

Р. Г. Темирханова¹, С. В. Шиманский²

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КАРОТАЖА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ ПРИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ НА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

¹ Казахский Национальный технический университет им. К.И.Сатпаева, Казахстан, 050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22

² Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

В статье рассматриваются актуальные вопросы внедрения КНД-м — прогрессивного метода изучения руд пластово-инфильтрационных месторождений урана, приводятся примеры его применения на рудных объектах Чу-Сарысуйской рудной провинции. Внедрение метода достоверного определения содержания урана непосредственно в буровых скважинах является оптимальным решением задачи повышения эффективности поисково-оценочных и разведочных работ на пластово-инфильтрационных месторождениях урана. Таким методом является метод каротажа мгновенных нейтронов деления (КНД-м). КНД-м представляет собой одну из модификаций импульсных нейтрон-нейтронных методов каротажа (ИННК) и служит для прямого определения урана в скважинах. Данные КНД-м позволяют выбрать правильный алгоритм расчета содержания урана с учетом геохимической обстановки и однозначно определить интервал посадки фильтров при сооружении технологических скважин. Библиогр. 9 назв. Ил. 5. Табл. 1.

Ключевые слова: КНД-м, гамма-каротаж, пластово-инфильтрационные месторождения, коэффициент радиоактивного равновесия, зона пластового окисления.

CURRENT PROBLEMS OF PROMPT FISSION NEUTRON LOGGING APPLICATION DURING URANIUM FIELDS EXPLORATION

R. G. Temirkhanova, S. V. Shimanskiy

¹ Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, 22a, ul. Satpaeva, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan

² St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

This article deals with topical issues of implementation of the prompt fission neutron logging progressive method of studying ore in the stratified infiltration uranium deposits, and presents the examples of its use in the ore objects of the Chu Sarysu ore province. Introducing a reliable method of determining uranium content directly in the boreholes would optimally solve the problem of increasing the efficiency of prospecting, evaluation and exploration works in the stratified infiltration deposits of uranium. One such method is prompt fission neutron logging. Prompt fission neutron logging is one of the modifications of the thermal neutron die-away logging methods and is used for directly determining the level of uranium in wells. Prompt fission neutron logging data allows to select the correct algorithm of uranium content calculation taking into account the geochemical environment, and to unambiguously determine the filter interval for production wells. Refs 9. Figs 5. Tables 1.

Keywords: prompt fission neutron logging, gamma logging, deposits of the stratified infiltration type, the radioactive equilibrium factor (REF), the interbedding oxidation area (IOA).

В настоящее время основу минерально-сырьевой базы для добычи урана в Казахстане составляют экзогенные инфильтрационные месторождения урана, связанные с региональными зонами пластового окисления. Образование пластово-инфильтрационных урановых месторождений возможно только в условиях достаточно свободной миграции растворенного кислорода в проницаемые части земной коры. Главным условием возможности глубокого проникновения кислорода является отсутствие в приповерхностных условиях активных восстановителей, что возможно

только в районах с аридным или субаридным климатом. Важнейшим рудоконтролирующим фактором на инфильтрационных месторождениях являются зоны пластового окисления (ЗПО), причем оруденение связано с ними не только пространственно, но и генетически. На границе выклинивания ЗПО образуется восстановительный барьер, на котором и происходит осаждение урана и формирование рудных залежей [1].

Месторождения пластово-инфильтрационного типа в настоящее время обеспечивают более трети мировой добычи урана. Начало разработки серии крупнейших рудных объектов данного типа в Чу-Сарысуйской провинции в 2000-х годах позволило Республике Казахстан прочно занять позицию мирового лидера по производству урана. Однако эксплуатация этих месторождений сопряжена с рядом специфических проблем, существенно влияющих на эффективность процесса добычи. К их числу относится крайне непостоянное значение отношения содержаний радия и урана — коэффициента радиоактивного равновесия (КРР). Оно обусловлено миграционной способностью этих элементов в ситуации подвижной, открытой системы, каковой является урановорудное тело относительно молодых и всё ещё формирующихся инфильтрационных месторождений Чу-Сарысу [2]. Вариации КРР здесь достигают более порядка даже в пределах одного рудного пересечения, что самым критичным образом влияет на кондиции руд. Следовательно, они должны учитываться при оценке и отработке месторождения. Метод гамма-каротажа (ГК), традиционно используемый при разведке и эксплуатации урановых месторождений, не позволяет достоверно распознать элемент-источник гамма-аномалии, поскольку определяет общий уровень гамма-активности без разделения на изотопы. Сопутствующий анализ кернового материала хоть и обеспечивает получение достаточно точной оценки содержания полезного компонента, но, в свою очередь, тоже имеет ограничения, связанные с неизбежными потерями образцов керна, а также высокой стоимостью кернового бурения и аналитических работ.

Применение нейтронных методов исследования скважин позволяет повысить достоверность геофизических заключений и, как следствие, сократить сроки и затраты на поиски и разведку, применять более прогрессивные и экономичные системы разработки месторождений, повысить коэффициент извлечения запасов. Использование нейтронных методов дает возможность значительно уменьшить ошибки при подсчете запасов и повысить удельную эффективность затрат на разведку. Отсюда вытекает высокая перспективность научных, опытно-методических и производственных работ по совершенствованию существующих и созданию новых нейтронных методов исследования горных пород [3].

Внедрение метода достоверного определения содержания урана непосредственно в буровых скважинах является оптимальным решением задачи повышения эффективности поисково-оценочных и разведочных работ на пластово-инфильтрационных месторождениях урана. Таким методом является каротаж мгновенных нейтронов деления (КНД-м).

КНД-м является одной из модификаций импульсных нейтрон-нейтронных методов каротажа (ИННК) и служит для прямого определения урана в скважинах. Метод основан на регистрации мгновенных нейтронов деления протекающих в основном на радионуклидах ^{235}U при облучении рудовмещающих пород потоком быстрых нейтронов от импульсного нейтронного генератора. Следовательно, данные измерения

не зависят от содержаний в рудах радия, тория, радиоизотопа калия, и интерпретация их результатов, в отличие от данных гамма-каротажа, не требует внесения поправок на радиоактивное равновесие между элементами ураново-радиевого ряда.

Ниже приведено сопоставление графиков, построенных по результатам ГК и КНД-м. Измерения проводились в технологической скважине, расположенной в пределах месторождения Буденновское. Графики на рис. 1 явно указывают на различие природы радиоактивных аномалий, выявленных этими методами. Две аномалии, зафиксированные методом ГК в интервале 668–677,5 м, по данным КНД-м обусловлены только высокими содержаниями радия, содержания урана здесь находятся в пределах фонового уровня. В то же время, в интервалах 664,5–666,5, 667,9–668,1 и 685–690 м по данным КНД-м содержание урана превышает значения, полученные по результатам интерпретации данных ГК. Это обусловлено радиологией месторождения Буденновское.



Рис. 1. Результаты сопоставления данных ГК и КНД-м в технологической скважине месторождения Буденновское

Следующие данные получены с того же месторождения Буденновское, но с разведочной скважины. На рис. 2 и 3 приводятся результаты опробования керна и сопоставления КНД-м и гамма-каротажа, проведенных в данной скважине.

Сопоставление результатов КНД-м и ГК указывает на то, что аномалия в интервале 595–604 м, зафиксированная по гамма-каротажу прибором КСП-60 в рудном пересечении, обусловлена перераспределением радия и не подтверждается по данным каротажа КНД-м, выполненного прибором АИНК-60.

На рис. 4 приведен разрез по буровому профилю, составленный с использованием результатов геофизических исследований скважин, в том числе КНД-м, геологической документации и геохимических анализов проб керна. На профиле находится разведочная скважина № 28, в которой проводились вышеуказанные исследования. Как видно из рисунка, на границах урановых рудных тел в процессе рудообразования сформировались радиевые ореолы. При перемещении зоны пластового окисления (ЗПО) контур урановых залежей смещается по потоку подземных вод быстрее, чем контур залежей радия. В связи с этим на разрезах наблюдается несовпадение контуров

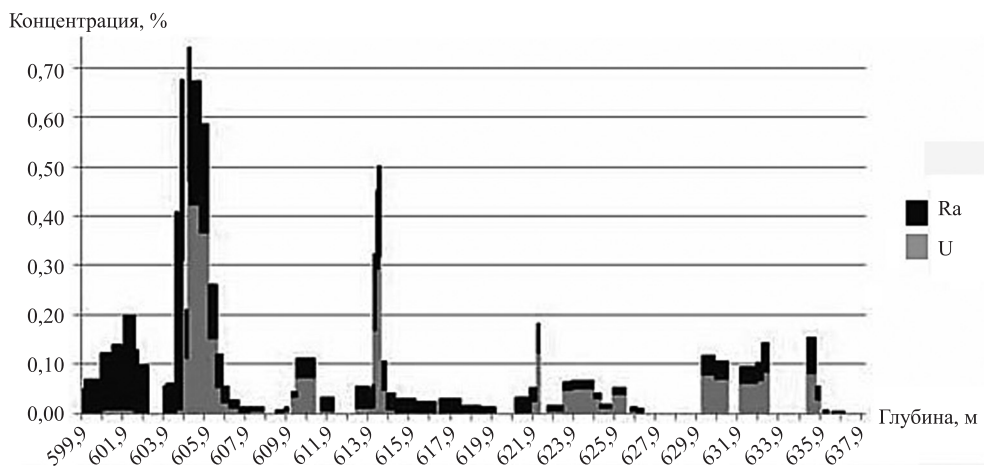


Рис. 2. Результаты опробования керна (U, Ra) в разведочной скважине № 28 месторождения Буденновское

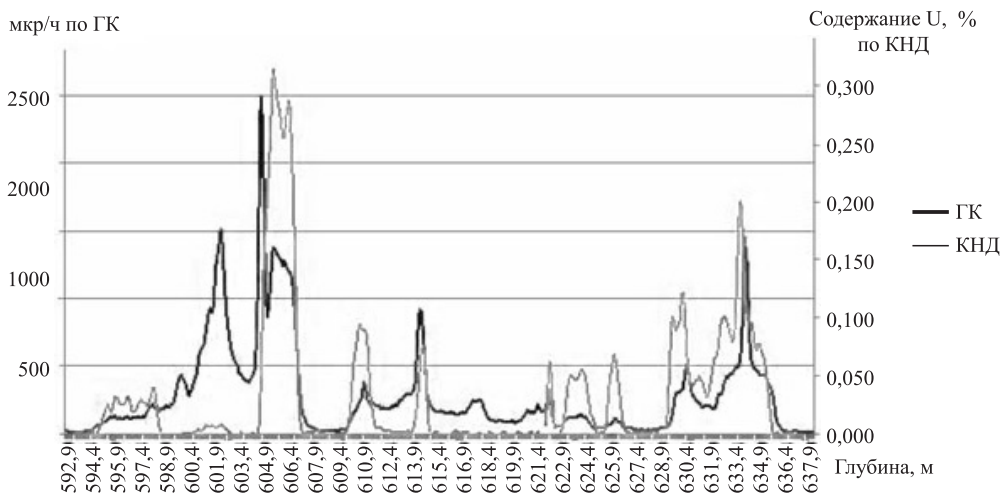


Рис. 3. Результаты сопоставления данных ГК и КНД-м в разведочной скважине № 28 месторождения Буденновское

залежей радия и урана. Контур залежей радия смещен в сторону окисленных пород; в частях рудных залежей, прилегающих к ЗПО, имеются остаточные радиевые ореолы.

Опыт применения аппаратуры КНД-м показал преимущества этого метода перед ГК (устойчивость к смещению радиоактивного равновесия, более точное определение мощностей продуктивных интервалов, отсутствие влияния эффекта «отжатия» радона). Природа этого явления обусловлена формированием зоны проникновения фильтрата бурового раствора в пористые горизонты. Замещение пластовых вод фильтратом приводит к снижению интенсивности гамма-излучения, следовательно, требуется введение соответствующих поправочных коэффициентов в данные измерений ГК.

Преимущества КНД-м видны в условиях смещения радиоактивного равновесия в сторону радия при разведочном бурении на месторождении Буденновское (см. рис. 4). Результаты интерпретации по КНД-м использовались только как качественное определение параметров оруденения и для определения границ зоны пластового окисления.

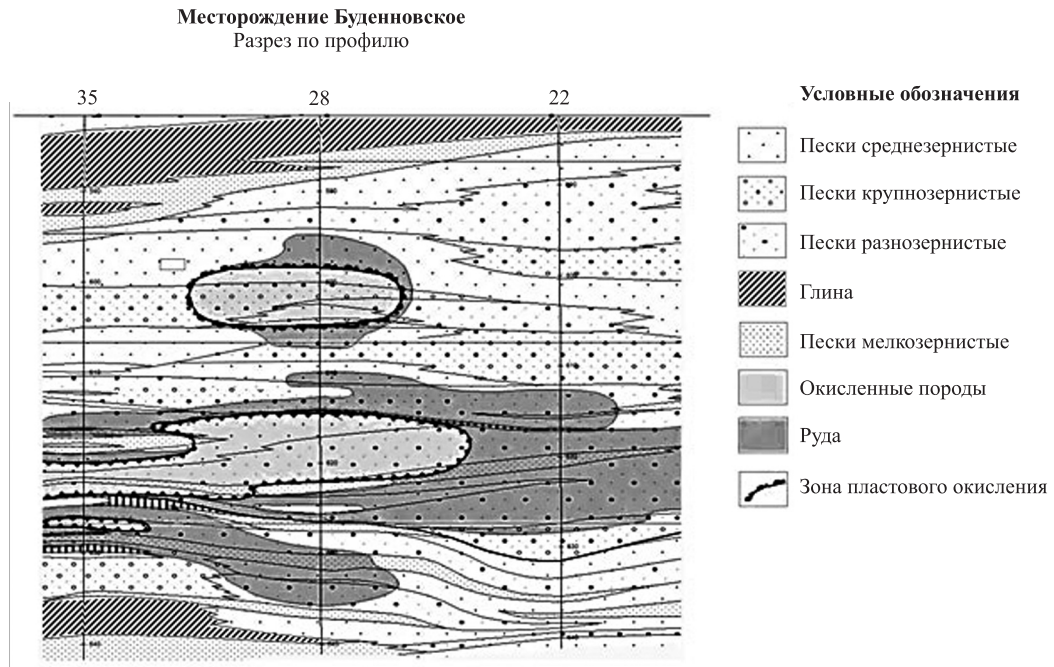


Рис. 4. Месторождение Буденновское. Геологический разрез по профилю

Применение метода КНД-м в качестве экспресс-метода экономически выгоднее, чем отбор и анализ керна, тем более что результаты анализа, как правило, появляются у геолога со значительным опозданием после бурения скважины. Это связано с тем, что анализ керна включает в себя очистку, сушку, анализ гранулометрического состава, регистрацию гамма излучения керна и т. д., что занимает значительное время.

Данные КНД-м позволяют выбрать правильный алгоритм расчета содержаний урана с учетом геохимической обстановки и однозначно определить интервал посадки фильтров при сооружении технологических скважин.

В начале 1970-х годов в НПО «Рудгеофизика» была разработана и внедрена в производство скважинная аппаратура АГА-101 «Импульс» ТСКУ-91 (выпуск прекращен в конце 1980-х годов) для прямого определения урана в рудах песчано-глинистого состава на гидрогенных месторождениях методом КНД-м. Аппаратура успешно использовалась в различных ПГО Мингео СССР для подсчета запасов на стадии предварительной разведки месторождений с получением подсчетных параметров по рудным интервалам, близким к фактическим. Современным аналогом аппаратуры СПМ-60 является аппаратура АИНК-60, используемая на рудниках НАК «Казатомпром» с 2000 г.

На сегодняшний день существует два основных типа аппаратуры КНД-м: однозондовая — с одним детектором для регистрации мгновенных нейтронов деления (МНД) и монитором для оценки потока нейтронов генератора, и двухзондовая — с двумя детекторами для регистрации МНД на разных расстояниях от источника нейтронов и монитором для оценки потока нейтронов генератора. В настоящее время на рудниках НАК «Казатомпром» работы по КНД-м выполняются по однозондовой методике, так как отсутствует программно-математическое обеспечение для интерпретации результатов, полученных по двухзондовой методике КНД-м, а именно для уточненного определения содержания урана по рудным интервалам и для определения пористости и глинистости по рудоносной зоне. Стоит отметить, что при применении однозондовой методики использование современных генераторов нейтронов позволило значительно снизить статистические погрешности измерений содержания урана. Несмотря на это, однозондовая КНД-м с аппаратурой СПМ (АИНК-60) не определяет пористость (влажность) K_n и коэффициент глинистости $K_{гл}$ в пределах рудных интервалов. На сегодняшний момент поправки за влажность приняты общими по месторождению и вносятся на основании полученных данных по керну. В случае достаточно больших вариаций влажности продуктивных интервалов такой подход приводит к возникновению неконтролируемых погрешностей [4].

При проведении работ по двухзондовой методике используется дополнительный блок детекторов. Его применение позволяет регистрировать скорость счета импульсов, которые связаны с петрофизическими свойствами горных пород (содержание в них хлора, бора, кадмия, водорода, лития и других редкоземельных элементов). Таким образом, при использовании двухзондовой аппаратуры КНД-м все существенные для определения рудных кондиций свойства пород (влажность, объёмный вес, содержание урана и др.) определяются в условиях их естественного залегания.

На сегодняшний день за рубежом в основном применяют двухзондовую аппаратуру — для регистрации МНД и тепловых нейтронов (ТН). На месторождениях США и Австралии успешно используется методика Prompt Fission Neutrons (PFN). Открытие рудников Beverley и Four Mile в южной части Австралийский связано с использованием метода PFN на данных месторождениях, к тому же ежедневно на многих урановых рудниках США широко используется данный метод при геолого-разведочных работах [5]. Разработка этой методики началась еще в начале 1970-х годов [6, 7]. Аппаратура PFN была изобретена в Техасе в лаборатории Sandia и Mobil R&D для прямого определения урана на месте залегания [8]. В 1980-х годах были созданы технологии и методы калибровки приборов. Данные каротажа записываются в LAS-файлы. Крупнейшими коммерческими поставщиками PFN за рубежом являются компании GAA Wirelines (с 1972 г.) и GeoInstruments Inc. (с 1980 г.).

На рис. 5 представлено графическое сопоставление результатов отечественного гамма-каротажа с зарубежным методом PFN, которое демонстрирует возможности последнего по разделению урановой и радиевой аномалий.

В табл. 1 приведено сопоставление характеристик отечественной аппаратуры АИНК-60 и зарубежной аппаратуры PFN.

Исходя из вышеизложенного, мы имеем три вида аппаратуры КНД-м: это отечественные однозондовая и двухзондовая технологии, а так же зарубежная двухзондовая с двумя детекторами для регистрации МНД и ТН. К сожалению, зарубежная аппаратура не имеет встроенного монитора, что приводит к дополнительной

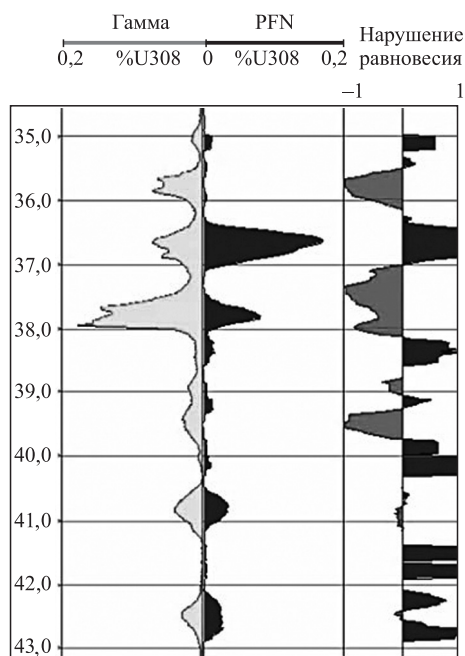


Рис. 5. Результаты сопоставления данных ГК и PFN

Таблица 1. Сопоставление характеристик прибора АИНК-60 и PFN

Характеристика	АИНК-60	PFN
Диаметр, мм	58	70
Длина, м	3,2	3
Вес, кг	15	25
Частота повторения импульсов, имп/сек	20	1000
Скорость каротажа, м/мин	0,6	3
Срок службы, ч	50–100	1000

настройке на каждом объекте с учетом состава руд. Анализы всех видов аппаратуры показали, что современным требованиям больше всего удовлетворяет аппаратура с двумя детекторами для регистрации МНД и ТН со встроенным монитором. По такому принципу был создан современный аппаратурно-методический комплекс АМК КНД-м [9].

К сожалению, существующие методики подсчета запасов не позволяют широко применять КНД-м при проведении разведочных и поисковых работ, так как данные, полученные методом КНД-м, используются только для качественного определения параметров оруденения и для определения границ зон пластового окисления. Внедрение метода КНД-м на месторождениях Чу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинции для решения поисково-оценочных, геологоразведочных и производственных задач, таких как, например, подсчет линейных запасов урана в скважи-

нах, требует дальнейшего усовершенствования аппаратуры КНД-м, приведения ее метрологического и методического обеспечения в соответствие с существующими требованиями органов технического регулирования.

Литература

1. Методические рекомендации по подземному выщелачиванию урана, НАК «Казатомпром». Алматы, 2008. С. 45–46
2. Язиков В. Г. Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при подготовке к эксплуатации и эксплуатации пластово-инфильтрационных месторождений урана. Алматы: Институт высоких технологий, 2003. 66 с.
3. Кожевников Д. А. Нейтронные характеристики горных пород и их использование в нефтепромысловой геологии. Москва: Недра, 1974. 184 с.
4. Использование скважинных приборов каротажа нейтронов деления при разведке и эксплуатации месторождений урана гидрогенного типа / Перельгин В. Т., Машкин А. И., Огнев А. Н., Давлетшин В. Р., Машкин К. А. // НТВ «Каротажник». Вып. 5 (203). 2011. С. 248–255.
5. Penney R., Stevens D. Prompt Fission Neutron (PFN) Borehole Logging Technology, Comparison with Gamma Logging Techniques // AusIMM International Uranium Conference. Adelaide. 2010. P. 3.
6. Skidmore C. Borehole Wire-line Logging for Uranium // Abstr. SMEDG Symposium 11 September, 2009.
7. Jensen D. Prompt fission neutrons assay of Uranium boreholes // Trans. Am. Nucl. Soc. 1976. Vol. 24. P. 114.
8. Schulze G., Wurz H. Uranium borehole logging using delayed or prompt fission neutrons / Institut fur Neutronenphysik und Reaktortechnik Karlsruhe, 1977. 44 S.
9. Хайкович И. М., Ганичев Г. И. Каротаж нейтронов деления на месторождениях урана: методика и метрология // Тезисы доклада на международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». Москва, 2012. С. 59.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2013 г.

Контактная информация

Темирханова Раушан Галимжановна — докторант; traushan@mail.ru
Шиманский Сергей Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, доцент;
s.shimanskii@spbu.ru

Temirkhanova R. G. — PhD Student; traushan@mail.ru
Shimanskiy S. V. — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor;
s.shimanskii@spbu.ru