

УДК 550.832.53

*В. А. Велижанин, Н. Г. Лобода, Д. Р. Лобода,  
А. А. Бубеев, Д. Г. Зыков, Г. К. Точиленко*

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ГАММА-КАРОТАЖА ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДЕ**

Обобщены результаты скважинных испытаний аппаратуры спектрометрического нейтронного гамма-каротажа на месторождениях Западной Сибири и Якутии.

*Ключевые слова: скважина, аппаратура, спектрометрия, нейтронный гамма-каротаж.*

В период 2008–2010 гг. в ООО “Нефтегазгеофизика” была выполнена разработка аппаратуры спектрометрического нейтронного гамма-каротажа (СНГК-89) как средства оценки массовых содержаний элементов в породе [1–4]. В приборе СНГК-89 используется стандартный плутоний-бериллиевый источник нейтронов активностью не менее  $10^7$  н/с. Основные технические характеристики аппаратуры СНГК-89 приведены в статье [3] и руководстве на аппаратуру.

Допустимая загрузка спектрометрического тракта аппаратуры без изменения его характеристик (энергетического разрешения и линейности энергетической шкалы) составляет  $3 \times 10^6$  имп/мин. Интегральная загрузка спектрометрического тракта аппаратуры при использовании источника нейтронов активностью  $10^7$  н/с изменяется от  $3 \times 10^5$  до  $7 \times 10^5$  имп/мин в зависимости от геолого-технических условий проведения каротажа. Последнее обстоятельство допускает применение в этой аппаратуре источников нейтронов активностью до  $4 \times 10^7$  н/с, что позволяет существенно поднять скорость проведения каротажа. Глубинность исследования метода несколько меньше интегрального нейтронного гамма-каротажа и составляет примерно 20–30 см.

Технические параметры и конструкция аппаратуры СНГК-89 предполагают ее эксплуатацию одновременно со стандартными приборами спектрометрического гамма-каротажа, компенсированного нейтронного и литолого-плотностного каротажей. Аппаратура СНГК-89 в настоящее время обеспечивает измерение относительных

содержаний в породе кремния (Si), кальция (Ca), железа (Fe), хлора (Cl), натрия (Na), серы (S), титана (Ti), водорода (H) и гадолиния (Gd) в скважинах как с открытым, так и закрытым стволом. Статистические погрешности измерений для пласта мощностью 1 м при скорости каротажа 150 м/ч и мощности источника нейтронов  $10^7$  н/с приведены в таблице.

Таблица

Погрешности определения содержаний элементов  
аппаратурой СНГК-89

Элемент	Si	Ca	Fe	S	Cl	H
Статистическая погрешность, %	2,0	2,1	0,6	1,3	0,06	0,16

Программное и методическое обеспечение аппаратуры СНГК-89 обеспечивает сопровождение всех технологических этапов ее эксплуатации – настройку, калибровку, проведение каротажа и первичную обработку материалов с получением относительных массовых содержаний перечисленных выше элементов. Основные положения методики обработки и интерпретации данных СНГК-89 рассмотрены в [2, 4].

В период 2010–2012 гг. были проведены скважинные испытания данной аппаратурой на месторождениях Западной и Восточной Сибири, обслуживаемых трестом “Сургутнефтегеофизика”.

На месторождениях Западной Сибири, характеризующихся низкой минерализацией пластовых вод и промывочной жидкости, было выполнено 8 каротажей, из которых пять были проведены в открытом стволе и три – в обсаженной скважине. На рис. 1 приведен пример сопоставления основного и повторного замеров в скважине с закрытым стволом. Замеры выполнены с источником нейтронов активностью  $0,96 \times 10^7$  н/с, скорость каротажа – 150 м/ч. Систематическая и случайная погрешности, приведенные к пласту мощностью 1 м, по результатам основного и повторного замеров составили, соответственно, для относительного массового содержания кремния – 1,66 и 0,41%, кальция – 0,93 и 0,23%, железа – 0,55 и 0,13%, хлора – 0,06 и 0,01%, натрия – 0,27 и 0,07%, водорода – 0,11 и 0,03%, серы – 0,37 и 0,07%. Достаточно высокая погрешность по железу обусловлена наличием стальной обсадной колонны.

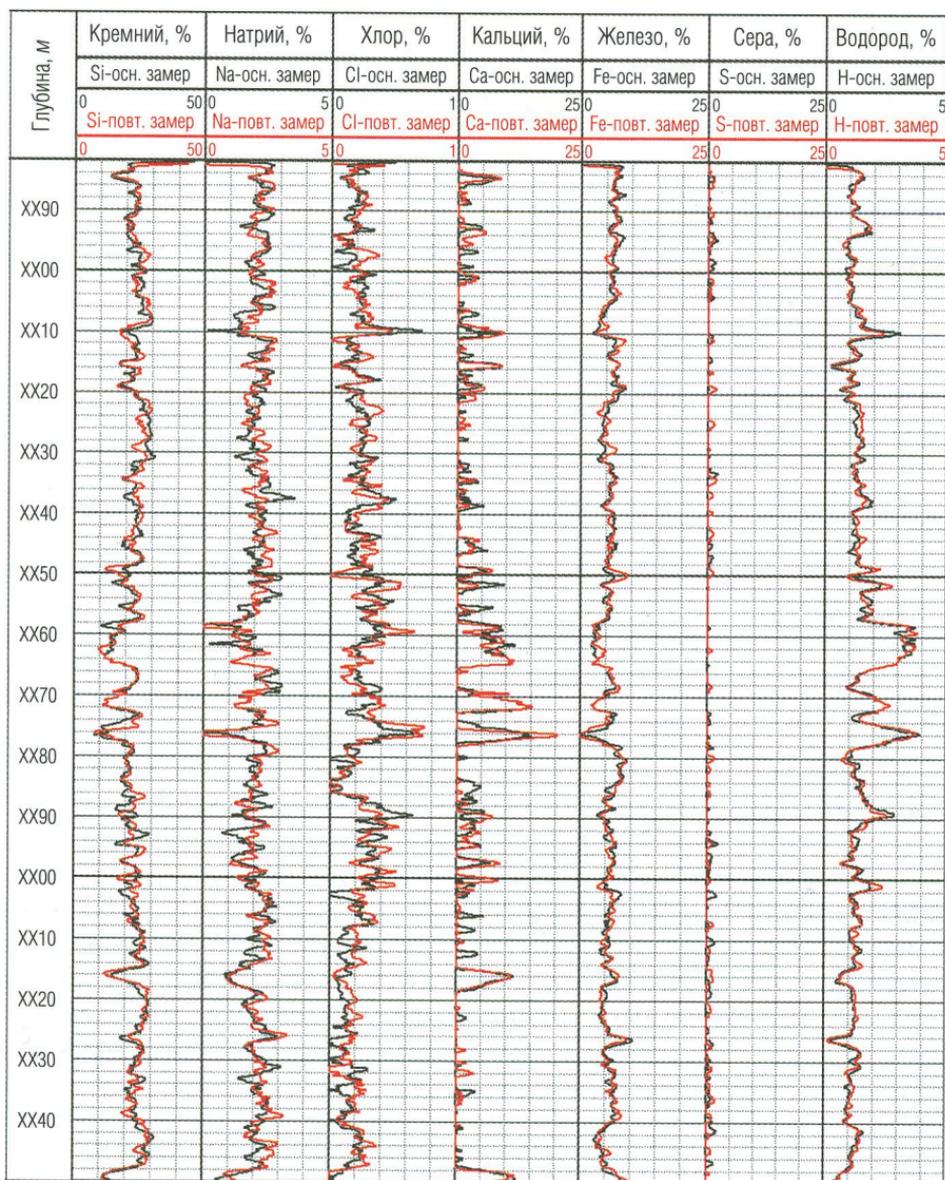


Рис. 1. Пример сопоставления массовых содержаний элементов, полученных по данным основного и повторного замеров аппаратурой СНГК-89 в одной из скважин Лянторского месторождения

Данные по керну в исследуемых скважинах отсутствуют и потому анализ результатов СНГК проводился по визуальному описанию керна, составленному непосредственно на скважине, и по обобщенным данным, имеющимся по месторождению.

На рис. 2 и 3 приведены результаты исследований методом СНГК в скважинах с открытым и закрытым стволом на месторождениях Западной Сибири. Результаты определения массовых содержаний элементов хорошо коррелируют с данными других методов. Высокое содержание водорода соответствует углистым пропласткам, а повышенное содержание кальция – уплотненным. Полученные при обработке массовые содержания натрия в породе варьируются от 1,5 до 3,5%, что вполне соответствует данным, полученным по химическому анализу керна на данном месторождении и, в целом, кварц-полевошпатовым отложениям Западной Сибири. Содержание железа по результатам керновых исследований в соседних скважинах варьируется от 2 до 6%. По данным СНГК это значение несколько выше (2–9%), поскольку железо частично “содержит” излучение алюминия. Глины по данным СНГК характеризуются повышенным содержанием железа. Интервалы с повышенным содержанием серы значимо коррелируют с содержанием железа. По описанию керна эти интервалы содержат прожилки пирита. Содержание титана 0,3–0,4% по данным СНГК не противоречит данным, имеющимся по месторождению, которое по данным анализа керна составляет от 0,15 до 0,55%. На рис. 3 приведена оценка содержания хлора. Пластовые воды месторождения слабоминерализованы, ~20 г/л NaCl. Среднее значение массового содержания хлора, определенное по данным СНГК, составляет примерно 0,2%, что соответствует 25 г/л NaCl.

Условия проведения измерений на месторождениях Якутии характеризуются высокой минерализацией пластовых вод (до 300–500 г/л NaCl), большим диапазоном изменения минерализации промывочной жидкости (до 350 г/л NaCl). Породы представлены как карбонатным, так и терригенным комплексами. Карбонатный комплекс был исследован в семи скважинах, терригенный – в трех.

Наличие хлора является фактором, осложняющим оценку массовых содержаний элементов в породе по данным СНГК. Наиболее существенно влияние хлора наблюдается при проведении исследований в карбонатных отложениях, вскрываемых долотом 216 мм при минерализации промывочной жидкости 300 г/л.

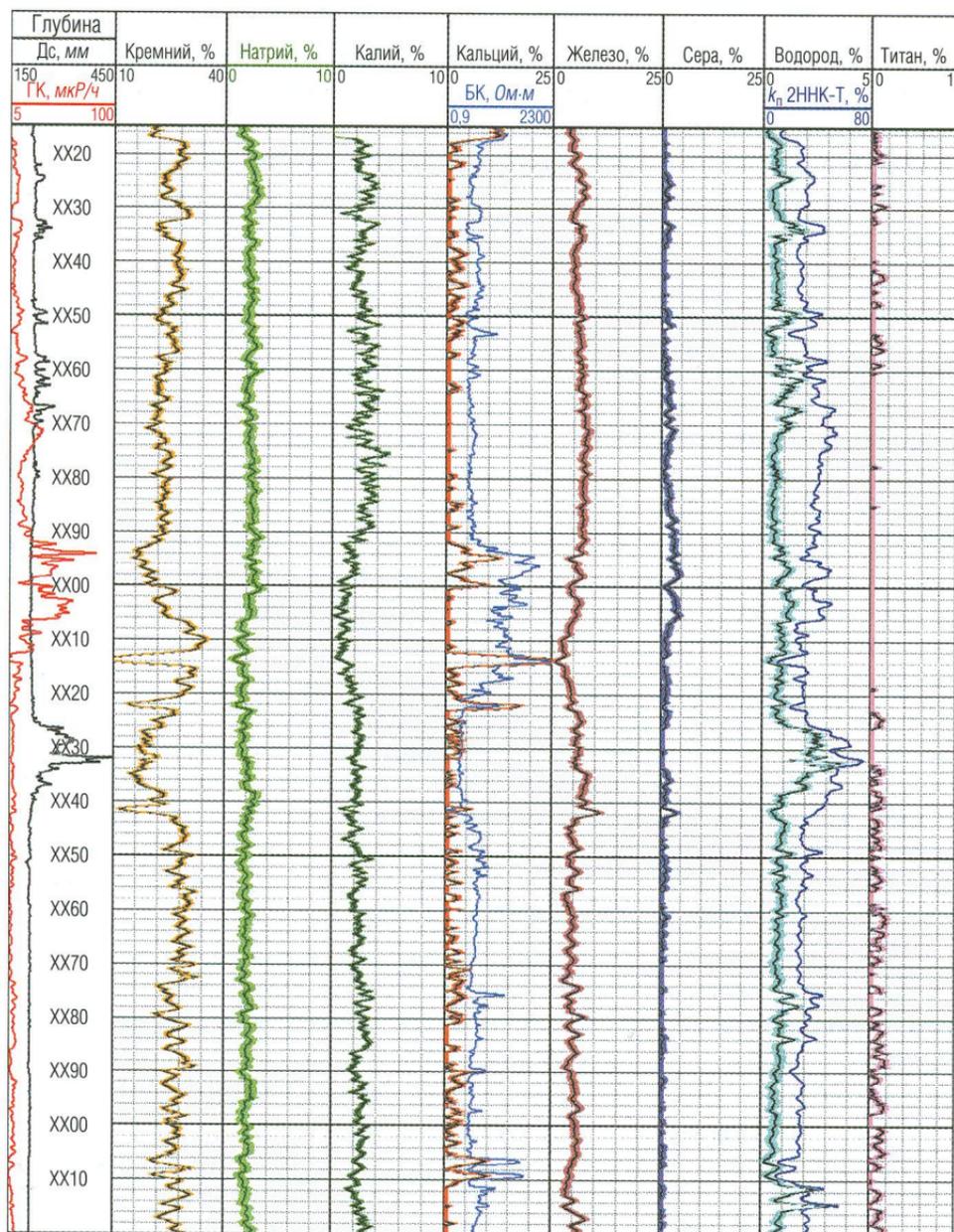


Рис. 2. Пример расчета массовых содержаний элементов по результатам каротажа аппаратурой СНГК-89 в открытом стволе

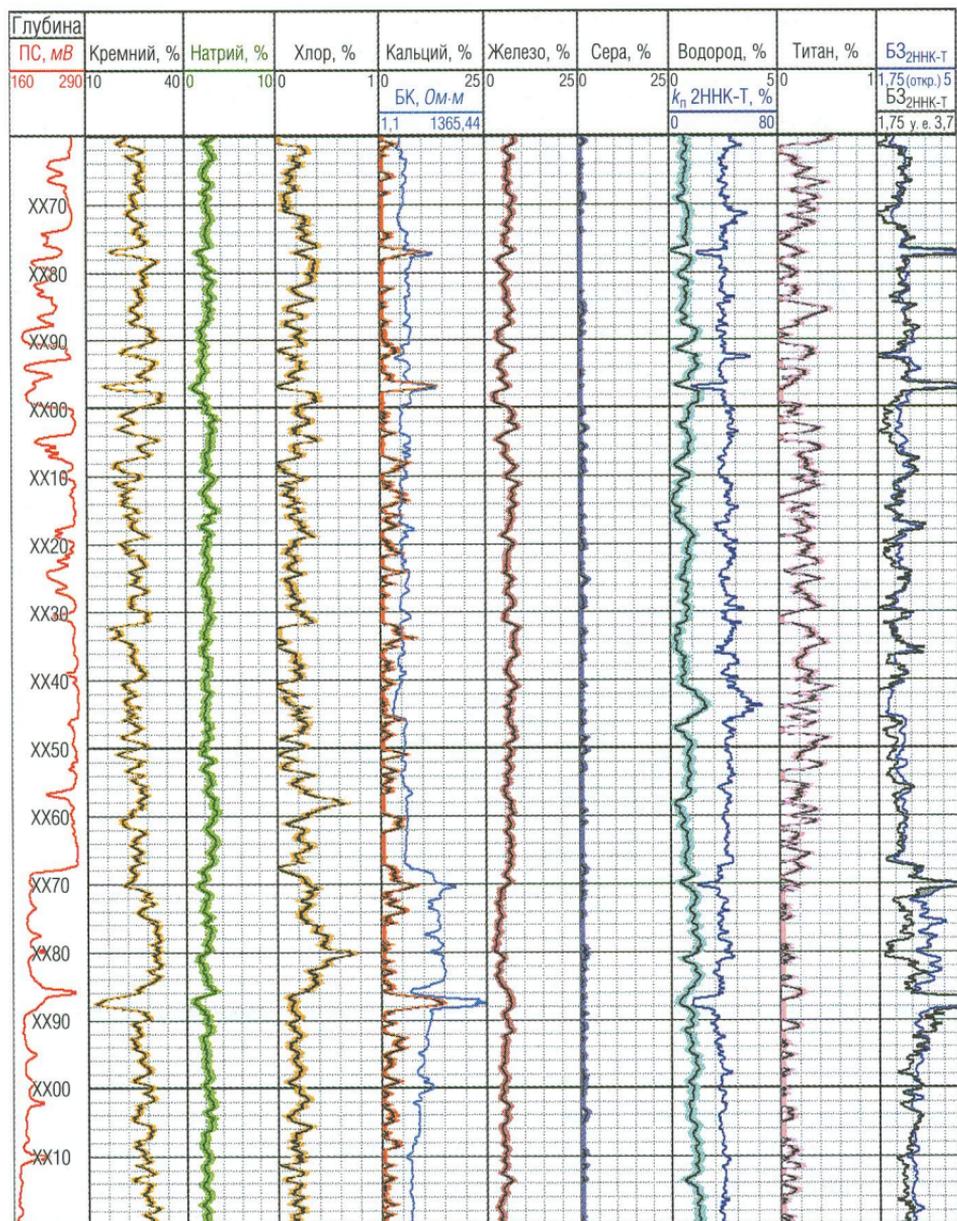


Рис. 3. Пример расчета массовых содержаний элементов по результатам каротажа аппаратурой СНГК-89 в закрытом стволе

Исследования спектров, полученных в условиях высокой минерализации пластовых вод и раствора, показали, что излучения хлора пласта и скважины в целом составляют большую часть регистрируемого излучения (до 95% всего излучения). Лишь 5–15% излучения приходится на другие элементы, представленные в пласте (рис. 4). Излучение отдельных элементов, определяемое при разложении пластовой составляющей на модельные спектры, становится сопоставимым с погрешностью самой процедуры разложения. Это накладывает существенные ограничения на возможности метода. Число определяемых элементов уменьшается, а погрешность оценки их массовых содержаний возрастает.

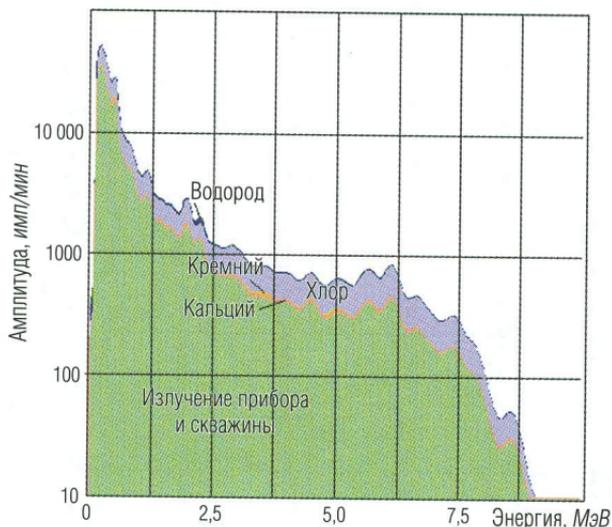


Рис. 4. Пример распределения вкладов излучения скважины и элементов в условиях сильноминерализованных пластовых вод и промывочной жидкости

На рис. 5 представлены результаты исследования Осинского горизонта, вскрытого скважиной диаметром 216 мм и представленного преимущественно карбонатами. Определение массовых содержаний выполнялось для скелетной составляющей пласта, то есть без учета водорода. Железо было исключено из разложения в связи с высокой погрешностью его определения. Учет излучения скважины проводился в соответствии с минерализацией промывочной жидкости — 300 г/л.

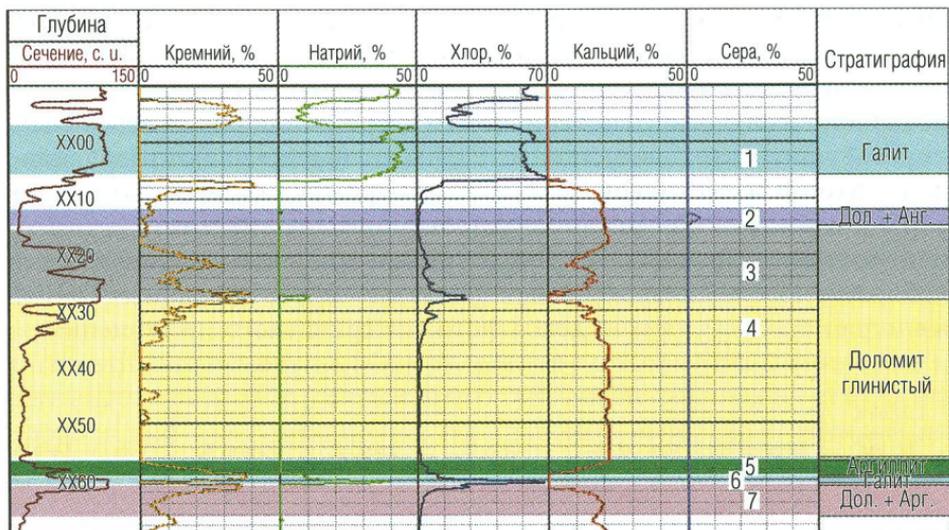


Рис. 5. Пример обработки данных СНГГ в карбонатных отложениях Осинского горизонта

На планшете четко выделяются пласты и пропластки галита (интервалы 1, 6), им соответствуют максимальные показания массовых содержаний хлора и натрия, а также повышенные значения сечений, рассчитанные по данным импульсного нейтронного каротажа. По описанию керна в интервале 5 присутствует галит. Интервал 4 по описанию керна представлен массивными доломитами, местами глинистыми. Содержание кальция по данным СНГК оценивается в 15–20%. Содержание кремния варьируется от 3 до 15%. В соответствии с описанием керна интервал 5 представлен доломитистым аргиллитом. По данным СНГК на данном интервале наблюдается увеличение массового содержания кремния и уменьшение содержания кальция. В интервале 6 по описанию керна наблюдается переслаивание доломита и аргиллита в соотношении 70/30. Среднее содержание кремния в этом интервале равно 12%, кальция – 14%. В интервале 2 определяется сера с массовым содержанием 3–5%. По описанию керна данный интервал представлен ангидритом, в верхней части – доломитом с прослойками и линзами ангидрита. По описанию керна в интервале 4 также встречаются пропластки и линзы ангидрита, но по данным СНГК в условиях сильной минерализации они не выделяются.

Интервал 3 по описанию керна также представлен доломитами, выход керна на этом интервале составил 60%. По данным СНГК этот интервал является неоднородным, неоднородность также отмечается по данным импульсного нейтронного и ядерно-магнитного каротажей.

Следует отметить, что данные СНГК не обеспечивают разделение доломитов и известняков, поэтому при проведении исследований в карбонатном разрезе рекомендуется привлекать данные литолого-плотностного каротажа. На рис. 6 приведено сопоставление данных лабораторного анализа керна и результатов обработки данных СНГК, выполненных с учетом индекса фотоэлектрического поглощения.

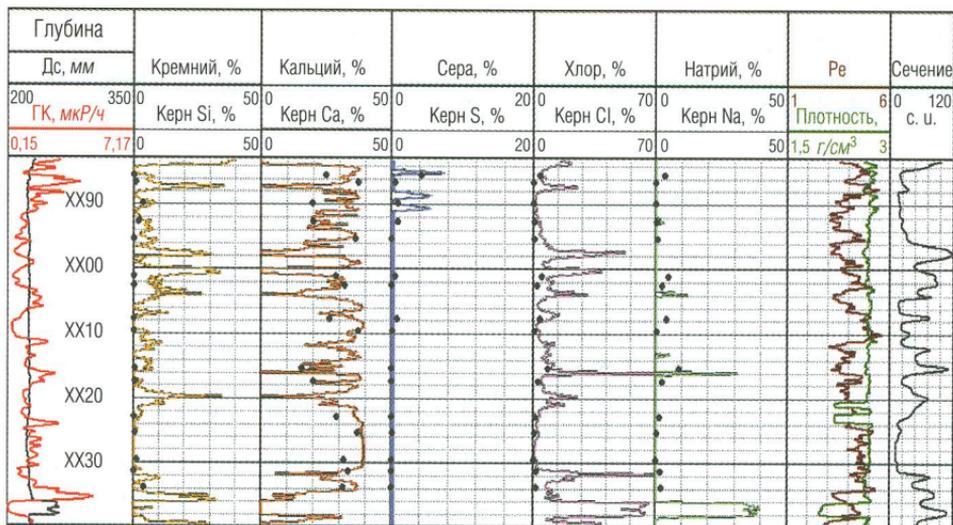


Рис. 6. Сопоставление лабораторного анализа керна и результатов обработки данных СНГК для карбонатного разреза

Результаты проведенных исследований показали, что большой диаметр скважины (216 мм) и высокая минерализация промывочной жидкости (более 200 г/л NaCl), характерные при вскрытии карбонатного комплекса, не позволяют получать достоверные количественные оценки массовых содержаний. Интерпретация данных СНГК носит качественный характер. Результаты обработки позволяют оценивать основные особенности разреза и на качественном уровне получать данные об элементном составе породы.

Снижение минерализации раствора до 100 г/л NaCl, а также уменьшение диаметра скважины существенно повышают информативность метода. Доля излучения, приходящаяся на породообразующие элементы, в этом случае достигает 30% и более. Это позволяет проводить количественную оценку массовых содержаний породообразующих элементов.

На рис. 7 представлены результаты исследования терригенного разреза скважин Хамакинского и Талахского горизонтов. Терригенная толща представлена песчаником, алевролитом и аргиллитом, а также их переслаиванием с глинисто-ангидритовым, ангидритово-глинистым и ангидритовым цементом. Минерализация раствора в скважине – 80 г/л, номинальный диаметр скважины – 143 мм. Исследование скважины проводилось с отбором керна. На планшете интервалы, которые по описанию керна соответствуют песчаникам (содержание аргиллитов до 10%), выделены желтым цветом, аргиллитам – зеленым. Светло-зеленым цветом выделены интервалы с переслаиванием песчаника и аргиллита примерно в равных долях. Увеличение в породе глинистых минералов приводит к увеличению массового содержания железа, определяемого по данным СНГК (рис. 7). В песчаниках содержание железа варьируется от 0 до 1,5–2%, в алевролитистых аргиллитах оно увеличивается до 6–8%.

В описании керна для большинства интервалов встречаются пятна и прослой ангидритизации. По данным СНГК среднее содержание серы по разрезу скважины составляет 1,5–3%, кальция 2–3%. Результаты обработки хорошо согласуются с данными других методов ГИС, полевым описанием керна и данными лабораторного анализа керна (рис. 8).

При проведении исследований на месторождениях Восточной Сибири рассматривалась возможность оценки содержания галитов в породе на основании данных СНГК. Для этого массовые содержания хлора были пересчитаны в объемное содержание галита. Корректировка за хлор, входящий в состав пластовой воды, при этом не производилась.

На рис. 9 и 10 приведены сопоставления оценки галита по данным СНГК и анализу керна для карбонатного и терригенного разреза. Результаты показывают, что оценка содержания галитов по данным СНГК в условиях высокой минерализации раствора в скважине возможна только на качественном уровне.

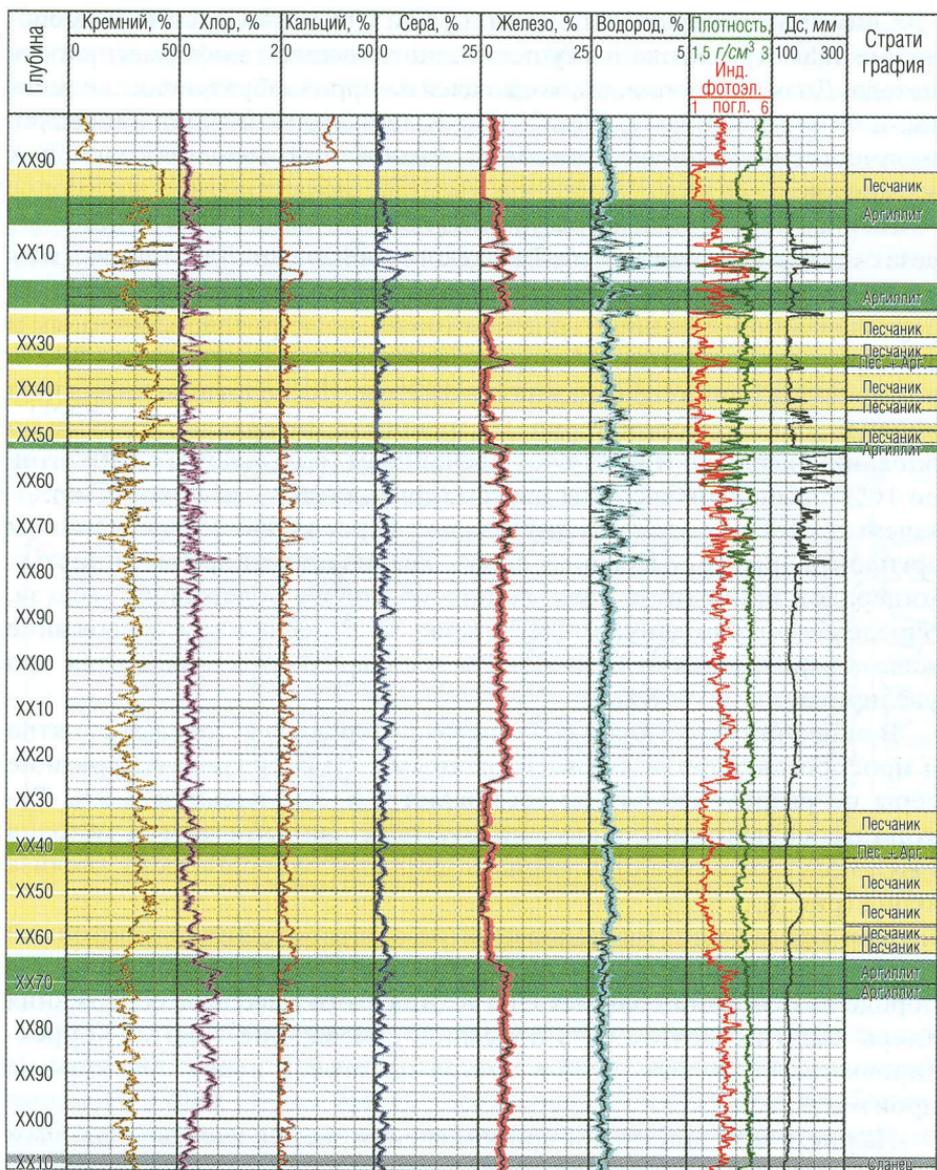


Рис. 7. Пример расчета массовых содержаний элементов по результатам каротажа аппаратурой СНГК-89 в условиях минерализованной промывочной жидкости

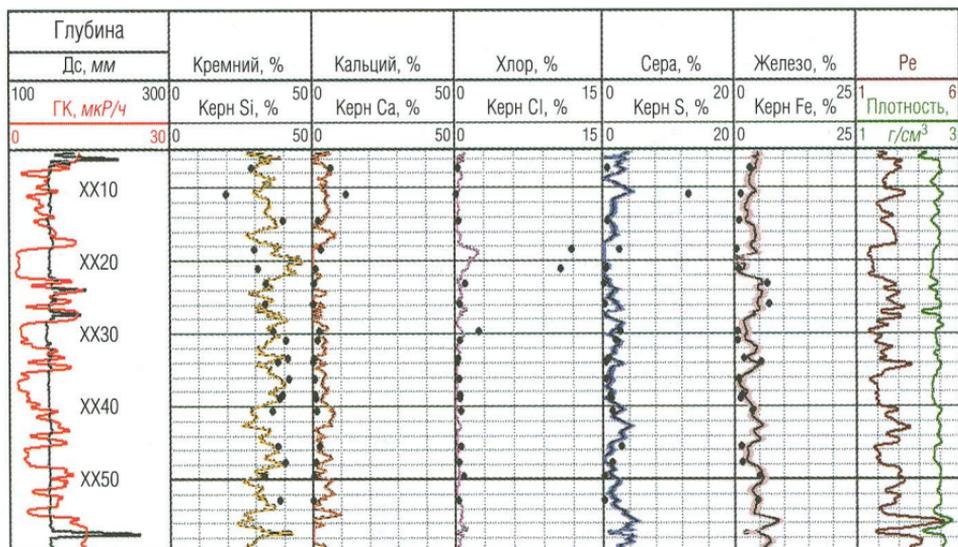


Рис. 8. Сопоставление данных лабораторного анализа керн и результатов обработки данных СНГК для терригенного разреза

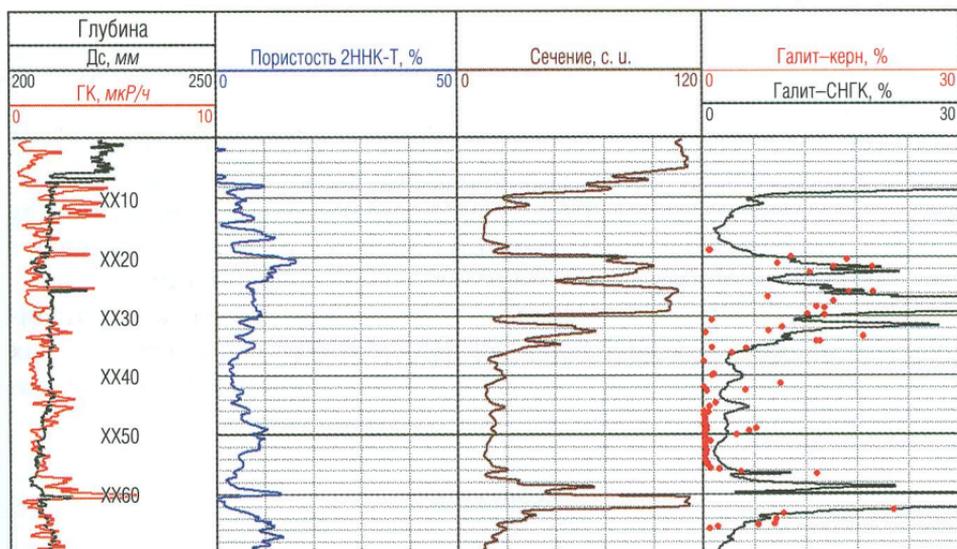


Рис. 9. Пример расчета содержания галитов по данным СНГК для карбонатного разреза

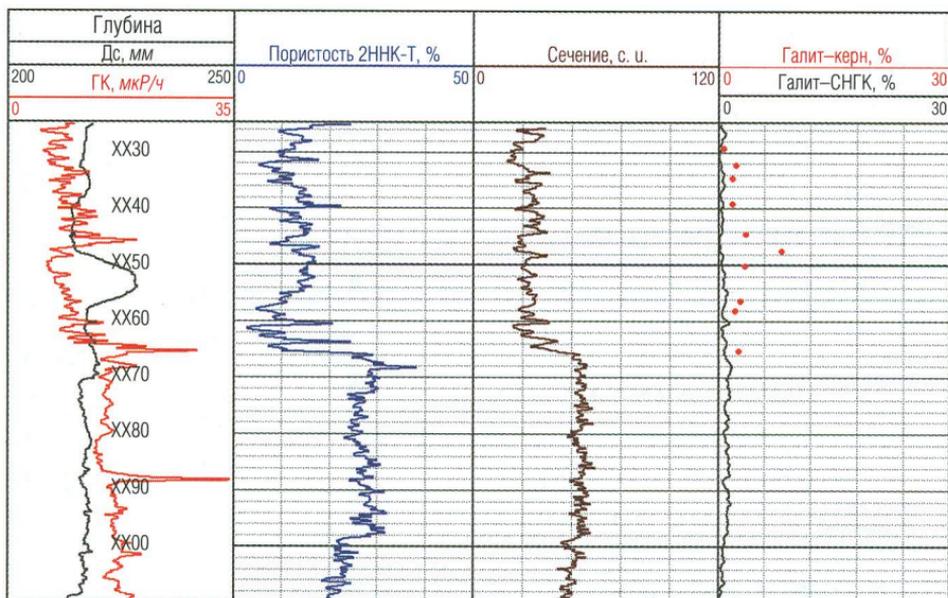


Рис. 10. Пример расчета содержания галитов по данным СНГК для терригенного разреза

Причин, затрудняющих количественную оценку галитов, несколько.

Во-первых, трудность разделения пластовой и скважинной составляющих излучения хлора. Результаты обработки зависят от точности задания технических параметров каротажа (минерализации промывочной жидкости и диаметра скважины). В большинстве случаев требуется корректировка по опорному пласту. Это означает необходимость привлечения дополнительной информации.

Во-вторых, как уже отмечалось выше, большая часть регистрируемого излучения приходится на излучение хлора, и при данных условиях резко возрастает погрешность определения массовых содержаний других элементов.

## Выводы

1. Наиболее эффективным применением спектрометрического нейтронного гамма-каротажа являются условия низкой минерализации растворов и пластовых вод.

2. При применении минерализованных растворов количественная оценка массовых содержаний элементов в породе возможна при условии малого диаметра скважины и (или) минерализации растворов не более 100–150 г/л NaCl. При этом следует иметь в виду, что чувствительность метода к небольшим содержаниям элементов в породе значительно снижается.
3. При минерализации промывочной жидкости 250–300 г/л NaCl и более получать достоверные количественные оценки массовых содержаний затруднительно. Интерпретация данных носит качественный характер. Результаты обработки позволяют оценивать основные особенности разреза и на качественном уровне получать данные об элементном составе породы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бубеев А. А., Велижанин В. А., Лобода Н. Г., Тихонов А. Г. Некоторые результаты модельных и скважинных испытаний оценки массовых содержаний элементов по данным спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 8 (197). С. 67–80.
2. Бубеев А. А., Велижанин В. А., Лобода Н. Г. Способы и алгоритмы обработки данных спектрометрического нейтронного гамма-каротажа аппаратурой СНГК-89 // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 8 (206). С. 55–72.
3. Велижанин В. А., Бубеев А. А., Лобода Н. Г. и др. Аппаратура спектрометрического нейтронного гамма-каротажа для оценки массовых содержаний элементов в породе // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 2 (200). С. 73–77.
4. Лобода Н. Г., Велижанин В. А., Бубеев А. А. Математическое моделирование спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 7 (196). С. 50–69.