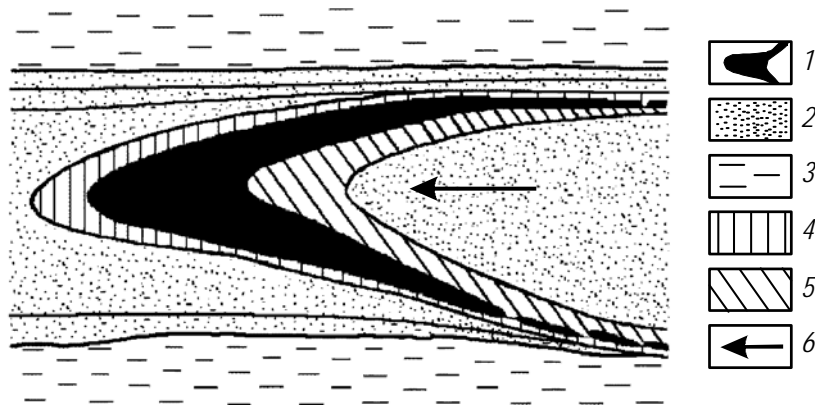


Рис. 1. Схематический разрез ролловой ураноносной залежи: 1 – урановая руда; 2 – пески; 3 – глины; 4 – диффузионный ореол радия; 5 – остаточный ореол радия; 6 – направление движения пластовых вод

Для определения границ урансодержащих рудных интервалов используется зависимость бортового содержания радия от его среднего содержания в интервале. Графики таких зависимостей (или их аналитические выражения) строятся на этапе разведки месторождений по данным опробованных по керну граничных зон с известным содержанием урана и радия на границах руды для каждой отдельной залежи (рис. 2).

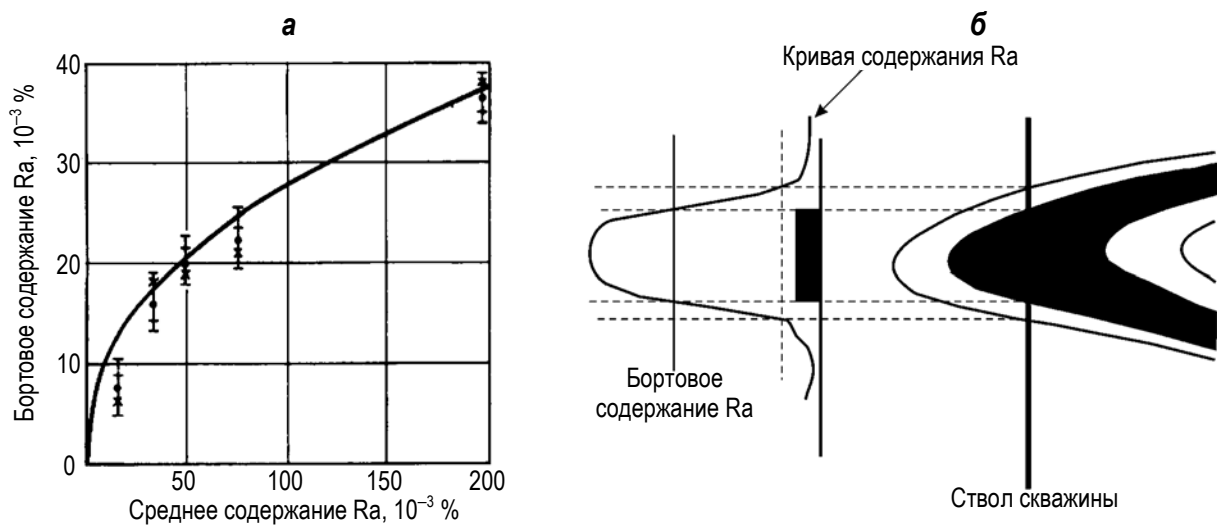


Рис. 2. График зависимости бортового содержания радия (Ra) от его среднего содержания в рудном интервале (а) и схема, иллюстрирующая использование графика при определении границ рудного интервала (б). Описание см. в тексте

При выделении рудного интервала в предварительно определенных границах подсчитывается значение среднего содержания радия; по зависимости бортового содержания радия от среднего (см. рис. 2, а) определяется бортовое содержание радия для выделяемого интервала, после чего его границы переопределяются в условиях нового значения бортового содержания. Это позволяет исключить радиевые ореолы из контура рудного пересечения. В выделенных границах среднее содержание радия делят на значение $K_{р.р.}$, получая таким образом среднее содержание урана в рудном интервале.

Однако, не оспаривая в общем виде положение о наличии радиевых ореолов и необходимости их отсека, следует заметить, что морфология рудных залежей гидрогенных месторождений урана обычно много сложнее, чем схематическое представление “классического” ролла (см. рис. 1). По фронту “мешковой” части ролловой залежи часто развиваются языки и апофизы уранового оруденения, отличающиеся слабым развитием радиевых ореолов и принадлежностью к одному рудному телу. Характерным примером подобных месторождений может служить месторождение Канжуган в Казахстане, геологический разрез которого приведен на рис. 3. Довольно часто вдоль ствола скважины складывается ситуация, когда мощный интервал богатых балансовых руд сопровождается ореолом интервалов бедных и маломощных руд, расположенных на небольших расстояниях друг от друга и от основного интервала. Обычно эти интервалы морфологически относятся к одной рудной залежи и на небольшом расстоянии от скважины могут сливаться в единое тело [Бровин и др., 1997].

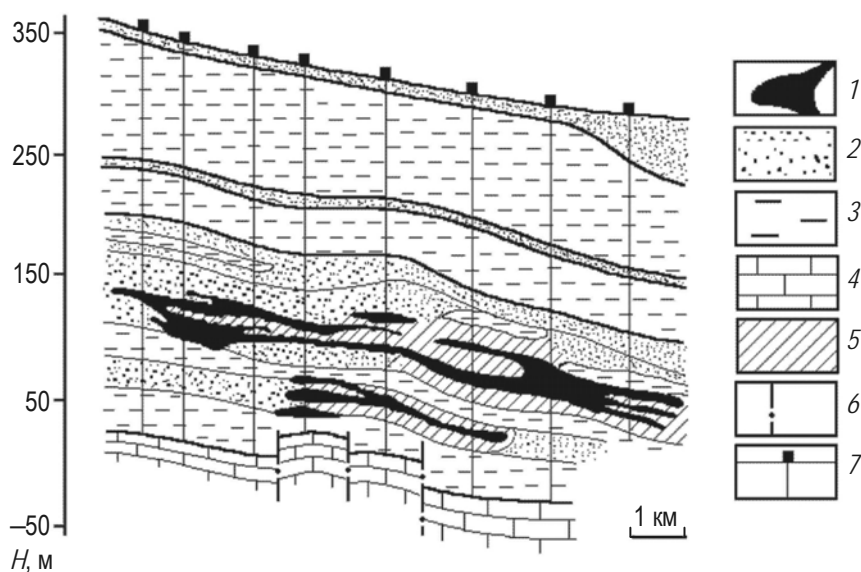


Рис. 3. Геологический разрез месторождения Канжуган (Казахстан): 1 – рудные тела; 2 – пески; 3 – глины; 4 – известняки фундамента; 5 – пластовое окисление; 6 – разломы; 7 – разведочные скважины. По [Бровин и др., 1997] с изменениями

Существенный недостаток инструктивного алгоритма выделения рудных интервалов состоит в исключении из подсчета запасов урана, содержащегося в пропластках, разделяющих рудные интервалы, морфологически принадлежащие одному рудному телу.

Уран, который залегает в пропластках, разделяющих условные рудные интервалы, неминуемо подлежит извлечению в рамках контура закисления, охватывающего рудное тело. Поэтому при подсчете запасов его необходимо учитывать наравне с ураном балансовых пересечений.

Морфологическое объединение элементарных рудных интервалов

Анализ алгоритма выделения рудных интервалов и морфологии рудных залежей инфильтрационных месторождений урана показал, что для упрощения морфологии рудных пересечений и повышения точности подсчета запасов после выделения элементарных рудных пересечений необходимо выполнить ряд вычислительных процедур, направленных на формирование по морфологическим и геотехнологическим параметрам объединенных рудных интервалов (рис. 4).

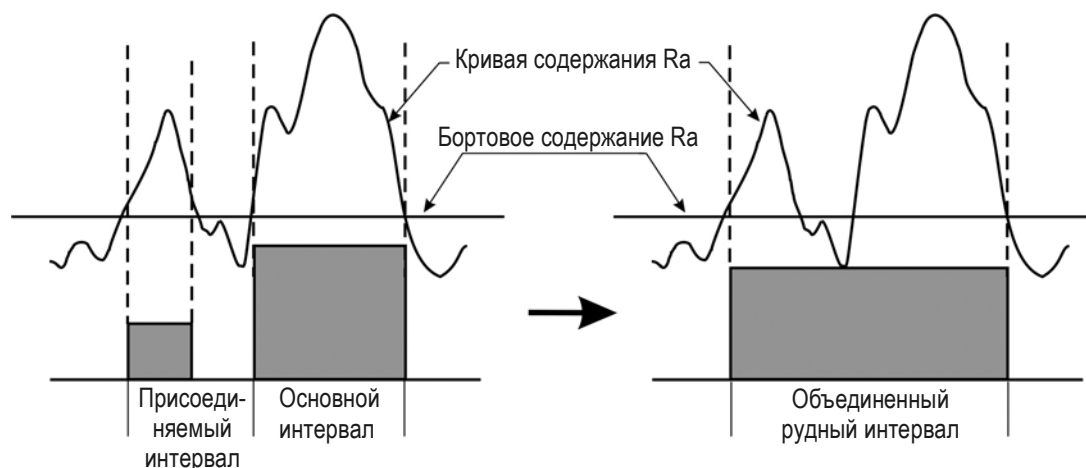


Рис. 4. Схематическое представление морфологического объединения рудных интервалов

Основным морфологическим параметром является максимально допустимая мощность безрудного слоя (L), который разделяет элементарные рудные интервалы, проверяемые на возможность объединения. Значение L определяется по результатам анализа материалов разведочных работ, геотехнологических характеристик месторождения и опыта эксплуатации его отдельных частей.

Другой важный параметр – наличие непроницаемых пород в безрудном слое, разделяющем элементарные рудные интервалы, проверяемые на возможность объединения. Если в разрезе продуктивного горизонта месторождения часто встречаются мало-мощные прослои непроницаемых пород, которые не нарушают морфологической цельности рудных тел, объединение разделяемых ими рудных интервалов может проводиться. При этом должна быть определена максимально допустимая мощность непроницаемого слоя (L_H), включаемого в рудный контур; содержание урана в этом слое принимается равным нулю в связи с невозможностью его извлечения. Если же слои непроницаемых пород разделяют технологические этажи оруденения либо существенно нарушают технологический процесс подземного выщелачивания, то объединение рудных интервалов с включением в рудный контур непроницаемых пород не допускается.

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

Включение в объединенный интервал вместе с присоединяемым рудным пропластком безрудного приводит к “разубоживанию” – снижению концентрации урана в присоединяемом интервале. Для недопущения чрезмерного разубоживания вводится максимальный коэффициент разубоживания.

Дополнительное геотехнологическое условие объединения рудных интервалов – среднее содержание в присоединяемых рудном и безрудном интервалах должно быть

не менее произведения кондиционного содержания на максимальный коэффициент разубоживания. Значение последнего также определяется по результатам анализа материалов и результатов разведочных работ, геотехнологических характеристик месторождения и опыта эксплуатации его отдельных частей.

В ситуации, когда мощный интервал “богатых” балансовых руд сопровождается ореолом интервалов “бедных” и маломощных, формальное выполнение двух последних условий при объединении может обеспечиваться основным “богатым” интервалом, что вероятно приведет к необоснованно сильному разубоживанию. Поэтому при объединении рудных интервалов должна проверяться возможность присоединения “бедных” интервалов к более “богатым”, но не наоборот.

Таким образом, при выполнении объединения на соответствие геотехнологическим условиям объединения этой процедуры должны быть проверены все элементарные рудные интервалы последовательно от “богатых” к “бедным”. При этом рассматриваются рудные интервалы, разделенные безрудными мощностью не более L , с непроницаемыми слоями мощностью не более L_H и элементарными рудными интервалами, содержание урана в которых недостаточно высоко, чтобы самостоятельно обеспечить условия присоединения к основному интервалу.

Реализация автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа

Программная реализация автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа осуществляется на основе инструктивного алгоритма с использованием усовершенствованных механизмов ввода поправочных коэффициентов и процедуры морфологического объединения рудных интервалов.

Первый этап интерпретации – пересчет интенсивности гамма-излучения вдоль ствола скважины в содержание радия – осуществляется согласно инструкции по формуле (2). При этом основное внимание уделяется корректности ввода поправочных коэффициентов и возможности их настройки для обеспечения гибкости при использовании на разных месторождениях.

После расчета содержания радия вдоль ствола скважины осуществляются вычисления по следующему алгоритму автоматического выделения элементарных рудных пересечений, их объединения в морфологически цельные рудные интервалы и подсчета в них линейных запасов урана.

1. Выделяются интервалы, находящиеся в проницаемых породах, внутри которых массовая доля радия больше или равна заданной:

$$C_{Ra}^{cut} = C_U^{cut} \frac{K_{p.p.}}{P}, \quad (3)$$

где C_U^{cut} – бортовое содержание урана для кондиций балансовой руды; $K_{p.p.}$ – средний на интервале интерпретации коэффициент радиоактивного равновесия проницаемых пород; P – средняя на интервале интерпретации поправка на “отжатию” радона.

2. В выделенных границах подсчитывается средняя массовая доля радия \bar{C}_{Ra} как среднее арифметическое значение содержания радия в точках, заключенных в границах этого интервала.

3. Для рассчитанного значения \bar{C}_{Ra} по графику зависимости C_{Ra}^{cut} от \bar{C}_{Ra} находится значение C_{Ra}^{cut} ; выделяется интервал, в котором массовая доля радия больше C_{Ra}^{cut} , и в границах этого интервала подсчитывается среднее значение массовой доли радия \bar{C}_{Ra} .

4. Процедура по п. 3 повторяется до тех пор, пока границы рудного интервала не перестанут меняться. Эти границы определяют мощность элементарного рудного интервала.

5. Для расчета средней массовой доли урана в выделенных границах элементарных рудных интервалов \bar{C}_{Ra} делится на среднее для интервала значение коэффициента радиоактивного равновесия $K_{P.P.}$. Средние значения коэффициента определяются по результатам литологической интерпретации данных электрокаротажа как средние взвешенные на мощность значения $K_{P.P.}$ для всех литотипов пород, попавших в границы рудного интервала.

6. После выделения всех элементарных рудных интервалов, удовлетворяющих условиям балансовых запасов, осуществляется процедура их морфологического объединения. Рассмотрение условий объединения элементарных рудных интервалов начинается с нахождения основного рудного интервала с наибольшим линейным запасом $m \cdot C$ (произведение мощности рудного интервала m на содержание в нем урана C). Потенциально присоединяемые интервалы, удовлетворяющие морфологическим параметрам объединения, оцениваются на возможность их объединения по геотехнологическим условиям.

7. Если объединение элементарных рудных интервалов состоялось, начинается рассмотрение возможности нового объединения (от определения рудного интервала с наибольшим значением $m \cdot C$ и выявления потенциально присоединяемых интервалов). Если объединение не состоялось, на предмет объединения рассматривается следующий (с меньшим значением $m \cdot C$) рудный интервал. Процесс продолжается до тех пор, пока на предмет объединения не будут рассмотрены все элементарные рудные интервалы.

8. После завершения процедуры объединения балансовых рудных интервалов осуществляется выделение технологического “забаланса” – рудных интервалов, расположенных в непроницаемых породах. Поскольку морфологически этот сорт руд располагается компактно, вопрос объединения рудных интервалов в непроницаемых породах не ставится, т.е. процедура выделения технологического “забаланса” заканчивается выделением элементарных рудных интервалов. Кроме того, у рудных тел, расположенных в непроницаемых породах, отсутствуют ярко выраженные радиевые ореолы, что позволяет существенно упростить процедуру выделения рудных интервалов.

Содержание радия в точках x_n , которые находятся в непроницаемых породах, переводится в содержание урана по формуле

$$C_U(x_n) = \frac{C_{Ra}(x_n)}{K_{P.P.}^H}, \quad (4)$$

где $K_{P.P.}^H$ – коэффициент радиоактивного равновесия непроницаемых пород. Выделяются интервалы, внутри которых содержание урана больше или равно бортовому содержанию для технологически забалансовых руд, и в их границах подсчитывается среднее содержание урана как среднее арифметическое значение содержания в точках, заключенных в границах данного интервала.

9. После завершения процедуры выделения окончательно рассчитываются и заносятся в память ЭВМ мощности рудных интервалов, средние содержания и линейные запасы урана в них. Отдельно для каждого сорта руды рассчитывается суммарный линейный запас в выделенных интервалах. Извлекаемые запасы по скважине определяются линейным запасом руд балансового сорта.

Результаты применения алгоритма морфологического объединения

Сравнение результатов интерпретации данных гамма-каротажа характерных скважин на разных инфильтрационных месторождениях урана, полученных с использованием морфологического объединения и без него, показало эффективность применения предлагаемого алгоритма.

При корректном определении морфологических и геотехнологических параметров объединения расчетные стволовые запасы урана в интервале рудного горизонта увеличиваются в среднем на 10–15 %, что приводит к уменьшению занижения “извлекаемых” запасов до 5–10 %. Такой результат может считаться вполне удовлетворительным при семипроцентной погрешности измерений и в среднем пятипроцентной погрешности определения поправочных коэффициентов.

Заключение

Выполнение при автоматизированной интерпретации данных гамма-каротажа на инфильтрационных месторождениях, обрабатываемых методом подземного выщелачивания, процедуры морфологического объединения позволяет более точно рассчитывать запасы урана. Это обеспечивается благодаря учету урана, залегающего в пропластках, которые разделяют интервалы балансового оруденения, морфологически относящиеся к одной залежи и попадающие в технологический контур закисления.

Кроме того, благодаря этой процедуре существенно упрощается морфология балансовых рудных пересечений, что позволяет более точно и оперативно решать задачи подсчета объемных запасов урана и определения системы вскрытия рудного горизонта – выбора интервала установки скважинного фильтра.

Литература

- 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.
- 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. С.104–110.
- Язиков В.Г., Легавко А.В.* Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 95 с.

Сведения об авторах

ЛЕГАВКО Александр Васильевич – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 221-93-55. E-mail: avleg@mail.ru

ЛЕГАВКО Дмитрий Александрович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 221-93-55. E-mail: legavko@mail.ru

GAMMA-RAY LOGGING DATA INTERPRETATION AT RESOURCE ESTIMATION ON SANDSTONE-HOSTED URANIUM MINE FIELDS

A.V. Legavko, D.A. Legavko

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

Abstract. The analysis of existing algorithm of automated quantitative interpretation for gamma-ray logging data is given for the purpose of identification the reasons of systematic understating of extractable reserves on the infiltration uranium mine fields, which exploited with using in situ leaching method.

The necessity of morphological join of balance ore intersection in the united intervals which are subject to extraction in the common acidulation contour is shown.

The algorithm of the additional computing procedures to form the united ore intervals based on morphological and geotechnological parameters for increasing the accuracy of definition of the extractable uranium reserves is offered.

Keywords: gamma-ray logging, automated interpretation, infiltration uranium mine fields, in situ underground leaching.

References

- Brovin K.G., Grabovnikov V.A., Shumilin M.V., and Yazikov V.G., *Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaya ocenka mestorozhdenij urana dlya otrabotki podzemnym vyshelachivaniem* (The forecast, searches, exploration and the industrial evaluation of uranium fields for development by an in situ underground leaching), Almaty: Gylym, 1997.
- Haykovich I.M., Zernov L.V., Uvarov E.F., Seryh A.S., Luchin I.A., Ovchinnikov A.K., Bondarev V.M., Kirillov P.I., *Instruktsia po gamma-karotazhu pri poiskah i razvedke uranovykh mestorozhdeniy* (The instruction for gamma-ray logging at searches and exploration of uranium fields), Moscow: Ministry of Geology of the USSR, 1987.
- Yazikov V.G. and Legavko A.V. *Osobennosti provedeniya geofizicheskikh issledovaniy v skvazhinakh pri izuchenii i osvoenii infiltracionnykh (gidrogennykh) 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.