

УДК 550.835

# Интеграция спектрометрического гамма-каротажа (LWD) и углубленного анализа шлама: результаты, синергия и перспективы для оперативной геологической интерпретации

**А.Н. Некрасов, Г.С. Кашин**

Пермский государственный национальный исследовательский университет

614068, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: nekrasov@pngf.pro; gennadiy Kashin@mail.ru

*(Статья поступила в редакцию 25.08.2025 г.)*

Экспериментально подтверждено хорошее соответствие данных спектрометрического гамма-каротажа (СГК) и анализа шлама по составу глин, доказывающее достоверность обоих методов для оценки глинистости породы. Консолидация СГК и анализа шлама минимизирует риски ошибок через взаимную верификацию: шлам служит опорными точками для калибровки СГК, а непрерывные данные СГК обеспечивают точную глубинную привязку. Технология СГК-LWD + непрерывное исследование шлама проходит опытно-промышленное опробование. Сформулирована задача – совершенствование алгоритмов совместной обработки разнородных данных с применением ИИ для получения в реальном времени бурения непрерывных моделей свойств породы, выявления дополнительных коллекторов, надежного прослеживания границ пластов (особенно в горизонтальных скважинах), оценки коллекторов и оптимизации буровых работ (отбор керна, завершение скважины).

Ключевые слова: *спектрометрический гамма-каротаж, шлам, состав радиоактивных минералов, минеральный состав глин, каротаж во время бурения, коллекторы нефти.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.4.353

## Введение

В настоящее время при строительстве скважин недостаточно внимания, на наш взгляд, уделяется геолого-геохимическим исследованиям бурового шлама. Этому способствуют высокий уровень развития технологий каротажа в процессе бурения, оперативно предоставляющих актуальные данные с забоя, а также факторы, осложняющие процесс интерпретации исследований по шламу, так как здесь играют роль применение долот истирающего типа и сложность состава бурового раствора с добавлением органических веществ и углеводородов. Тем не менее существуют ситуации, когда информация, содержащаяся в шламе, становится незаменимой. Среди них выделяются случаи: возникновения серьезных осложнений при проходке ствола скважины, грозящих прихватом инструмента; наличия сложных профилей и больших проложений стволов скважин; высоких температур в скважинах

(более 150° С); повышенного содержания сероводорода; отсутствия необходимого оборудования для каротажа.

Следует отметить, что «стандартные» методы геолого-геохимического анализа шлама недостаточны в условиях дефицита каротажных данных. Для достижения необходимой информативности применяют технологии углубленного анализа, позволяющие гораздо точнее охарактеризовать горные породы. Примеры таких методик включают рентгеновский анализ минерального состава и химического состава породы, исследование органического вещества методом пиролиза. Несмотря на то, что подобные процедуры традиционно проводятся в лабораторных условиях, современные тенденции указывают на стремление приспособить сложное оборудование для работы непосредственно на буровой площадке. Такой подход позволяет получать исчерпывающие геохимические и минералогические данные практически в режиме реального времени. Од-

© Некрасов А.Н., Кашин Г.С., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

нако качество получаемой информации зависит от правильного отбора и подготовки образцов шлама, а также точной корреляции глубины отбора пробы с соответствующими пластинами разреза. Использование методов углубленного анализа шлама в реальном времени обеспечивает ряд преимуществ, включая верификацию данных каротажа, раннюю оценку характеристик продуктивных пластов и повышение эффективности буровых операций. (Кашин, 2024; Кашин, Немцов, 2024).

### Углубленный анализ шлама

В рамках проведенных исследований был изучен химический и минеральный состав проб бурового шлама в лаборатории Пермского государственного национального исследовательского университета. Для определения химического и минерального состава проб были выполнены следующие виды работ:

- рентгенофлуоресцентный анализ химического состава шлама (на макро- и микрокомпоненты);
- масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) анализ с определением содержаний U, Th, Gd;
- определен общий (валовый) минеральный состав шламов дифрактометрическим методом;
- определен минеральный состав глинистой фракции шламов дифрактометрическим методом;
- определен минеральный состав тяжелой фракции шламов (аксессуарных минералов);
- проведены диагностика и определение химического состава радиоактивных минералов (циркона, монацита и др.) микронзондовым методом под электронным микроскопом (выполнены пробоподготовка – отображены зерна циркона, монацита и др. из тяжелой фракции минералов).

Таким образом, по данным рентгенофлуоресцентного и масс-спектрального с индуктивно связанной плазмой анализов выявлены пробы бурового шлама карбонатного и алюмосиликатного состава. Наибольшая концентрация радиоактивных элементов установлена в пробах алюмосиликатного состава.

По данным рентгенофазового анализа, минеральный состав карбонатной толщи представлен преимущественно кальцитом и доломитом. Среди минералов-примесей в карбонатной толще присутствуют галит, кварц и альбит. Терригенная толща имеет полевошпат-слюдисто-кварцевый минеральный состав с существенным содержанием каолинита. Среди минералов-примесей в терригенной толще присутствуют соли (галит и сильвин), сульфиды (пирит), в небольшом количестве кальцит и доломит. На дифрактограммах бурового шлама терригенного состава зафиксирован высокий фон спектра, который свидетельствует о наличии рентгеноаморфного вещества, предположительно, железосодержащего состава (гидрогетит), о чем также свидетельствует повышенное содержание в этих пробах оксидов железа.

По данным электронно-микроскопических исследований и электронно-зондового микроанализа, в пробах бурового шлама были выявлены минеральные формы, предположительно, содержащие элементы-носители радиоактивных изотопов. Торий и редкоземельные элементы зафиксированы в слюдах, в частности в гидрослюде, зернах циркона, которые были встречены как в терригенных отложениях, так и в карбонатных. Наибольшие содержания тория и редкоземельных элементов установлены в терригенной толще. Уран был установлен в зернах циркона и органическом веществе. Наибольшая концентрация урана в рассеянном виде и в органическом веществе встречена в карбонатной толще, в терригенной толще уран фиксируется во всех интервалах в небольшом количестве, предположительно, также в органическом веществе и аксессуориях (чаще цирконе). Калий является составной частью полевых шпатов, сильвина и слюд. Рубидий сосредоточен в основном в слюдах, полевых шпатах и сильвине. Стронций часто является элементом-примесью в кальците и слюдах (в биотите).

В составе изученных проб бурового шлама зафиксировано присутствие радиоактивных элементов, которые концентрируются в минералах-носителях и органическом веществе. Минералами-носителями радиоактивных элементов являются циркон, слюды.

Наибольшие концентрации радиоактивной минерализации зафиксированы в пробах шлама терригенного состава.

### **Анализ шлама в комплексе с СГК**

Прямое сопоставление минеральных моделей глинистой части породы, полученных по СГК (прибор АИНК-73С-2, обработка в программе СГК-ЛПСТ), с результатами лабораторного анализа шлама (химического и минерального) показывает хорошее совпадение (подтверждение на визейских терригенных отложениях описано ниже). Это дополняет ранее доказанную корреляцию СГК с РСА керна (Некрасов, 2021; Некрасов, 2022). При должном методическом обеспечении метод СГК позволяет определять количество и минеральный состав глинистой части породы, а также выявлять дополнительные коллекторы в мало- и безглинистых породах, радиоактивность которых не связана с глиной. Все это вместе и при реализации метода СГК в составе LWD-комплекса открывает перспективу совместной обработки данных обоих методов в режиме реального времени при бурении.

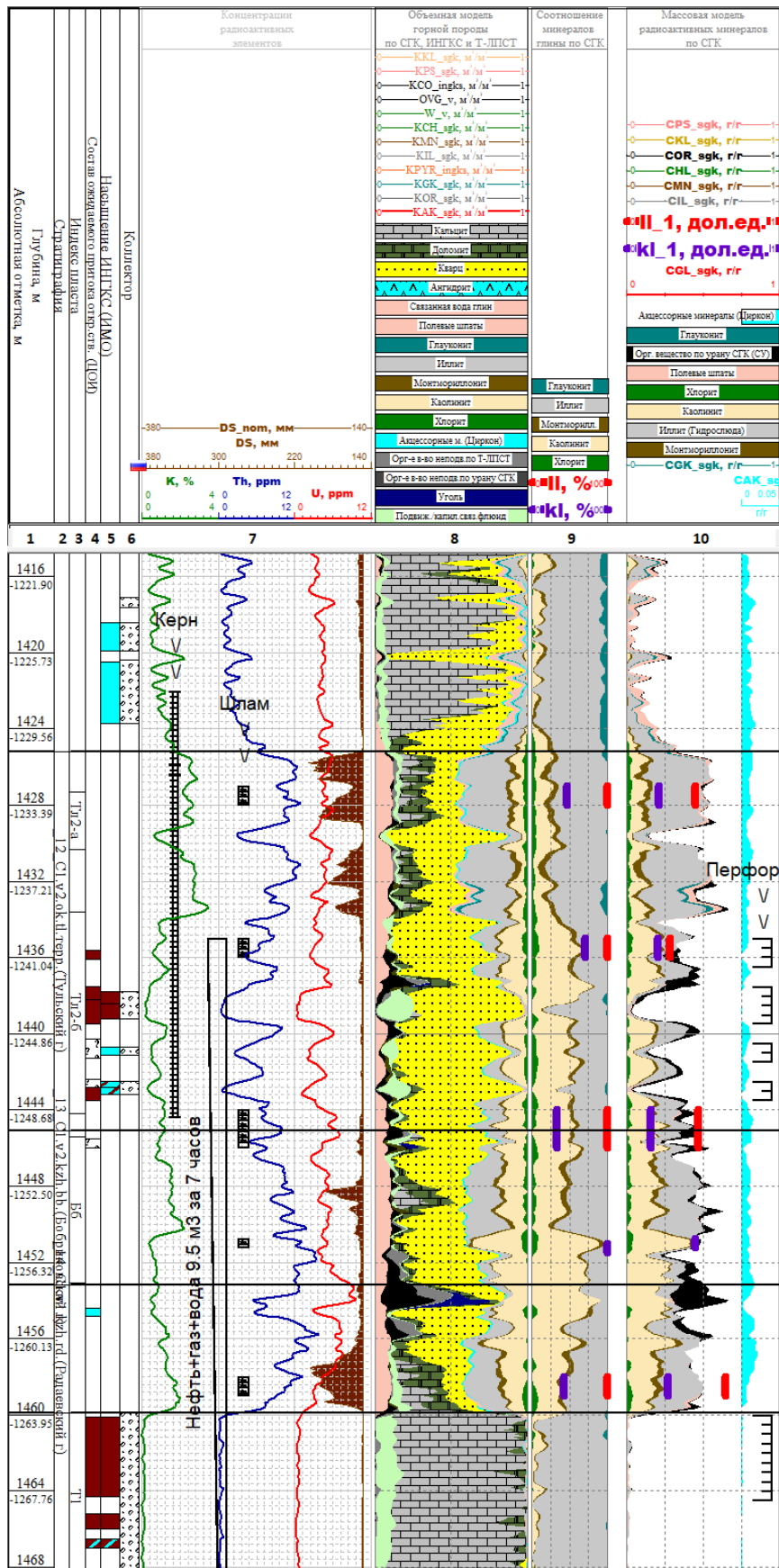
Одной из основных решаемых таким комплексом задач является привязка по глубине результатов оперативного геохимического анализа выносимого на поверхность при бурении шлама. Комплексование СГК с геохимией шлама в перспективе позволит прямо во время бурения осуществлять надежное прослеживание границ пластов, что особенно важно при бурении горизонтальных участков, а также выполнять оценку характеристик коллектора.

### **Комплексование методов СГК-LWD и углубленного анализа шлама**

Интеграция СГК в составе LWD-комплекса результатов углубленного исследования шлама не является простым суммированием данных, а создает эффект синергии, обеспечивающий взаимную верификацию и повышение надежности получаемой информации. Например, лабораторный анализ минерального (РСА) и химического

(РФА) состава глинистой фракции в шламе служит независимым физико-химическим подтверждением результатов интерпретации данных СГК, которые могут быть получены не только при каротаже на кабеле, но непосредственно в процессе бурения в режиме LWD. Это критически важно для подтверждения достоверности и внедрения отечественного метода СГК-LWD в промышленную практику. Данные по шламу, особенно минералогия глин, предоставляют дискретные, но высоконадежные «опорные точки» по составу. Они используются для калибровки алгоритмов интерпретации в программе СГК-ЛПСТ и оперативного контроля качества данных СГК-LWD в сложных геологических или технических условиях бурения, минимизируя риски ошибок. Тем временем непрерывные данные СГК-LWD в указанном комплексировании являются основой для определения и коррекции глубин и могут быть нормированы на опорные данные геохимии для получения непрерывных результатов интерпретации свойств и состава породы.

Совместное использование непрерывных данных СГК (радиоактивность, спектры) и дискретных, но детальных данных по элементному и минеральному составу из шлама (РФА, РСА, ТОС/пиролиз) в перспективе позволит строить обоснованные минеральные модели геологического разреза в режиме, близком к реальному времени. Консолидация методов напрямую способствует достижению главной цели – существенному повышению уровня и достоверности геологической информации, получаемой непосредственно в процессе бурения. Это позволяет геологам и буровикам оперативно реагировать на изменения разреза. На сегодня готовность технологии можно описать следующим образом: интегрированный в стандартный LWD-комплекс метод СГК находится на этапе промышленного опробования, а для шлама реализована схема непрерывного отбора с расфасовкой проб по 2–5-метровым интервалам. Это позволило определить необходимое пространственное разрешение и оценить возможности оперативного поступления материала для анализа (рис.).



**Рис.** Пример сопоставления результатов определения минерального и химического состава радиоактивной части породы по SGK и по шламу, визейские терригенные и карбонатные нефте- и водо-насыщенные породы, скважина 1, месторождение Н

## Результаты и перспективы развития

Как сказано выше, сегодня активно ведутся реализация и апробация комплексного подхода, объединяющего СГК-LWD и углубленный анализ шлама. Как наглядно продемонстрировано на рис., результаты интерпретации данных СГК-LWD (обработанных в СГК-ЛПСТ) показывают хорошее соответствие результатам лабораторного определения минерального состава глин по буровому шламу. На полях 9 и 10 заливками показана минеральная модель радиоактивной части породы, фиолетовыми и красными линиями – то же, но по результатам РСА шлама.

Как можно видеть, количество и состав глин хорошо совпадают по обоим методам. Это важное достижение, впервые подтверждающее применимость и надежность методики интерпретации СГК для определения глинистого состава не только по керну, но и по шламу – материалу, доступному в процессе бурения любой скважины. Таким образом, отработана технология и оценена ее эффективность для применения в производстве.

Приборная реализация метода СГК-LWD создана в ООО НПФ «ВНИИГИС-ЗТК», модуль применяется в составе буровой компоновки и использует электромагнитный канал связи для оперативной передачи данных на поверхность. Кроме модуля СГК в состав компоновки могут быть включены другие методы ГИС (БК, ИК, ГГК-П, ГК, НКТ, Инклинометрия и др.), что позволяет повысить информативность интерпретации данных, как это было показано в (Некрасов, 2021; Некрасов, 2022).

Отборы шлама производились в непрерывном режиме с расфасовкой проб по интервалам 2 м для последующего углубленного геохимического и минералогического анализа. Дополнительный контроль и верификация на этапе внедрения осуществляются путем сопоставления СГК-LWD с кривыми СГК на кабеле, зарегистрированном в открытом стволе и/или в колонне. На данный момент продолжают опытно-промышленное опробование СГК-LWD и оптимизация технологии проведения работ на скважине, а также методики и алгоритмов совместной обработки данных СГК и геохимии шлама.

Следует отметить, что получаемые данные довольно разнородные, могут иметь нелинейные взаимные связи, что может затруднять и замедлять их комплексную оперативную обработку и интерпретацию обычными методиками. Такие сложные задачи в перспективе могут решаться с использованием методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей (Некрасов, Кузин, 2022; Максимович, Кашин, 2024).

## Выводы

1. Сопоставление минеральных моделей радиоактивной части пород, полученных с помощью спектрометрического гамма-каротажа, с результатами лабораторного минералогического (РСА) и химического (РФА) анализа бурового шлама продемонстрировало хорошее совпадение. Это экспериментально подтверждает достоверность интерпретации данных СГК для определения состава глинистой части не только по керну, но и по шламу – материалу, оперативно доступному при бурении любой скважины.

2. Минимизация рисков ошибок осуществляется за счет консолидации методов СГК и углубленного анализа шлама. Это создает синергетический эффект и позволяет взаимно верифицировать исследования. Данные по шламу (особенно минералогия глин) могут служить «опорными точками» для самонастройки алгоритмов интерпретации СГК и наоборот. Кроме того, непрерывные данные СГК будут являться основой для привязки шлама по глубине.

3. Технологическая реализация находится на стадии опытно-промышленного опробования скважинного прибора. Разрабатываются подходы и решения для совместной регистрации и обработки данных СГК-LWD и РСА/РФА шлама. Отработана методика непрерывного отбора шлама с расфасовкой проб по 2-метровым интервалам, обеспечивающая необходимое пространственное разрешение для корреляции с данными СГК-LWD.

4. Дальнейшее развитие технологии требует оптимизации методик полевых работ и главным образом совершенствования алгоритмов совместной обработки и интерпретации разнородных данных (СГК-LWD, геохимия шлама, другие ГИС). Учитывая сложность и потенциально нелинейный характер взаимосвязей, эффективное решение этой задачи видится в применении методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей.

5. Все это, в случае успешного внедрения СГК-LWD и непрерывного автоматизированного исследования шлама, позволит непосредственно во время бурения получать непрерывные модели свойств и состава породы в реальном времени.

6. При должном методическом обеспечении описанный комплекс поможет определять правильные глубины у количественных данных минерального состава радиоактивной части породы. Это, в свою очередь, позволит выявлять дополнительные коллекторы в малоглинистых и безглинистых породах, чья радиоактивность не связана с глинистыми минералами. Также внедрение такого комплекса будет способствовать решению таких важных задач, как надежное оперативное прослеживание границ пластов в горизонтальных скважинах; предварительная оценка свойств и насыщенности коллекторов; точный выбор интервалов отбора керна, определение оптимальных мер по завершению скважины.

## Библиографический список

Кашин Г.С., Немцов Н.А. Перспективы развития расширенного комплекса исследований бурового шлама // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2024. С. 272–274.

Кашин Г.С. Проблемы и перспективы геолого-технологических исследований в процессе бурения скважин // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сборник научных статей. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2024. Вып. 7 (44). С. 31–33. EDN: PBITTN

Максимович К.А., Кашин Г.С. Перспективы использования искусственного интеллекта для оперативного анализа данных газового каротажа // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2024. С. 193–195. EDN: HBYDNC

Некрасов А.Н., Кузин С.А. Перспективность применения нейронных сетей (НС) при оперативной интерпретации ГИС // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сборник научных трудов / гл. ред. В.И. Костицын. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2022. С. 111–120. EDN: JGUTEM

Некрасов А.Н. Повышение информативности минеральной интерпретации метода спектрометрического гамма-каротажа // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС, 2021. Вып. 7 (313). С. 106–124. EDN: XRHQSL

Некрасов А.Н. Повышение информативности минеральной интерпретации метода спектрометрического гамма-каротажа (коррективы в статью [10]) // НТВ «Каротажник», Тверь: Изд. АИС, 2022. Вып. 2 (316). С. 102–103. EDN: NJUCMF

# Integration of LWD Spectral Gamma-Ray Logging and Advanced Cuttings Analysis: Results, Synergy, and Implications for Operative Geological Interpretation

A.N. Nekrasov, G.S. Kashin

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russia

E-mail: nekrasov@pngf.pro; gennadiykashin@mail.ru

Experimental verification conformed strong correlation between spectral gamma logging (SGL) and cuttings analysis data for clay composition study that confirms the reliability of both methods for clay content evaluation. The integration of SGL and cuttings analysis minimizes misinterpretation risks: cuttings provide the reference points for SGL calibration, and continuous SGL data ensures an accurate depth correlation. The combined technology of SGL-LWD with continuous cuttings analysis is under field trials. The key objective has been defined as enhancing algorithms for integrated processing of heterogeneous data using AI to achieve followings: real-time generation of continuous formation property models while drilling; identification of secondary reservoirs; reliable formation boundary mapping (particularly in horizontal wells); reservoir characterization; optimization of drilling operations (coring point selection, well completion).

Keywords: *spectral gamma logging; drill cuttings; radioactive mineral composition; clay mineralogy; logging while drilling; petroleum reservoirs.*

## References

- Kashin G.S., Nemtsov N.A.* 2024 Perspektivy razvitiya rasshirenogo kompleksa issledovaniy burovogo shlama [Prospects of development of the extended complex of drilling cuttings studies]. *In: Geologiya v razvivayushchemsya mire. Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet. Perm, pp. 272-274 (in Russian)*
- Kashin G.S.* 2024 Problemy i perspektivy geologo-tehnologicheskikh issledovaniy v protsesse bureniya skvazhin [Problems and prospects of geological and technological research in the process of well drilling]. *In: Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. 7(44):31-33 (in Russian)*
- Maksimovich K.A., Kashin G.S.* 2024 Perspektivy ispolzovaniya iskusstvennogo intellekta dlya operativnogo analiza dannykh gazovogo karotazha [The potential of using artificial intelligence for the operational analysis of gas logging data]. *In: Geologiya v razvivayushchemsya mire. Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet, Perm, pp. 193-195 (in Russian)*
- Nekrasov A.N., Kuzin S.A.* 2022 Perspektivnost primeneniya neyronnykh setey (NS) pri operativnoy interpretatsii GIS [Perspective of neural networks application for operative interpretation of well logging data]. *In: Teoriya i praktika razvedochnoi i promyslovoy geofiziki. Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet, Perm, pp. 111-120 (in Russian)*
- Nekrasov A.N.* 2021. Povyshenie informativnosti mineralnoy interpretatsii metoda spektrometricheskogo gamma-karotazha [On increasing information content in the petrophysical interpretation of the spectrometric gamma-ray logging data]. *NTV Karotazhnik. 7(313):105-123 (in Russian)*
- Nekrasov A.N.* 2022. Povyshenie informativnosti mineralnoy interpretatsii metoda spektrometricheskogo gamma-karotazha (korrektivi v statyu [Nekrasov, 2021]) [On increasing information content in the petrophysical interpretation of the spectrometric gamma-ray logging data (corrections to article [Nekrasov, 2021])]. *NTV Karotazhnik. 2(316):102-103 (in Russian)*