

## Применение рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама для сопровождения бурения горизонтальных скважин на примере ачимовских отложений (часть 2)

Л.А. Успенская<sup>1\*</sup>, Н.А. Шадчнев<sup>1</sup>, А.А. Мигилев<sup>2</sup>, А.С. Буткеев<sup>3</sup>, А.Л. Солодовников<sup>3</sup>,  
А.А. Карев<sup>3</sup>, А.Г. Маникин<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

<sup>3</sup>АО «АРКТИКГАЗ», Новый Уренгой, Россия

<sup>4</sup>ООО «Тюменьгеоспектр», Саратов, Россия

<sup>5</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Работа посвящена расширению области применения метода рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) бурового шлама в ачимовских отложениях Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). В первой части выполнена литогеохимическая типизация разреза по данным анализа шлама. Во второй части представлена методика оперативной оценки емкостных свойств пласта при бурении горизонтальных скважин с минимальным комплексом каротажа во время бурения (только гамма-каротаж или его сочетание с удельным электрическим сопротивлением). Авторами предложена упрощенная математическая модель оценки коэффициента пористости ( $K_p$ ), основанная на зависимости от концентрации одного элемента-индикатора – цинка (Zn). Приведены результаты «слепого тестирования» модели на разведочной скважине смежной площади, подтвердившие ее достоверность. Обоснована практическая значимость внедрения методики оценки  $K_p$  в случае бурения горизонтальных скважин с минимальным комплексом каротажа во время бурения.

**Ключевые слова:** ачимовская толща, рентгенофлуоресцентный анализ, элементный состав, коэффициент пористости, буровой шлам, геонавигация, горизонтальное бурение

**Для цитирования:** Успенская Л.А., Шадчнев Н.А., Мигилев А.А., Буткеев А.С., Солодовников А.Л., Карев А.А., Маникин А.Г. (2026). Применение рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама для сопровождения бурения горизонтальных скважин на примере ачимовских отложений (часть 2). *Георесурсы*, 28(3), с. 97–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.14>

### Введение

Бурение горизонтальных скважин в сложных геологических условиях ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) сопряжено с высокими рисками неэффективной проходки из-за латеральной изменчивости разреза. В первой части настоящего исследования (Успенская и др., 2026) была обоснована эффективность применения рентгенофлуоресцентного анализа (РФА/XRF) бурового шлама для оперативной литогеохимической типизации разреза и идентификации генетически различных типов глин. Актуальность таких исследований продиктована увеличением доли скважин, бурение которых из-за высоких технологических рисков (вскрытие пластов со сниженным пластовым давлением

вследствие разработки залежи или одновременное вскрытие зон с начальным аномально высоким пластовым давлением (АВПД) и пластов со сниженным давлением) осуществляется с минимальным комплексом каротажа во время бурения (КВБ) – только гамма-каротаж (ГК) или ГК с измерением удельного электрического сопротивления (ГК-УЭС). В таких условиях для эффективной проводки горизонтального ствола скважины и ее последующего заканчивания (расстановки муфт гидроразрыва пласта (ГРП) или фильтров) кроме литогеохимической типизации разреза по данным РФА шлама необходимо выполнять оценку емкостных свойств пласта, что требует расширения функционала полевого метода РФА.

Связь минерального состава пород с коэффициентом пористости ( $K_p$ ) ранее оценивалась по данным спектрометрического нейтронного гамма-каротажа и при лабораторном исследовании керна (Herron, 1986; Herron & Herron, 1996). При этом содержание элементов Si, Al и Ca использовалось для оценки, соответственно, кварцевой, глинисто-алюмосиликатной и карбонатной составляющих, определяющих особенности петрофизических

\* Ответственный автор: Людмила Андреевна Успенская  
e-mail: [lyudmila.uspenskaaya@novatek.ru](mailto:lyudmila.uspenskaaya@novatek.ru)

© 2026 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

свойств пород. Подобный подход не может быть перенесен на разрезы ачимовской толщи. Вследствие присутствия полевых шпатов наряду с кварцем и неоднородного состава глинистого цемента Si и Al могут одновременно входить в состав как обломочного каркаса, так и глинистой фракции, что снижает их информативность для расчета  $K_{\text{п}}$ . Кальций связан в основном с плотными карбонатизированными неколлекторами, что также ограничивает его использование в качестве самостоятельного индикатора пористости. Таким образом, уникальность каждого месторождения, выражающаяся в специфическом элементном составе пород (коллекторов и неколлекторов), делает невозможным прямой перенос существующих методик интерпретации данных РФА шлама с одного объекта на другой либо существенно ограничивает его эффективность. Следовательно, алгоритмы обработки геохимической информации должны быть адаптированы под особенности конкретного месторождения или пласта.

Современный этап развития геолого-технологических исследований (ГТИ) характеризуется переходом к использованию мобильных литолого-геохимических комплексов, использующих в своей работе комплексирование РФА и рентгеноструктурного анализа (РСА / XRD). Подобное оборудование позволяет непосредственно на буровой площадке определять минеральный состав шлама, выполнять оценку минеральной плотности матрицы и пересчитывать полученные результаты в коэффициент пористости ( $K_{\text{п}}$ ). Необходимость комплексирования РФА и РСА в составе указанных комплексов обусловлена тем, что использование только метода РСА для анализа шлама с целью определения минералогического состава пород не обеспечивает необходимой точности определения глинистых минералов, поскольку из-за неупорядоченной структуры глинистого цемента их дифракционные пики накладываются друг на друга и размываются. Схожие трудности возникают из-за вкраплений пирита и изменчивости химического состава карбонатного цемента (сидерита, анкерита, магнезита). Для решения этих задач требуется привлечение метода РФА, посредством которого контролируются содержания этих минералов. Кроме того, для корректного расчета минералогического состава и минимизации погрешностей алгоритму требуется не только математическая увязка данных РСА и РФА, но и обязательное привлечение результатов детальных исследований опорного керна. Информация по керновому материалу необходима как для учета полного спектра присутствующих в разрезе минералов, так и для точного определения плотности минеральной матрицы, без знания которой достоверность расчета  $K_{\text{п}}$  снижается. Однако привлечение подобного сервиса значительно удорожает услуги ГТИ, а проведение двух видов анализов и многостадийный цикл пробоподготовки существенно увеличивают время ожидания результатов, что в условиях дефицита времени при строительстве горизонтальных скважин недопустимо.

В качестве альтернативы комплексам РСА-РФА на рынке представлен более доступный метод инфракрасной (ИК) спектроскопии шлама. Результаты исследований ИК-спектрометром, как и РСА, дают информацию о минералогическом составе пород, и для повышения точности количественных расчетов этот метод необходимо комплексировать с РФА. Однако в ачимовских отложениях

Уренгойского НГКМ, где бурение ведется на растворах на углеводородной основе (РУО), ИК-спектроскопия неэффективна: даже после тщательной отмывки шлама от бурового раствора на поверхности зерен сохраняется сорбированная пленка РУО, чьи интенсивные пики полностью перекрывают полезный сигнал от глинистых минералов пласта.

С учетом этих ограничений для экспресс-анализа шлама на буровой целесообразно использовать портативные приборы РФА, что снижает стоимость исследований ГТИ. Восстановление минерального состава пород через элементный состав методами машинного обучения для последующего расчета пористости в ачимовских отложениях имеет свои ограничения. Перераспределение кремния Si и алюминия Al между кварцем, полевыми шпатами, слюдами и глинами приводит к неопределенности моделей и погрешности вычислений. Поиск многомерных связей между различными элементами и пористостью также усложняет интерпретацию из-за взаимного влияния и изменчивости элементов-индикаторов.

В связи с этим авторами была поставлена задача упростить математическую модель для оценки  $K_{\text{п}}$ . Вместо восстановления минерального состава через машинное обучение или поиска сложных многомерных зависимостей, было решено найти зависимость коэффициента пористости от одного или нескольких ключевых элементов-индикаторов, специфичных для изучаемого разреза. Таким образом, научная новизна проведенного исследования заключается в следующем:

Обоснована и практически доказана применимость прямой оценки коэффициента пористости  $K_{\text{п}}$  по данным экспресс-РФА шлама на основе распределения микроэлемента-индикатора – цинка Zn. Модель успешно прошла «слепое тестирование» на разведочной скважине смежной площади: для выборки коллекторов коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,645 при среднеквадратичной ошибке  $RMSE$  0,0127 (или 1,27% в абсолютных единицах пористости).

Цель настоящей работы – разработка и внедрение методики оперативной количественной оценки коэффициента пористости  $K_{\text{п}}$  по данным РФА шлама, учитывающей геохимические особенности ачимовских отложений Уренгойского НГКМ, для снижения объемов неэффективной проходки при горизонтальном бурении с минимальным комплексом КВБ.

## Материалы и методы исследований

Объектом исследования явились ачимовские отложения Уренгойского НГКМ. Исследованные методом РФА скважины равномерно распределены по площади (преимущественно в южной части месторождения), вскрывают глубоководные конуса выноса, охватывая их проксимальные и дистальные зоны. Определение элементного состава шлама и керна выполнялось по методике, детально описанной в первой части работы (Успенская и др., 2026).

Методической основой для поиска связей элементного состава с емкостными свойствами пород послужили результаты исследования керна портативным прибором РФА по пяти поисково-разведочным скважинам (№ X0, X1, X4, X501, X301) общей длиной 390 м.

Для выявления природы взаимосвязей между пористостью, минералогией глин и гранулометрическим составом пород использованы результаты комплексных исследований кернового материала по 26 скважинам, равномерно распределенным по всему месторождению (включая пять скважин с измерениями портативным прибором РФА). По всему указанному фонду зарегистрирован полный комплекс ГИС. Лабораторные исследования керна включали определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), рентгеноструктурный анализ, а также гранулометрический анализ. Данные рентгенофлуоресцентного анализа на стационарной лабораторной установке получены в единичных скважинах.

Практическая апробация разработанных подходов осуществлена на шламовом материале с суммарным интервалом отбора 4360 м. Данный материал получен в процессе бурения одного пилотного ствола № XX09 и трех горизонтальных скважин (ГС № XX09, XX08, XX02). При этом две указанные ГС и пилотный ствол характеризовались полным, а ГС № XX02 ограниченным (только гамма-каротаж) комплексом КВБ. Проверка устойчивости полученного уравнения пористости выполнена посредством «слепого тестирования» на независимой выборке коллекторов разведочной скважины смежной площади.

Результаты РФА керна и шлама объединены в общую базу данных. Ввиду требований конфиденциальности абсолютные концентрации элементов на рисунках не приводятся. Для сохранения возможности качественного анализа трендов, зональности и статистических корреляций оси графиков представлены в виде относительных шкал (от минимальных значений к максимальным или в обратном направлении).

## Результаты

Коэффициент пористости терригенных коллекторов может зависеть одновременно как от седиментационных факторов (минералогического и гранулометрического состава, степени сортировки и окатанности зерен), так и от последующих постседиментационных преобразований (уплотнения и цементации). Поскольку метод РФА фиксирует элементный состав, прямая оценка первичных структурных параметров породы по шламу представляется затруднительной. Тем не менее, регистрируемые элементные ассоциации в определенной степени отражают минеральный состав породы, сформированный в ходе осадконакопления и вторичных преобразований, что позволяет предположить существование связей пористости с геохимическими параметрами отложений.

Разработка и практическая реализация методики оперативной количественной оценки емкостных свойств по данным РФА в ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ осуществлялись в четыре этапа:

1. Исследование природы взаимосвязи минерального состава и коэффициента пористости по данным архивного керна;
2. Исследование природы взаимосвязи элементного состава и коэффициента пористости по данным РФА керна и шлама;
3. Разработка модели оценки коэффициента пористости по данным РФА шлама;

4. «Слепое тестирование» и проверка устойчивости разработанной модели на независимой выборке (разведочной скважины смежной площади).

### Исследование природы взаимосвязи минерального состава и пористости по данным керна

На основе обобщения результатов исследований керна, отобранного из ачимовских отложений Уренгойского НГКМ, выявлено, что главными факторами, контролирующими емкостные свойства изучаемых отложений, являются их гранулометрический состав и глинистость (рис. 1). По данным РСА 26 скважин средний минеральный состав глинистого цемента ачимовских отложений Уренгойского НГКМ практически идентичен составу внутрипластовых глин (хлорит – 73%, гидрослюда – 14%, каолинит – 7%, смешанослойные образования (ССО) – 6%).

Отмечено, что в пределах одного и того же пласта изменение  $K_{\text{п}}$  может коррелировать с изменением как одного глинистого минерала, так и другого. На рис. 1 стрелками показаны интервалы, где изменение  $K_{\text{п}}$  коррелирует с изменением содержания определенных глинистых минералов. Выявленные закономерности не зависят от лаборатории, выполнявшей анализ, что снижает вероятность систематического влияния методики измерений и свидетельствует о естественном характере изменчивости связей пористости с глинистыми минералами. Подобный характер распределения во многом обусловлен влиянием вторичных процессов, которые наряду с седиментационными факторами способны вносить существенный вклад в снижение емкостных свойств отложений (Япаскурт, 2008). К таким постседиментационным преобразованиям относятся аутигенный рост хаотичных агрегатов хлорита, гидрослюды и ССО в свободном поровом пространстве, а также развитие волокон гидрослюды и «книжек» каолинита путем замещения разрушенных зерен полевых шпатов.

Неоднородность изменения коэффициента пористости в зависимости от присутствия различных глинистых минералов объясняется морфологией и ориентацией их чешуек. При перпендикулярной ориентации чешуек хлорита относительно поверхности зерен они формируют крустификационные оторочки и не стесняют поровое пространство. Напротив, при параллельном или хаотичном расположении они активно перекрывают поровые каналы. Тонкие волокна гидрослюды образуют в порах сложную сеть, которая при хаотичной ориентации способна существенно ограничивать фильтрацию. Влияние же каолинита больше связано с его физическим объемом, чем с пространственной ориентацией.

Закономерности изменения емкостных свойств могли быть также обусловлены изменением минерального состава обломочной части матрицы, проявившегося в синхронном или селективном разрушении калиевых (КПШ) и натриевых разностей полевых шпатов (Na-ПШ) (Перолио, 1971). На рис. 1 отмечен ряд интервалов, где динамика  $K_{\text{п}}$  прямо коррелирует с вариациями содержания КПШ, Na-ПШ, общего количества полевых шпатов или кварца. Разрушение силикатов могло приводить к росту общей глинистости, особенно в тонкозернистых

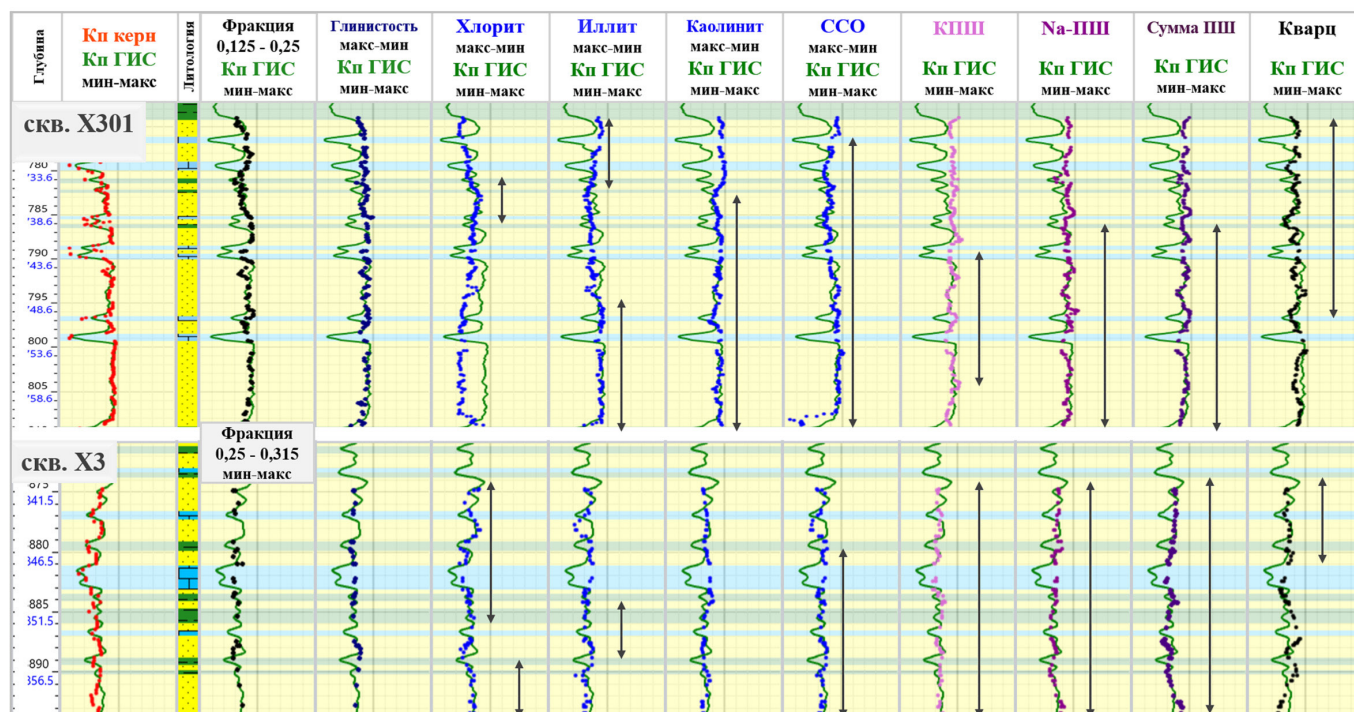


Рис. 1. Результаты сопоставления кривой коэффициента пористости ( $K_p$ ) по данным ГИС с результатами лабораторных исследований и PCA и гранулометрическим составом образцов керна в скв. X301 и X3 (стрелками обозначены интервалы, в которых прослеживается зависимость содержания отдельных минералов от динамики изменения  $K_p$ )

породах. Растворение ПШ могло генерировать и вторичные микропустоты, однако этот положительный эффект, скорее всего, должен был нивелироваться за счет внутрипорового осаждения новообразованных аутигенных глин (Япаскурт, 2008) и последующего уплотнения породы.

#### Исследование природы взаимосвязи элементного состава и пористости

В рамках данного этапа выполнен поиск зависимостей коэффициента пористости  $K_p$  от элементов-индикаторов, соответствующих определенному минеральному составу глин. При этом гранулометрические особенности разреза оценивались опосредованно – через распределение элементов-примесей, предположительно связанных с тяжелой фракцией аксессуарных минералов.

Для оперативной оценки  $K_p$  в условиях дефицита ГИС выявлены взаимосвязи между определенными элементами и пористостью. На основе материала из пяти скважин выполнено сопоставление данных, полученных с помощью портативного РФА на кернах, с лабораторными значениями пористости и результатами интерпретации ГИС, что позволило детально проанализировать природу этих связей и обосновать применимость элементных индикаторов для последующего экспресс-анализа методом РФА шлама.

**Цинк Zn и никель Ni** характеризуются наиболее тесной корреляционной связью с емкостными свойствами пород по разрезу и могут использоваться для расчета  $K_p$  (рис. 2). Уменьшение их концентраций напрямую коррелирует с ростом пористости по всему исследованному интервалу (обратная корреляция). Такая устойчивая обратная зависимость может быть связана с генетической связью указанных микроэлементов с содержанием глинистых минералов (Юдович, Кетрис, 2000, 2011). В высокопористых

песчаниках (коллекторах) объем глинистого материала минимален, что обуславливает снижение концентраций Zn и Ni. Напротив, по мере ухудшения пористости за счет заполнения межзернового пространства глинистыми минералами содержание этих элементов возрастает.

Для ачимовских отложений Уренгойского НГКМ глинистые минералы цемента представлены преимущественно хлоритом с подчиненным количеством гидрослюда, каолинита и смешаннослойных образований (Храмцова и др., 2020). Накопление цинка и никеля могло происходить как на стадии осадконакопления, так и в ходе последующих вторичных процессов под влиянием мигрирующих флюидов. Ионы  $Zn^{2+}$  и  $Ni^{2+}$  обладают близкими ионными радиусами к двухвалентному железу ( $Fe^{2+}$ ) и магнию ( $Mg^{2+}$ ) (Shannon, Prewitt, 1969), из-за чего эти металлы легко встраивались в структуру основного глинистого минерала хлорита, параллельно сорбируясь сопутствующими глинистыми минералами.

Смена корреляционных зависимостей пористости от содержания цинка и никеля в различных интервалах, пластах и по площади обусловлена избирательным влиянием конкретных глинистых минералов, развивавшихся в ходе наложенных процессов вторичных преобразований. Данный факт указывает на то, что, несмотря на высокое фоновое содержание хлорита, концентрации цинка и никеля во многом контролировались избирательной удерживающей способностью всей полиминеральной матрицы: смешаннослойные образования и хлорит сорбировали металлы значительно активнее за счет межслоевого обмена и изоморфизма, чем гидрослюда и каолинит.

**Железо Fe** наряду с Zn и Ni имеет тесную прямую корреляцию с общей глинистостью, обратную – с гранулометрическим составом и, как следствие, устойчивую обратную зависимость с коэффициентом пористости

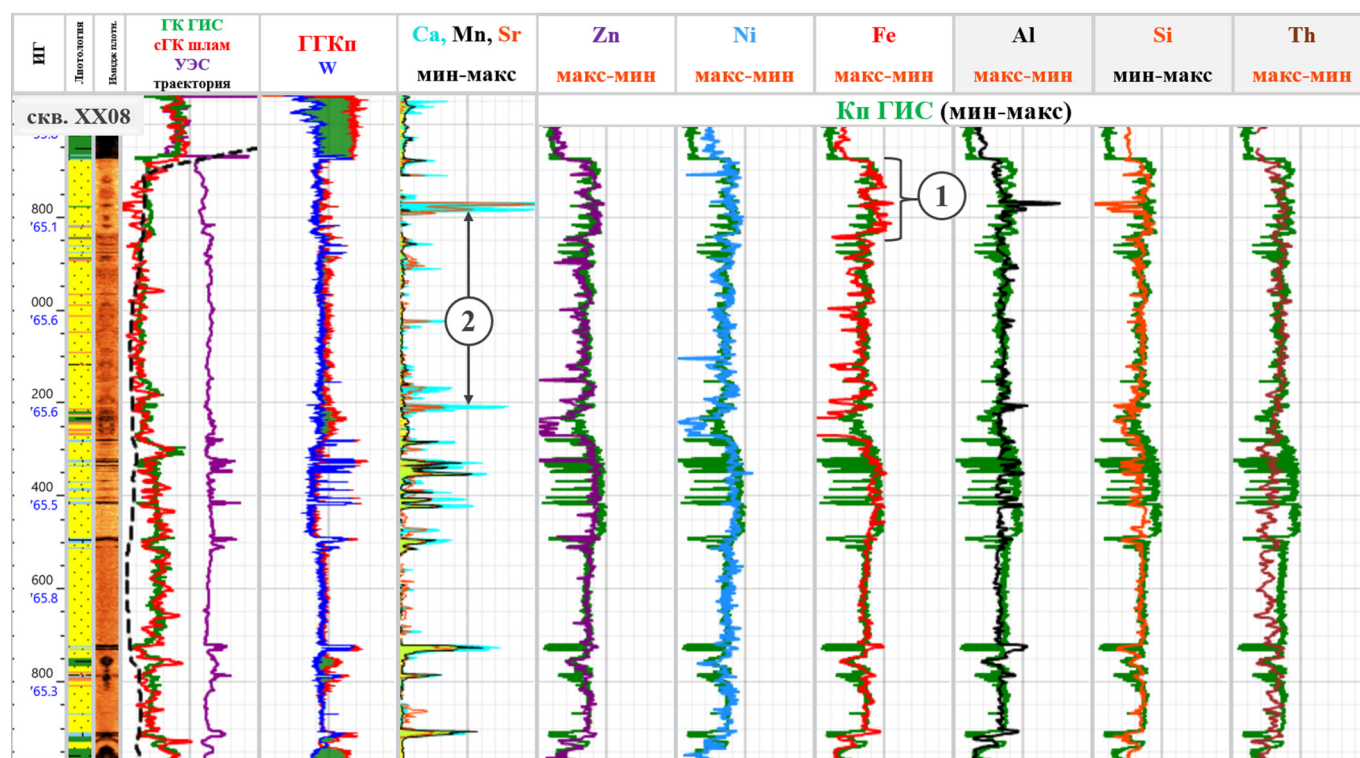


Рис. 2. Пример сопоставления химических элементов, полученных по данным РФА шлама с коэффициентом пористости. Цифрами обозначены: 1 – интервал, где содержание железа резко уменьшается, что приведет к завышению расчетного  $K_p$ , 2 – выпадение техногенных карбонатов из бурового раствора

(рис. 3). При этом, аналогично цинку и никелю, в различных интервалах, пластах и скважинах по площади отмечается смена корреляционных зависимостей содержания Fe от конкретных глинистых минералов. Поскольку железо является основным структурообразующим элементом кристаллической решетки железистого хлорита, его концентрация закономерно возрастает в зонах преобладания этого минерала в породе. Однако в ходе наложенных вторичных преобразований контролировать валовое содержание железа могут и другие глинистые компоненты (включая магнезиальный хлорит, гидрослюда и смешаннослойные образования), удерживающие этот элемент как в своей кристаллической структуре, так и за счет поверхностной сорбции. Каолинит удерживать железо не может, поскольку является чистым алюмосиликатом, в кристаллической решетке которого отсутствуют позиции для данного элемента, а его собственная сорбционная емкость минимальна.

При сопоставлении значений коэффициента пористости с содержанием железа отчетливо выявляется интервал со значительным падением концентрации Fe, в которых прямая геохимическая связь нарушается (рис. 2, цифра 1). В этой зоне, предположительно, железистый хлорит замещается безжелезистыми разностями глин (например, каолинитом), что и может приводить к резкому падению общей концентрации Fe в породе при сохранении высокой глинистости (Лебедев, 1992). По этой причине при использовании единого уравнения  $K_p = f(Fe)$  расчетные значения будут превышать фактическую величину  $K_p$  по ГИС. В связи с этим, данные по железу могут быть использованы для оценки емкостных свойств коллектора с определенными допущениями. Использование железа

в качестве индикатора пористости возможно исключительно в разрезах, где процессы вторичной каолинизации отсутствуют.

**Кремний Si и алюминий Al.** В отличие от мономинеральных кварцевых коллекторов, где связь кремния и алюминия с пористостью имеет прямую корреляцию, в аркозовых отложениях ачимовской толщи такая линейная зависимость отсутствует. Данное ограничение обусловлено тем, что указанные элементы могут одновременно входить в состав нескольких различных минералов. Изменение концентрации Si может быть связано как с зернами кварца или полевого шпата, так и с глинистыми минералами. Кроме того, увеличение доли кремния может быть связано с регенерацией кварца, при которой содержание элемента возрастает, а объем порового пространства при этом уменьшается. Изменение концентрации Al, в свою очередь, может быть связано как с увеличением доли глинистых минералов, так и с присутствием полевых шпатов, из-за чего связь алюминия с пористостью полностью размывается. Вследствие этого в пределах коллектора содержание Si и Al слабо реагирует на изменение порового пространства, что исключает возможность их использования для количественного расчета пористости. Тем не менее, соотношение данных элементов может использоваться для выделения коллекторов и глинистых неколлекторов за счет его контрастного изменения на границе литологических разностей, обусловленного резкой сменой минеральной матрицы (Herron, 1988).

**Элементы-индикаторы акцессорных минералов Zr, P, Ti, Th и калий K.** Концепция о приуроченности радиоактивных пачек к наиболее высокопористым крупнозернистым разностям, где вследствие гравитационной

дифференциации материала могли совместно накапливаться тяжелые акцессорные минералы (циркон, торит, апатит и др.) и КПШ, предположительно происходящие из единого гранитоидного источника сноса (Чернова, Иванова, 2011), была проверена на фактическом материале. Анализ данных РФА зерна и шлама показал, что в ачимовских отложениях радиоактивные песчаники не имеют пространственной приуроченности к интервалам с улучшенными ФЕС. При этом увеличение естественной радиоактивности внутри таких интервалов может сопровождаться как ростом, так и снижением коэффициента пористости. По всей видимости, определяющим фактором здесь выступает глинистость, природа влияния которой была подробно рассмотрена выше, а не повышенная концентрация тяжелых акцессорных минералов. Таким образом, локальная специфика распределения Th, Zr, Р и Ti подтверждает невозможность их прямого использования для расчета пористости. Для прочих элементов, фиксируемых методом РФА, значимых корреляционных зависимостей с коэффициентом пористости выявлено не было, что свидетельствует о нецелесообразности их привлечения к прогнозу емкостных свойств.

#### Расчет коэффициента пористости по данным РФА зерна и шлама

Для оценки  $K_n$  был выбран цинк Zn как один из микроэлементов, характеризующихся наиболее тесной корреляционной связью с емкостными свойствами пород по разрезу. В скважинах с кернавым материалом содержания Zn сопоставлялись с лабораторными значениями  $K_n$ , а в скважинах без керна – с результатами определения  $K_n$  по ГИС. Отмечено, что характер полученных зависимостей

различается как для разных типов исследуемого материала (монолитного керна и измельченного шлама), так и для отдельных групп пластов (рис. 3). Аппроксимирующие зависимости  $K_n = f(Zn)$  строились по плотности распределения точек коллекторов и неколлекторов без учета карбонатной составляющей. Отклонение плотных карбонатизированных разностей (неколлекторов по данным керна и ГИС) от базового тренда зависимости  $K_n = f(Zn)$  рассматривается как ограничение разработанной модели, не позволяющей описать свойства всех литотипов разреза. В связи с этим расчетные значения  $K_n$  для интервалов интенсивной карбонатизации характеризуются высокой неопределенностью и не отражают истинные емкостные свойства пород.

Сопоставление расчетных значений  $K_n$  по данным рентгенофлуоресцентного анализа керна, выполненного портативным прибором, с результатами прямых лабораторных измерений (рис. 4 а, б) продемонстрировало высокие значения коэффициента  $R^2$  (для коллекторов – 0,7 ( $n = 419$ ); для коллекторов и неколлекторов – 0,8 ( $n = 1048$ )) и низкий уровень среднеквадратической ошибки  $RMSE$  (0,0179 и 0,0185 соответственно, или 1,79 и 1,85 процентного пункта пористости).

Сравнение расчетных величин  $K_n$  по данным РФА шлама с результатами интерпретации ГИС в эксплуатационных скважинах (рис. 4 в, г) также показало высокую сходимость: коэффициент  $R^2$  составил 0,7 ( $n = 1946$ ) для коллекторов и 0,8 ( $n = 4069$ ) для коллекторов и неколлекторов при уровне ошибки  $RMSE$ , равном 0,0165 (1,65 процентного пункта пористости) и 0,0175 (1,75 процентного пункта пористости) соответственно.

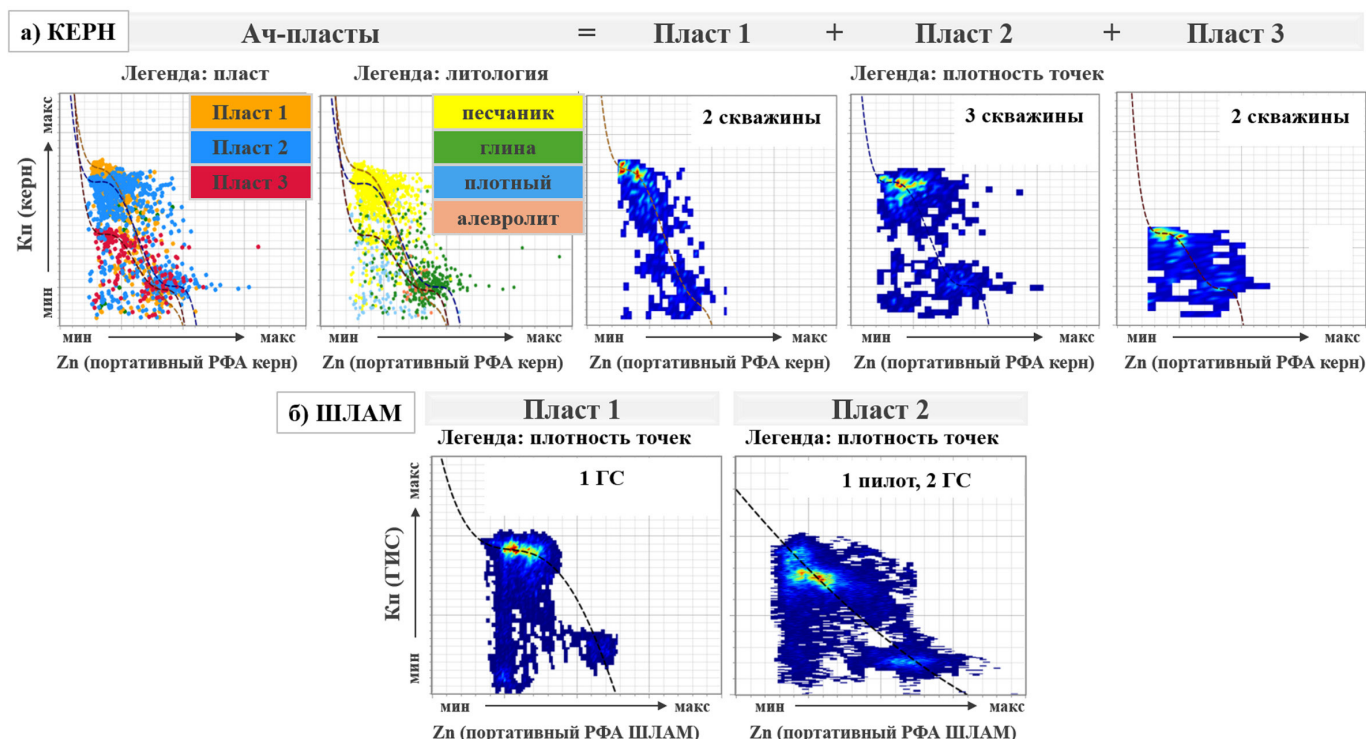


Рис. 3. Сопоставление коэффициента пористости и содержания цинка по данным РФА: а) зависимость «Zn (кern) –  $K_n$  (кern)»; б) зависимость «Zn (шлам) –  $K_n$  (ГИС)»

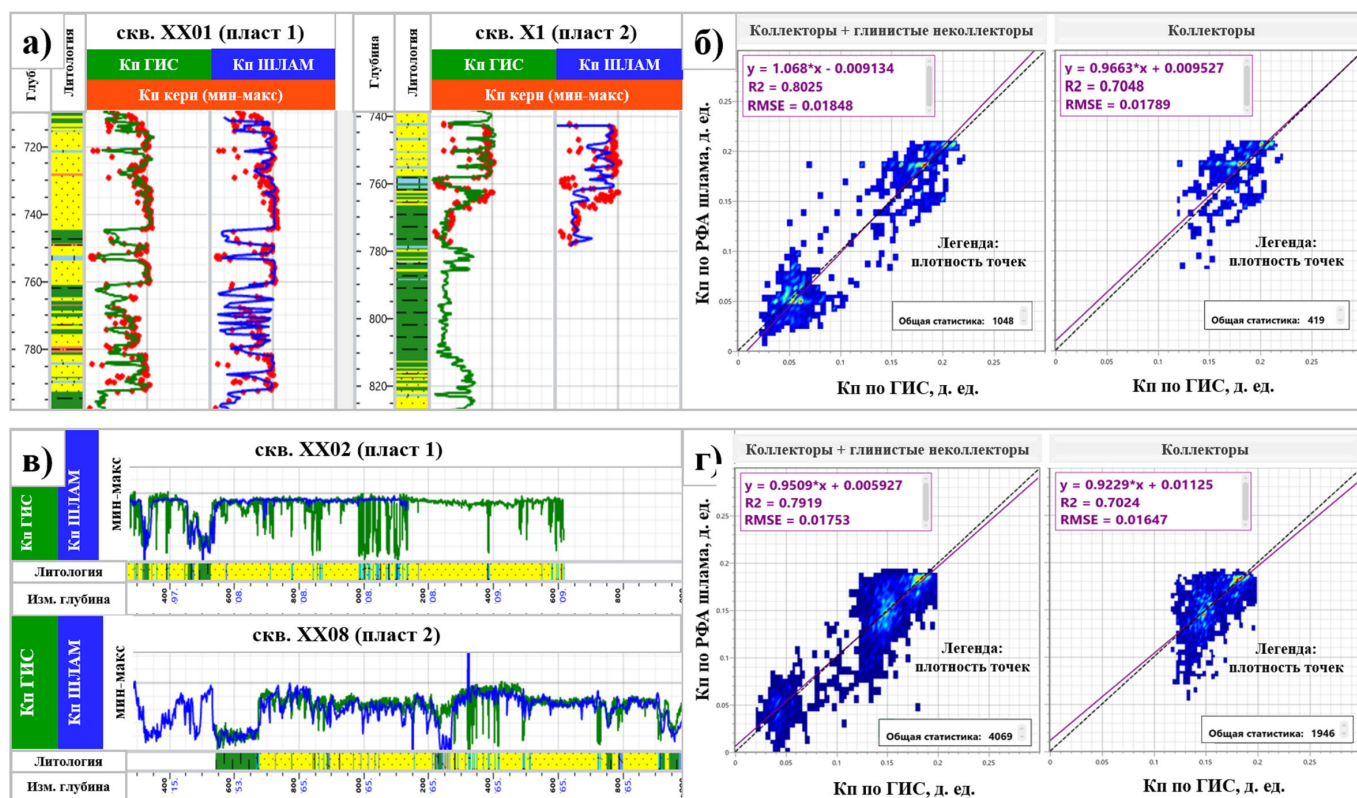


Рис. 4. Результаты сопоставления расчетных  $K_p$  по данным РФА керна и шлама с результатами интерпретации ГИС и прямыми лабораторными измерениями: а) пример геофизических планшетов с сопоставлением кривых  $K_p$  по глубине разреза в скважинах с керном; б) график сопоставления значений  $K_p$  в скважинах с керном (цветом показана плотность распределения данных); в) пример геофизических планшетов с сопоставлением кривых  $K_p$  по глубине разреза в эксплуатационных скважинах; г) график сопоставления значений  $K_p$  в эксплуатационных скважинах.

### Проверка модели оценки коэффициента пористости по данным РФА шлама на месторождениях аналогов

Для подтверждения возможности оценки  $K_p$  по данным РФА шлама в ачимовских отложениях выполнено «слепое тестирование» эмпирической зависимости  $K_p = f(Zn)$  на материале разведочной скважины смежного месторождения, вскрывающей ачимовские отложения. Применение уравнения, полученного для эксплуатационного фонда Уренгойского НГКМ, подтвердило прогнозирующую способность зависимости на независимых данных (рис. 5). Для выборки коллекторов коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,65 ( $n = 46$ ), а среднеквадратичная ошибка  $RMSE$  0,0127 (или 1,27 процентного пункта пористости). Полученные результаты подтверждают сохранение устойчивой связи содержания цинка с коэффициентом пористости в пределах изученных объектов Уренгойского НГКМ и смежной площади, что обосновывает перспективность использования уравнения для экспресс-оценки пористости по шламу в условиях дефицита данных каротажа во время бурения.

### Обсуждение результатов

Выявленная обратная корреляционная связь микроэлементов (Zn, Ni) и железа (Fe) с емкостными свойствами ачимовских пород обосновывает применимость разработанного методического подхода для непрерывной экспресс-оценки коэффициента пористости непосредственно по данным РФА шлама. Полученные эмпирические

зависимости позволяют осуществлять количественную оценку  $K_p$  в режиме реального времени, что имеет высокую практическую ценность при бурении горизонтальных скважин с минимальным комплексом КВБ.

В предложенной модели для расчета  $K_p$  базовым элементом-индикатором пористости выбран Zn, что обусловлено стремлением к простоте вычислений и оперативности интерпретации данных на буровой площадке. Важно отметить, что выявленная зависимость  $K_p = f(Zn)$  не означает, что Zn напрямую влияет на пустотное пространство коллектора. Цинк служит индикатором изменения объема глинистого цемента, с которым связаны изменения емкостных свойств пород. Такая интерпретация согласуется с установленной обратной связью Zn, Ni и Fe с коэффициентом пористости и их устойчивой ассоциацией с пелитовой фракцией отложений ачимовской толщи (Успенская и др., 2026).

Связь в системе «цинк – пористость» нелинейна. Это обусловлено полиминеральным составом глинистого цемента, а также различной морфологией и пространственной ориентацией чешуек глинистых минералов. Обозначенные факторы определяют неодинаковую степень влияния глинистого цемента на емкостные свойства, что объясняет сложную геометрию изгиба тренда  $K_p = f(Zn)$  на графиках.

Прогностическая способность выявленной эмпирической зависимости  $K_p = f(Zn)$  подтверждена результатами «слепого тестирования» на независимых данных разведочной скважины смежной площади ( $R^2 = 0,65$ ;

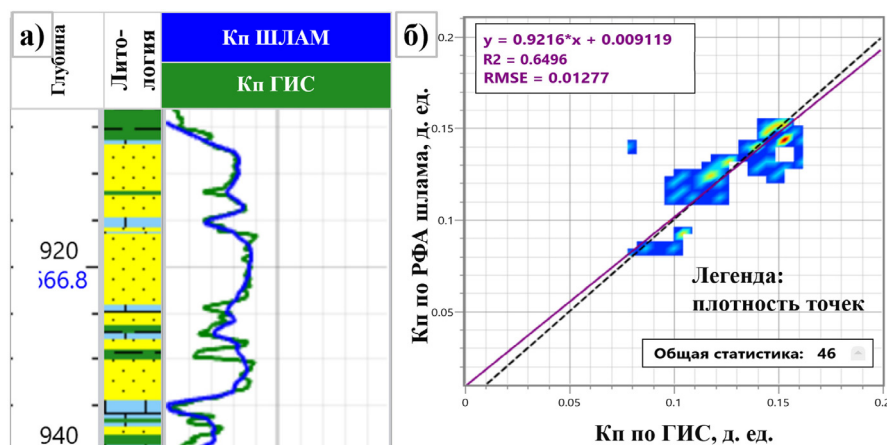


Рис. 5. Результаты сопоставления значений коэффициента пористости  $K_p$  по данным ГИС и РФА шлама для коллекторов ачимовских отложений смежного месторождения: а) геофизический планшет с сопоставлением кривых  $K_p$  по глубине разреза; б) график сопоставления значений  $K_p$  по ГИС и  $K_p$  по РФА шлама

$RMSE = 1,27\%$  в абсолютных единицах пористости). Это позволяет предположить, что в ачимовских отложениях смежных площадей содержание цинка также контролируется объемами глинистого цемента, что опосредованно отражается на емкостных свойствах разреза.

Таким образом, внедрение предложенной модели переводит экспресс-РФА из разряда качественных методов литогеохимического расчленения в инструмент количественной оценки емкостных свойств непосредственно в процессе бурения. Применение методики в условиях дефицита данных КВБ позволяет специалистам по геонавигации использовать расчетные значения пористости для удержания горизонтального ствола в интервалах с наилучшими коллекторскими свойствами.

## Заключение

Выполненное исследование позволило расширить функционал применения портативных спектрометров РФА для оперативной количественной оценки емкостных свойств пласта непосредственно на буровой площадке при строительстве горизонтальных скважин в ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ. В частности, использование микроэлемента Zn в качестве косвенного индикатора изменения объема глинистого цемента и, соответственно, пористости дало возможность упростить математическую модель и обоснованно отказаться от прямого определения  $K_p$  через сложный минеральный состав ачимовских отложений либо поиска многомерных зависимостей элементного состава от пористости.

Практическая значимость полученных результатов заключается в переходе экспресс-РФА из разряда качественных литохимических методов в инструмент количественного прогноза пористости в режиме реального времени. Это позволяет специалистам по геонавигации принимать обоснованные решения по проводке горизонтального ствола в зонах с наилучшими коллекторскими свойствами в условиях бурения с минимальным комплексом КВБ.

Границей применимости разработанного подхода является интервал интенсивной карбонатизации. Для повышения точности модели необходима дальнейшая доработка

уравнения с учетом влияния карбонатного цемента. Кроме того, достоверность количественного прогноза пористости напрямую зависит от качества очистки шлама от остатков бурового раствора, что обуславливает жесткие требования к соблюдению регламента пробоподготовки проб. Наконец, выявленная эмпирическая зависимость отражает специфику исследованных отложений. Изменение минерального состава, объема глинистого вещества и характера вторичных преобразований на других месторождениях или пластах может изменить диагностическую значимость цинка, что требует обязательной верификации модели перед ее переносом на новые геологические объекты.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению работы.

## Литература

- Лебедев Б.А. (1992). Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. Ленинград: Недра, 239 с.
- Пероззо Г.Н. (1971). Эпигенез терригенных осадочных пород юры и мела центральной и юго-восточной частей Западно-Сибирской низменности. М.: Недра, 160 с.
- Чернова Л.С., Иванова Н.А. (2011). Терригенно-минералогические модели генетических типов пород для прогноза развития коллекторов (на примере нефтегазоносных районов Западной Сибири). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, 1(5), с. 8–16.
- Успенская Л.А., Шадчнев Н.А., Виноградов В.К., Быбин П.В., Буткеев А.С., Маникин А.Г., Андрюхин К.В. (2026). Применение рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама для сопровождения бурения горизонтальных скважин на примере ачимовских отложений (часть 1). *Георесурсы*, 28(3), с. 82–96. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.13>
- Храмцова А.В., Пахомов С.И., Натчук Н.Ю., Калашникова М.П., Ромашкин С.В., Мусихин А.Д., Семенова Н.Г. (2020). Фациальные модели ачимовской толщи Восточно-Уренгойского лицензионного участка как основа для оптимизации систем разведки и разработки. *Георесурсы*, 22(3), с. 55–61. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.55-61>
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000). Основы литохимии. Санкт-Петербург: Наука, 479 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011). Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Япаскурт О.В. (2008). Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 356 с.

Herron M.M. (1986). Mineralogy from geochemical well logging. *Clays and Clay Minerals*, 34(2), pp. 204–213. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340211>

Herron M.M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5), pp. 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Herron S.L., Herron M.M. (1996). Quantitative Lithology: An Application for Open and Cased Hole Spectroscopy. *Proceedings of the SPWLA 37th Annual Logging Symposium*, New Orleans, Louisiana, USA, June 16–19, 1996, Paper E, 14 p.

Shannon R.D., Prewitt C.T. (1969). Effective ionic radii in oxides and fluorides. *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 25(5), pp. 925–946. <https://doi.org/10.1107/S0567740869003220>

### Сведения об авторах

**Людмила Андреевна Успенская** – кандидат геол.-минерал. наук, эксперт департамента разработки месторождений, ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия  
e-mail: lyudmila.uspenskaya@novatek.ru

**Николай Александрович Шадчнев** – начальник управления геологического мониторинга разработки месторождений департамента разработки месторождений, ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия

**Антон Анатольевич Мигилев** – начальник управления петрофизики департамента геологоразведочных работ оценки ресурсной базы, ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

**Андрей Сергеевич Буткеев** – заместитель генерального директора – главный геолог, АО «АРКТИКГАЗ», Новый Уренгой, Россия

**Александр Леонидович Солодовников** – заместитель начальника отдела промысловой геологии, АО «АРКТИКГАЗ», Новый Уренгой, Россия

**Андрей Анатольевич Карев** – главный специалист отдела промысловой геологии, АО «АРКТИКГАЗ», Новый Уренгой, Россия

**Алексей Геннадьевич Маникин** – кандидат геол.-минерал. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, ООО «Тюменьгеоспектр»; доцент кафедры общей геологии и полезных ископаемых геологического факультета, Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия  
e-mail: a.manikin@tgeos.ru

Статья поступила в редакцию 02.07.2026;

Принята к публикации 31.08.2026; Опубликована 30.09.2026

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

## Application of X-Ray Fluorescence Analysis of Drill Cuttings for Geosteering Horizontal Wells: A Case Study of the Achimov Formation (Part 2)

L.A. Uspenskaya<sup>1\*</sup>, N.A. Schadchnev<sup>1</sup>, A.A. Migilev<sup>2</sup>, A.S. Butkeev<sup>3</sup>, A.L. Solodovnikov<sup>3</sup>, A.A. Karev<sup>3</sup>, A.G. Manikin<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>NOVATEK PJSC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

<sup>3</sup>ARCTICGAS JSC, Noviy Urengoy, Russian Federation

<sup>4</sup>Tyumengeospekttr LLC, Saratov, Russian Federation

<sup>5</sup>Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

\*Corresponding author: Lyudmila A. Uspenskaya, e-mail: lyudmila.uspenskaya@novatel.ru

**Abstract.** This paper is dedicated to expanding the application scope of X-ray fluorescence (XRF) analysis of drill cuttings in the Achimov deposits of the Urengoy oil and gas condensate field. The first part of the study addressed the litho-geochemical typing of the section using XRF data from drill cuttings. The second part presents a methodology for the real-time evaluation of formation reservoir properties during horizontal well drilling with a minimal logging-while-drilling (LWD) suite (gamma ray logging only, or its combination with resistivity measurements). The authors propose a simplified mathematical model for evaluating porosity based on the concentration of a single element indicator – zinc (Zn). The results of “blind testing” of the model on an exploratory well from an adjacent area confirm its reliability. The practical significance of implementing this porosity evaluation methodology for drilling horizontal wells with a minimal LWD suite is substantiated.

**Keywords:** Achimov formation, X-ray fluorescence analysis, elemental composition, porosity, drill cuttings, geosteering, horizontal drilling

**Recommended citation:** Uspenskaya L.A., Schadchnev N.A., Migilev A.A., Butkeev A.S., Solodovnikov A.L., Karev A.A., Manikin A.G. (2026). Application of X-Ray Fluorescence Analysis of Drill Cuttings for Geosteering Horizontal Wells: A Case Study of the Achimov Formation (Part 2). *Georesursy = Georesources*, 28(3), pp. 97–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.14>

### References

Chernova L.S., Ivanova N.A. (2011). Terrigenous-mineralogical models of genetic rock types for forecasting reservoir development (using oil and gas regions of Western Siberia as an example). *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, (1(5)), pp. 8–16. (In Russ.)

Herron M.M. (1986). Mineralogy from geochemical well logging. *Clays and Clay Minerals*, 34(2), pp. 204–213. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340211>

Herron M.M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5), pp. 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Herron S.L., Herron M.M. (1996). Quantitative Lithology: An Application for Open and Cased Hole Spectroscopy. *Proceedings of the SPWLA 37th Annual Logging Symposium*, New Orleans, Louisiana, USA, June 16–19, 1996, Paper E, 14 p.

Khrantsova A.V., Pakhomov S.I., Natchuk N.Yu., Kalashnikova M.P., Romashkin S.V., Musikhin A.D., Semenova N.G. (2020). Facies models of the Achimov Formation of East-Urengoy license as the basis for optimizing exploration and field development patterns. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 55–61. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.55-61>

Lebedev B.A. (1992). Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins. Leningrad: Nedra, 239 p. (In Russ.)

Perosio G.N. (1971). Epigenesis of Terrigenous Sedimentary Rocks of the Jurassic and Cretaceous in the Central and Southeastern Parts of the West Siberian Lowland. Moscow: Nedra, 160 p. (In Russ.)

Shannon R.D., Prewitt C.T. (1969). Effective ionic radii in oxides and fluorides. *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 25(5), pp. 925–946. <https://doi.org/10.1107/S0567740869003220>

Uspenskaya L.A., Shadchnev N.A., Vinogradov V.K., Bybin P.V., Butkeev A.S., Manikin A.G., Andryukhin K.V. (2026). Application of X-Ray Fluorescence Analysis of Drill Cuttings for Geosteering Horizontal Wells: A Case Study of the Achimov Formation (Part 1). *Georesursy = Georesources*, 28(3), pp. 82–96. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.13>

Yapaskurt O.V. (2008). Genetic Mineralogy and Stage Analysis of Processes of Sedimentary Rock and Ore Formation. Moscow: ESLAN, 356 p. (In Russ.)

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000). Fundamentals of Lithochemistry. St. Petersburg: Nauka, 479 p. (In Russ.)

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011). Geochemical Indicators of Lithogenesis (Lithological Geochemistry). Syktyvkar: Geoprint, 742 p. (In Russ.)

## About the Authors

**Lyudmila A. Uspenskaya** – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Expert of Field Development Department, NOVATEK PJSC, Moscow, Russian Federation

e-mail: lyudmila.uspensskaya@novatek.ru

**Nikolay A. Shadchnev** – Head of Reservoir Engineering Geological Monitoring Department, NOVATEK PJSC, Moscow, Russian Federation

**Anton A. Migilev** – Head of Petrophysics Division, Exploration and Resource Base Evaluation Department, NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

**Andrey S. Butkeev** – Deputy General Director – Chief Geologist, ARCTICGAS JSC, Noviy Urengoy, Russian Federation

**Alexander L. Solodovnikov** – Deputy Head of Production Geology Department, ARCTICGAS JSC, Noviy Urengoy, Russian Federation

**Andrey A. Karev** – Chief Specialist of Production Geology Department, ARCTICGAS JSC, Noviy Urengoy, Russian Federation

**Alexey G. Manikin** – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy General Director for Research and Development, LLC Tyumengeospektr LLC; Associate Professor, Department of General Geology and Mineral Resources, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

e-mail: a.manikin@tgeos.ru

*Manuscript received 2 July 2026;*

*Accepted 31 August 2026;*

*Published 30 September 2026*

© 2026 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)