

Применение рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама для сопровождения бурения горизонтальных скважин на примере ачимовских отложений (часть 1)

Л.А. Успенская^{1*}, Н.А. Шадчнев¹, В.К. Виноградов¹, П.В. Быбин², А.С. Буткеев³,
А.Г. Маникин^{4,5}, К.В. Андрюхин^{4,5}

¹ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия

²ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

³АО «АРКТИКГАЗ», Новый Уренгой, Россия

⁴ООО «Тюменьгеоспектр», Саратов, Россия

⁵Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

В работе представлена методика оперативной интерпретации данных рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) бурового шлама, учитывающая литогеохимические особенности отложений ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). На основе комплексного анализа кернового и шламового материала установлены геохимические признаки, позволяющие выделять коллекторы и неколлекторы, представленные глинистыми и плотными карбонатизированными интервалами. Определены особенности химического состава генетически различных типов глин – кровельных, внутрипластовых и подошвенных, имеющих близкие геофизические характеристики по данным полного комплекса каротажа во время бурения. Показана возможность идентификации типов глин по данным РФА шлама для оперативного определения положения скважины относительно продуктивного интервала и обоснованной корректировки ее траектории. Установлены геохимические признаки, позволяющие различать природные плотные карбонатизированные интервалы и техногенное карбонатное загрязнение, поступающее в шлам из бурового раствора в виде мраморной крошки. Полученные результаты обосновывают эффективность применения технологии углубленного изучения шлама в ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ для снижения неэффективной проходки при бурении горизонтальных скважин как с полным, так и с минимальным комплексом каротажа во время бурения.

Ключевые слова: ачимовская толща, рентгенофлуоресцентный анализ, буровой шлам, элементный состав, литогеохимия, геонавигация, горизонтальное бурение

Для цитирования: 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>

Введение

Бурение горизонтальных скважин в сложных геологических условиях ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) сопряжено с рисками неэффективной проходки, обусловленными значительной латеральной и вертикальной изменчивостью разреза, переходом траектории ствола из одной песчаной линзы в другую, локальной глинизацией разреза и невыдержанностью толщин глинистых перемычек. Ситуация

осложняется отсутствием устойчивых геофизических реперов по данным полного комплекса каротажа во время бурения (КВБ), позволяющих идентифицировать генетически разные типы глин (кровельные, подошвенные или внутрипластовые), что приводит к неопределенностям при принятии решений по корректировке траектории скважины, увеличивает нецелевую проходку и в итоге может приводить к срезке и бурению нового ствола.

Дополнительные ограничения возникают при вскрытии пластов со сниженным пластовым давлением, сформировавшимся вследствие разработки залежи или при одновременном вскрытии пластов со сниженным и начальным аномально высоким пластовым давлением (АВПД). Из-за риска прихватов и потери оборудования в таких условиях применение полного комплекса КВБ может быть ограничено, сопровождение осуществляется по минимальному

* Ответственный автор: Людмила Андреевна Успенская
e-mail: lyudmila.uspenskaya@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/>).

комплексу, включающему гамма-каротаж (ГК) или ГК с измерением удельного электрического сопротивления (ГК-УЭС). В условиях высокой изменчивости ачимовских отложений такой набор методов не обеспечивает достоверное расчленение разреза в режиме реального времени, что снижает эффективность геонавигации.

Для решения обозначенных проблем при бурении скважин в мировой практике активно применяются литогеохимические методы изучения, среди которых ведущую роль играет рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) (Prundeanu et al., 2021). Долгое время исследования методом РФА выполнялись преимущественно на стационарном лабораторном оборудовании и применялись для определения элементного состава горных пород, реконструкции минерального состава, восстановления условий осадконакопления и источников сноса. Фундаментальные основы литохимического подхода представлены в исследованиях по геохимической классификации осадочных пород (Bhatia, 1983; Roser, Korsch, 1988; Pearce et al., 1999), а также в работах отечественной школы литохимии (Юдович, Кетрис, 2000, 2011). В дальнейшем геохимические методы получили развитие в качестве инструмента для стратиграфии: вариации содержаний элементов стали использоваться для межскважинной корреляции разрезов (Pearce et al., 1999). Для мезозойских отложений Западной Сибири литолого-геохимический подход применялся при изучении стратиграфических границ и корреляции разрезов (Eder et al., 2020; Eder et al., 2022), реконструкции палеоклимата (Эдер и др., 2023).

Появление портативных РФА-спектрометров позволило использовать их для исследований шлама для оперативного сопровождения бурения (Lemière, 2018; Pozzi, Casal, 2018): литологическое расчленение разреза на основе распределения главных породообразующих элементов (Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg) и расчета геохимических индексов. Данные РФА шлама также успешно применяются для выявления седиментационных циклов и хемотратиграфической корреляции (Pearce et al., 1999; Ratcliffe et al., 2015).

Применение РФА шлама сопровождается методическими ограничениями. К ним относятся загрязнение буровым раствором, смешивание проб из разных интервалов и изменение их гранулометрии при выносе на поверхность, что при нарушении регламента пробоподготовки искажает литогеохимические характеристики и ведет к ошибочной интерпретации. Существенным ограничением также является невозможность прямого переноса геохимических критериев с одного объекта на другой. Следовательно, алгоритмы обработки геохимической информации и перечень решаемых на их основе задач должны быть адаптированы под особенности конкретного месторождения или пласта.

Учет и компенсация указанных ограничений определяют научно-методическую и практическую значимость данной работы. В связи с этим научная новизна проведенного исследования заключается в следующем.

1. Выполнена адаптация фундаментальных литохимических закономерностей, разработанных в отечественной школе литохимии (Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис и др.), а также подходов зарубежных исследований к анализу бурового шлама для ачимовских отложений Уренгойского НГКМ.

2. Выявлены дополнительные (помимо изменения концентраций Al и Si) элементы-индикаторы для разделения коллекторов и неколлекторов по данным РФА шлама. Установлено, что коллекторы ачимовской толщи Уренгойского НГКМ характеризуются низкими содержаниями цинка (Zn), никеля (Ni) и железа (Fe) и других металлов, что в дополнении помогло идентифицировать коллекторы с повышенной естественной радиоактивностью, ошибочно принимаемые по данным ГК за глины.

3. Разработаны литогеохимические критерии для оперативной идентификации генетически разных типов глин (кровельных, подошвенных и внутрипластовых), слабо отличающихся по своим геофизическим характеристикам по данным полного комплекса КВБ.

4. Обоснован способ экспресс-дифференциации природного карбонатного цемента (ассоциация кальций–марганец–стронций) и техногенного кольматанта бурового раствора (ассоциация кальций–стронций) непосредственно на буровой площадке с помощью портативных РФА-спектрометров.

Цель работы – разработка методики оперативной интерпретации данных РФА шлама, учитывающей литогеохимические особенности ачимовских отложений Уренгойского НГКМ.

Материалы и методы исследований

Объект исследования – ачимовские отложения Уренгойского НГКМ. Изученные скважины расположены преимущественно в южной части месторождения и равномерно распределены по площади. Они вскрывают проксимальные и дистальные зоны глубоководных конусов выноса и охватывают целевые продуктивные пласты, в которых сосредоточена большая часть запасов углеводородов.

Основу работы составили результаты РФА кернового материала из пяти скважин (№ X0, X1, X4, X501, X301), выполненного портативным спектрометром (общая длина 390 м). Практическая апробация разработанных подходов выполнена на шламе пилотного ствола № XX09 и трех горизонтальных скважин (ГС № XX09, XX08, XX02) с суммарным интервалом отбора 4360 м. Результаты РФА керна и шлама объединены в базу данных, на основе которой сформированы геохимические планшеты. В связи с требованиями конфиденциальности абсолютные концентрации элементов на рисунках не приводятся. Для сохранения возможности анализа результатов РФА данные представлены в виде относительных шкал (от минимальных к максимальным значениям или в обратной последовательности), что позволяет в полном объеме продемонстрировать геохимические тренды, зональность и корреляции.

Для установления связи между элементным и минеральным составом отложений дополнительно привлечены результаты рентгеноструктурного анализа (РСА) керна 26 скважин. В эту выборку вошли и пять скважин, изученных портативным РФА-спектрометром, а данные РСА использовались для интерпретации выявленных геохимических закономерностей.

Исследование керна и шлама с помощью портативного прибора РФА

Элементный состав керна и бурового шлама (более 4900 проб) определен на портативном РФА-спектрометре

с кремниевым дрейфовым детектором большой площади и рентгеновской трубкой с напряжением до 45 кВ. Для снижения влияния микронеоднородности материала пробы усредняли и гомогенизировали. Для каждого образца выполняли не менее трех измерений продолжительностью 1–2 мин каждое с расчетом дисперсии и отбраковкой случайных выбросов. Измерения проводились в режиме определения легких и тяжелых элементов в горных породах с представлением результатов в массовых процентах.

В составе изучаемых пород определяли как основные породообразующие элементы (Si, Al, Ca, Fe, Mg, K), так и элементы-примеси (Zr, Nb, Th, U, Rb, Sr, Ni, Cu, Zn и др.). Фактические диапазоны концентраций исследуемых элементов и абсолютная инструментальная погрешность (среднеквадратическое отклонение), рассчитанная по результатам многократных измерений, представлены в табл. 1.

Применимость портативного РФА-спектрометра для экспресс-анализа пород Западной Сибири и бурового шлама показана в работе (Куликов и др., 2023). Высокая сходимость результатов экспресс-метода с данными масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для низких концентраций элементов-примесей (в частности, Zr) доказана межлабораторными сличительными испытаниями на базе ИГЕМ РАН и ВИМС.

При сопоставлении результатов исследований керна, выполненных портативным и стационарным приборами, с данными спектрального ГК и ГК по ГИС получена хорошая сходимость (рис. 1). Различия в абсолютных

значениях обусловлены как физическим состоянием исследуемого материала (монолитный керн против измельченного порошка), так и конструктивными особенностями рентгеновских трубок в разной аппаратуре (Potts, West, 2008; West et al., 2008).

Портативный анализатор позволяет определять элементы в диапазоне от Mg до U. Однако в исследованных ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ уран зарегистрирован не был (за исключением редких точечных всплесков) ввиду недостаточной чувствительности оборудования к его малым концентрациям. В связи с этим U исключен из числа диагностических элементов, рассматриваемых в настоящей работе.

Подготовка бурового шлама для исследований методом РФА

Отбор первичных проб бурового шлама осуществляли непосредственно на виброситах буровой установки. При бурении ачимовских отложений независимо от компоновки низа бурильной колонны (винтовой забойный двигатель или роторно-управляемая система) использовались алмазные режущие долота, образующие преимущественно мелкодисперсный шлам. Для анализа отбирали фракцию 0,3–1,0 мм, что позволяет минимизировать влияние глинистого раствора и исключить крупные обломки пород, потенциально связанные с обрушением стенок скважины. Интенсивных обвалов в изученных интервалах не наблюдалось; материал крупнее 3,0–5,0 мм составлял незначительную долю, что подтверждено визуальным контролем на виброситах.

Для исключения загрязнения проб остатками бурового раствора шлам подвергался обязательной отмывке. На первом этапе в зависимости от основы раствора (водная или углеводородная) материал промывали проточной водой либо дизельным топливом. Затем для удаления остаточных пленок образцы дополнительно очищали раствором ПАВ.

Следующим этапом являлась сушка очищенной пробы при температуре 105–110 °С до достижения постоянной массы. Тщательное удаление влаги было необходимо для снижения ее влияния на интенсивность аналитических сигналов и воспроизводимость результатов РФА. После высушивания пробы подвергали магнитной сепарации для удаления металлических техногенных частиц. Сепарацию проводили при минимальной интенсивности магнитного воздействия, достаточной для извлечения металлической стружки, с целью минимизации потерь слабомагнитных природных минералов. Состав удаленной магнитной фракции контролировали микроскопически. Затем пробы фотографировали под микроскопом с масштабной линейкой для визуального контроля качества пробоподготовки и оценки морфологии шлама. После фотографирования шлам измельчали в лабораторной мельнице (или вручную в агатовой ступке) до состояния однородного порошка и прессовали на гидравлическом прессе в таблетку. Измерения выполняли на том же спектрометре, который использовался для анализа керна.

Организация работ предусматривала параллельное выполнение технологических операций. В каждой смене участвовали три специалиста, ответственные за отбор шлама, пробоподготовку и РФА-измерения, что минимизировало

Элемент	Диапазон содержаний в пробах «min – max» (%)	Медианное значение «±» (%)	Значение погрешности определения «±» (%)
Mg	0–1,175	0,077	±0,200
Al	3,091–8,865	6,930	±0,040
Si	9,948–32,438	27,090	±0,031
P	0,18–0,40	0,210	±0,006
S	0,261–3,781	1,030	±0,005
Cl	0–0,498	0,220	±0,002
K	0,726–4,287	2,790	±0,004
Ca	1,077–40,327	3,580	±0,003
Ti	0,099–0,75	0,380	±0,002
Mn	0,027–0,736	0,130	±0,005
Fe	3,032–17,796	6,900	±0,017
Ni	0,003–0,021	0,008	±0,001
Cu	0,002–0,120	0,009	±0,001
Zn	0,006–0,035	0,015	±0,001
Rb	0,004–0,041	0,019	±0,001
Sr	0,059–0,390	0,096	±0,001
Zr	0,006–0,030	0,036	±0,001
Nb	0–0,007	0,004	±0,001
Ba	0,221–5,814	0,706	±0,005
Th	0,002–0,044	0,003	±0,001
U	0–0,003	0,0015	±0,001

Табл. 1. Диапазоны содержаний ключевых элементов в отложениях ачимовской толщи и инструментальная погрешность определения по всей выборке образцов

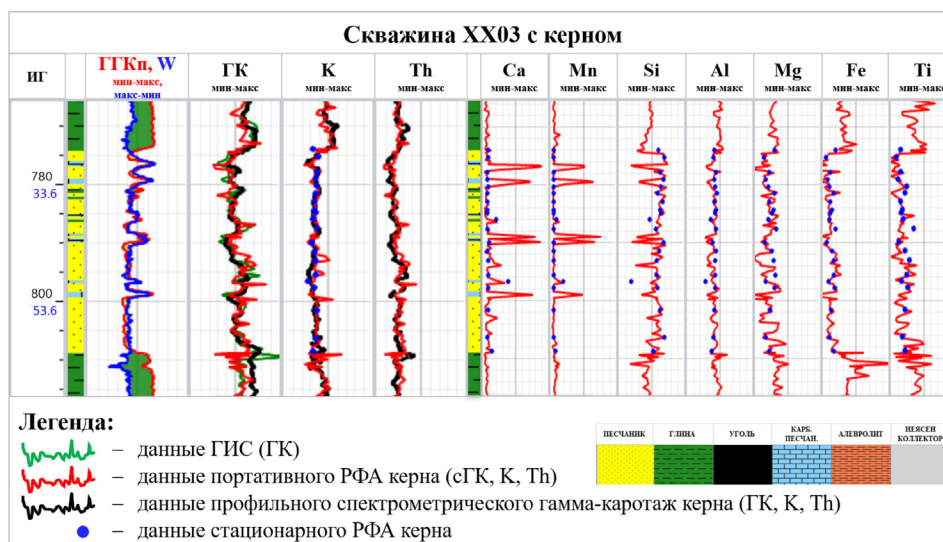


Рис. 1. Пример сопоставления элементного состава, определенного на керне посредством портативного и стационарного РФА-спектрометров, профильных исследований керна с помощью спектрального гамма-каротажа и данных ГК, полученных в процессе ГИС

время от получения материала до результата. Общая продолжительность цикла (от пробоподготовки до РФА) составляла 15–20 мин. С учетом среднего времени транспортировки шлама от забоя до устья (около 40 мин) и пробоподготовки суммарная задержка аналитической информации составляла 55–60 мин. При скорости бурения 10–15 м/ч это соответствует запаздыванию данных по глубине на 9–15 м, что меньше длины одной буровой свечи (28 м).

Отбор материала осуществляли на пилотных и горизонтальных скважинах. Анализ показал, что шаг опробования 2 м достаточен для характеристики нецелевых интервалов, тогда как в целевых пластах для повышения пространственного разрешения его уменьшали до 0,5–1,0 м. Такая плотность отбора обеспечивала получение геохимической информации, необходимой для оперативной интерпретации разреза и принятия решений при геонавигационном сопровождении бурения.

Привязка проб по глубине данных РФА

Точная привязка по глубине – ключевой этап геолого-технологического сопровождения, определяющий достоверность решений при геонавигации. В отличие от керна, характеризующегося фиксированными глубинами отбора, привязка шлама к глубине технологически сложна. На первом этапе станция ГТИ рассчитывает время выноса шлама на поверхность (в среднем 40 мин по производительности насосов и объему скважины). Полученная задержка пересчитывается в глубину по текущей механической скорости. Однако из-за неравномерного кавернообразования и пульсаций потока жидкости такой пересчет времени в глубину имеет высокую неопределенность, а погрешность первичной привязки шлама по стволу разреза может достигать ± 10 –30 м.

Для детальной увязки шлама по глубине использован расчет синтетического гамма-каротажа (сГК) по уравнению Эллиса (Ellis, 1987). Как было отмечено ранее, в исследуемом разрезе ачимовских отложений уран не был зарегистрирован. Ввиду указанных причин уран не учитывался при моделировании сГК. Поэтому для расчета сГК

по множественной линейной регрессии использовались только торий (Th, ppm) и калий (K, %):

$$\text{сГК} = A \cdot K + B \cdot \text{Th},$$

где A и B – локальные калибровочные коэффициенты для перевода единиц измерения элементов. Расчетные значения сГК выражаются в условных единицах (у.е.), нормировка шкал выполняется для сопоставления с данными отечественной и зарубежной геофизической аппаратуры. В связи с защитой интеллектуальной собственности числовые значения коэффициентов не приводятся.

Качество расчета контролировалось путем сопоставления сГК с данными спектрального ГК керна и кабельного ГК (рис. 2). Их конфигурация практически идентична, расхождение абсолютных значений, вызванных разной чувствительностью аппаратуры, устранено путем нормализации шкал сГК. Коэффициент взаимной корреляции (R) между расчетными и замеренными величинами составил 0,87 ($n = 966$), что подтверждает достоверность расчета сГК по данным РФА и обоснованность подхода для оперативной привязки шлама. Фактическая погрешность глубинной привязки, оцененная по контрольным реперам (плотные пропластки и глинистые пачки), не превышает $\pm 0,5$ –1,5 м.

Разработка методики оперативной интерпретации данных РФА шлама, учитывающей геохимические особенности ачимовских отложений Уренгойского НГКМ

Методической основой работы стала адаптация классических литохимических подходов Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис, а также результатов отечественных исследований геохимии мезозойских отложений Западной Сибири к оперативным задачам геонавигации в разрезе ачимовской толщи Уренгойского НГКМ. Разработанная методика оперативной интерпретации данных РФА шлама позволяет непосредственно в процессе бурения проводить геохимическую типизацию глин разного генезиса для оптимизации проводки скважин при использовании полного комплекса КВБ. При комплексировании РФА шлама

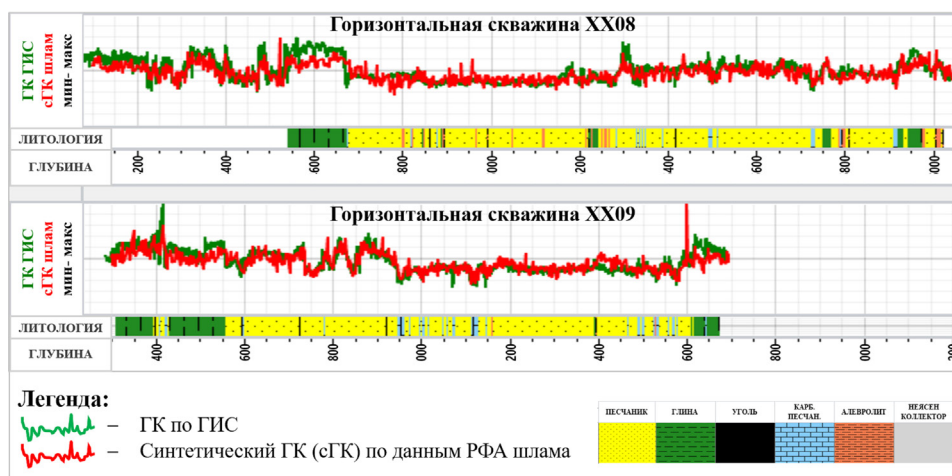


Рис. 2. Пример привязки шлама по глубине (сопоставление расчетных сГК и зарегистрированных ГК по ГИС)

с минимальным комплексом ГИС методика обеспечивает возможность расчленения разреза на различные литотипы и выделения разных типов глин, что сложно сделать в условиях высокой изменчивости ачимовской толщи только по данным ГК. В обоих сценариях бурения применение данного подхода направлено на увеличение эффективной проходки горизонтального ствола. Разработка методики осуществлялась в три этапа:

1. разделение коллекторов и неколлекторов (глинистых и плотных карбонатизированных разностей) по элементному составу;
2. типизация глин (кровельных, подошвенных и внутрипластовых) по элементному составу;
3. апробация методики интерпретации данных РФА шлама для увеличения эффективной проходки в условиях бурения горизонтальных скважин с минимальным комплексом КВБ.

Результаты

Геохимические критерии дифференциации коллекторов и неколлекторов

На основе сопоставления результатов, полученных портативным РФА-спектрометром на керне пяти скважин, данных ГИС, литологического описания керна, а также стандартных лабораторных определений и данных РСА установлены и обоснованы элементы-индикаторы, характерные для различных петрофизических типов пород. Наиболее информативными для оперативного расчленения разреза оказались вариации содержаний Si, Al, Fe, Ni, Zn, K, Ti, P, Th, Ca, Mn и Sr. Ниже рассмотрены геохимические особенности каждого выделенного типа пород в увязке с их минералогическим составом, а также представлена сводная таблица геохимических индикаторов (табл. 2).

Коллекторы с нормальной радиоактивностью характеризуются пониженным содержанием Al, Zn, Ni, Fe и других металлов, а также повышенным содержанием Si (рис. 3, цифра 1). Одновременно снижение концентраций металлов связано, предположительно, в основном с пониженным содержанием глинистого цемента (Юдович, Кетрис, 2011), а повышенное содержание Si отражает кварц-полевошпатовый состав пород ачимовской толщи, в котором кремний входит в состав как полевых шпатов, так и кварца (Panchenko et al., 2021).

Глинистые неколлекторы характеризуются повышенными содержаниями Al, Zn, Ni, Fe и других металлов, а также пониженным содержанием Si (рис. 3, цифра 2). Синхронное увеличение концентраций Al, Fe, Ni и Zn связано предположительно с повышенным содержанием глинистого материала, а снижение Si отражает дефицит каркасных силикатов в глинистых разделах ачимовской толщи, где основные породообразующие компоненты уступают место слоистым алюмосиликатам.

Коллекторы с повышенной радиоактивностью схожи по элементному составу с коллекторами с нормальной радиоактивностью. Главное их отличие – повышенные значения естественной радиоактивности (ГК). Интерпретация радиоактивных интервалов основывалась на совокупности данных ГК и элементного состава шлама, прежде всего Zr, P, Ti, Th и K (рис. 3, цифра 3).

При сопоставлении элементного состава было отмечено, что повышение содержаний P, Zr и Ti тесно коррелирует с ростом концентраций K и Th. Согласно результатам минералогических исследований и литературным данным, повышенные содержания Th могут быть связаны с присутствием монацита, циркона и других акцессорных минералов-концентраторов Th. Повышенные содержания P, вероятно, обусловлены присутствием апатита и монацита (Каулина и др., 2019), тогда как увеличение Ti может быть связано с присутствием сфена, рутила, ильменита и продуктов его преобразования – лейкоксена (Юдович, Кетрис, 2011; Svendsen, Hartley, 2002). В свою очередь, повышенные концентрации K отражают присутствие в разрезе прослоев с высоким содержанием калиевых полевых шпатов (до 20–25 % от объема породы по данным керна).

Радиоактивные песчаники мощностью 2–4 м (локально до 10 м по керну) вскрыты как в пилотном, так и в горизонтальных стволах. Закономерной приуроченности к определенному стратиграфическому положению не установлено, что, вероятно, связано с непрерывным и многократным отложением прослоев тяжелых минералов на разных этапах формирования толщи.

Геохимическая аномалия в интервале палео-ВНК (гипотеза) выявлена в скважине XX08 (рис. 3, цифра 6) и характеризуется экстремальным повышением концентраций Mg, Fe, S, Zn, Ni и Ti на фоне минимальных значений Ca, Mn, Al, K, Si. Распределение этих элементов может

Выделяемый интервал	Ключевые химические элементы	Вероятные причины изменений элементного состава	Рекомендации по сопровождению бурения
Коллектор с нормальной радиоактивностью	↓ Al, Zn, Ni, Fe и др. металлы ↑ Si	Снижение объема глинистого материала: низкие содержания Al, Zn, Ni, Fe	Штатная ситуация: целевой интервал, нет необходимости корректировки траектории скважины
Коллектор с повышенной радиоактивностью	↑ Zr, Th, P, Ti, K ↓ Al, Zn, Ni, Fe и др. металлы ↑ Si	Накопление тяжелых минералов–носителей радиоактивных элементов	
Неколлектор (глинистые прослои)	↑ Al, Zn, Ni, Fe и др. металлы ↓ Si	Увеличение объема глинистого материала: высокие содержания Zn, Ni, Fe	Штатная ситуация: резких изменений траектории не требуется
Палео-ВНК (гипотеза)	↑ Mg, Fe, S, Zn, Ni ↑ Ti ↓ Ca, Mn, Al, K, Si	Анаэробная биodeградация нефти на контакте с водой	
Плотные карбонатизированные интервалы	↑ Ca, Mn, Sr	Вторичные преобразования	
Техногенное загрязнение буровым раствором	↑ Ca, Sr	Техногенный фактор: фиксация компонентов бурового раствора	

Табл. 2. Геохимические индикаторы РФА для выделения коллекторов с нормальной и повышенной радиоактивностью и неколлекторов (глинистых и плотных карбонатизированных разностей), возможных зон палео-ВНК и техногенного карбонатного загрязнения

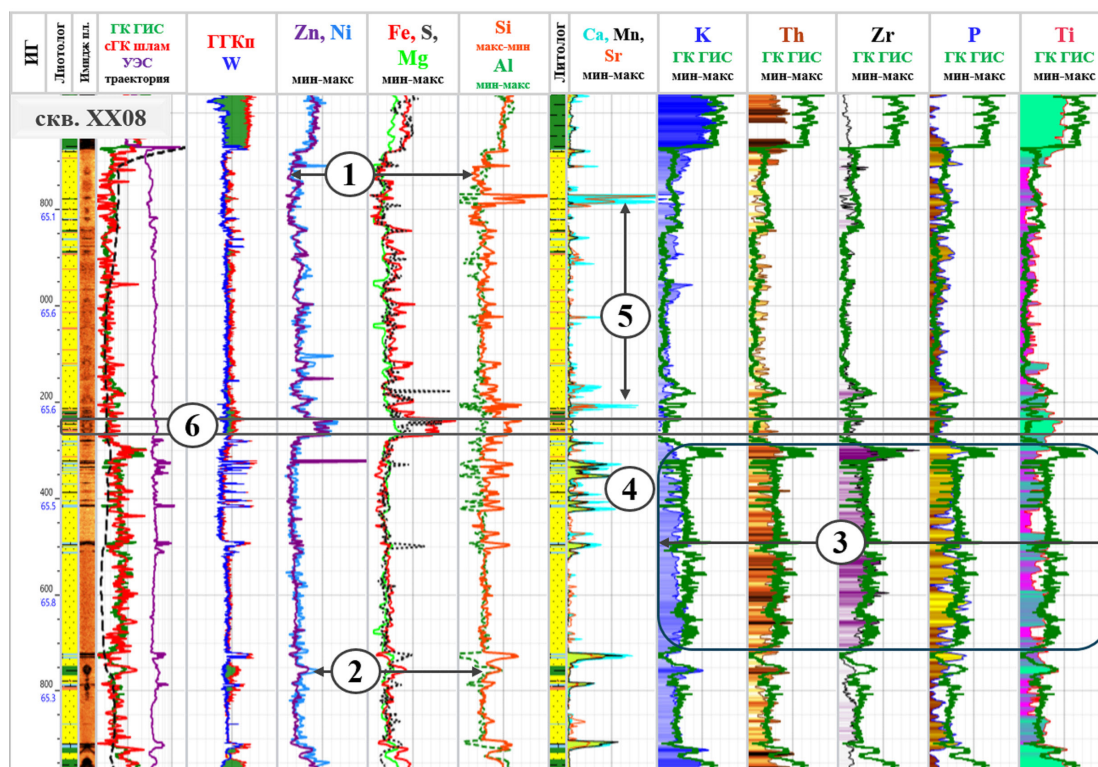


Рис. 3. Пример выделения литотипов по данным РФА шлама в процессе бурения горизонтальной скважины с полным комплексом КВБ. Цифрами обозначены: 1 – коллектор; 2 – неколлектор; 3 – коллектор с повышенной радиоактивностью; 4 – плотные карбонатизированные интервалы; 5 – техногенные карбонаты; 6 – вероятно, палео-ВНК

указывать на существование единой локальной геохимической аномалии, приуроченной к узкой физико-химической границе раздела. Мощность пропластка составляет около 10 см по вертикали, что соответствует интервалу проходки 40 м по горизонтальному стволу скважины. По данным ГИС этот интервал характеризуется повышением плотности и водородосодержания с формированием кроссовера, типичного для глин, а также ростом сопротивления при низких значениях ГК. Визуальное исследование шлама при этом указывает на песчаник с темными вкраплениями.

Установленная аномалия может отражать наличие сложного сульфидно-карбонатного комплекса в сочетании с остаточными битумами, обуславливающими специфическую текстуру песчаника (Мухаметшин, Галеев, 2014). Предполагается, что на границе палео-ВНК в результате бактериальной сульфатредукции произошло изменение pH среды, что повлекло частичное растворение кварца (снижение содержания Si) и высвобождение из нефти Ni и Zn (Сахибгареев, 1989). Поступающие из пластовых вод Fe и Mg совместно с биогенным сероводородом

могли участвовать в формировании микросульфидов – пирита (FeS_2) и сфалерита (ZnS) (Rozanova et al., 2001). Одновременно в поровом пространстве могло происходить осаждение остаточных битумов и Ti (вероятно, в виде аутигенного рутила). Выявленная аномалия, возможно, указывает на расформирование первоначальной нефтяной залежи под воздействием вторичной миграции газа и согласуется с представлениями о стадийности формирования залежей в Западной Сибири (Сахибгареев, 1989; Скоробогатов и др., 2003).

Плотные карбонатизированные интервалы (неколлекторы) природного происхождения характеризуются одновременным повышением содержаний Ca, Mn и Sr (рис. 3, цифра 4). Совместное увеличение концентраций этих элементов устойчиво фиксируется в интервалах развития плотных пород по данным ГИС. Одновременное накопление Ca–Mn–Sr может указывать на постседиментационные преобразования пород под воздействием гидротермальных растворов. Процесс, вероятно, был обусловлен вторичным минералообразованием, при котором ионы марганца (Mn^{2+}) и стронция (Sr^{2+}) изоморфно включались в кристаллическую решетку кальцита при осаждении карбонатного цемента. Предположительно, путями миграции таких флюидов служили первично высокопроницаемые песчаники. В дальнейшем фильтрация глубинных растворов (Cui et al., 2025), обогащенных Ca, Mn и Sr, привела к интенсивной цементации, что превратило наиболее проводящие зоны коллектора в плотные непроницаемые разности. Следовательно, геохимическая ассоциация Ca–Mn–Sr может служить признаком интенсивной карбонатизации в интервалах изначально наилучших коллекторов.

Техногенное карбонатное загрязнение бурового шлама идентифицировано по аномальному накоплению микрокальцита (мраморной крошки) из бурового раствора. В отличие от природных карбонатизированных пород, эти интервалы характеризуются совместным повышением Ca и Sr при фоновых содержаниях Mn (рис. 3, цифра 5). Техногенная природа аномалий подтверждена данными КВБ, фиксирующими отсутствие плотных прослоев. Дифференциация природной карбонатизации (ассоциация Ca–Mn–Sr) и техногенного загрязнения шлама мраморной крошкой (ассоциация Ca–Sr) обоснована фактическим составом кольматанта. Для этого были изучены концентрации Ca, Mn и Sr в обоих типах карбонатного материала, а также в шламе, загрязненном буровым раствором (табл. 3).

Как следует из табл. 3, элементный состав сухого порошка (компонента бурового раствора) обусловлен его генезисом: мраморный утяжелитель помимо Ca обогащен Sr, так как данный элемент изоморфно накапливался в раковинах древних морских организмов, из которых в ходе последующего метаморфизма сформировался мрамор.

Низкое содержание Mn в карбонатном кольматанте бурового раствора обусловлено следующими факторами.

- Седиментологический: исходный карбонатный материал формировался в насыщенной кислородом морской среде. Морские организмы формировали раковины из CaCO_3 , захватывая в Sr^{2+} , но не Mn^{4+} , который в окислительной обстановке осаждался в виде нерастворимых оксидов.

- Технологический: во избежание ухудшения реологических свойств раствора для бурения отбираются чистые разновидности мраморной крошки. Анализ исходного сухого порошка подтверждает высокую степень очистки: базовое содержание Mn составляет 0,005% (лишь изредка достигая 0,036% за счет единичных природных флуктуаций).

Снижение концентрации Ca с 41% в исходном порошке до 25% в загрязненном шламе обусловлено его разбавлением компонентами пород. Напротив, содержание стронция возрастает с 0,421 % до 0,77 %. Противоположный тренд указывает на привнос Sr из дополнительного источника – либо из баритового концентрата раствора (в виде изоморфной примеси) либо из сопутствующего карбонатного цемента вмещающей толщи. Незначительное повышение концентрации Mn до 0,05 % в загрязненном шламе также обусловлено примесью вмещающих пород. Магнитная сепарация фракции 0,3–1,0 мм исключает влияние износа инструмента, поэтому прирост марганца связан с микрошламом. Его ультрадисперсная составляющая (глинисто-карбонатный матрикс) проходит сквозь вибросита, концентрируется в растворе и сорбируется на поверхности крупных частиц шлама.

Характерно, что в природных карбонатизированных плотных прослоях фиксируется устойчивая ассоциация Ca–Mn–Sr со средним содержанием Mn на уровне 0,64%, что на порядок выше фоновых значений в растворе. Таким образом, пограничные концентрации Mn (0,05%) в шламе носят смешанный природно-технологический характер, обусловленный процессом бурения. Это позволяет дифференцировать природную карбонатизацию от техногенного загрязнения (при содержании Mn в диапазоне 0,005–0,05%).

Типизация глин (кровельных, подошвенных и внутрипластовых) по элементному составу

На основе многолетних исследований минералогического состава кернового материала из 26 скважин ачимовских отложений Уренгойского НГКМ установлены различия в составе глин разного генезиса. Внутрипластовые глины по данным PCA характеризуются преимущественно хлоритовым составом, тогда как перекрывающие и подстилающие – гидрослюдисто-хлоритовым (табл. 4).

Источник карбонатного вещества	Средние значения концентраций элементов, %		
	Ca	Mn	Sr
Компонент бурового раствора (сухой порошок/мраморная крошка)	41,461	0,005 (max-0,036)	0,421
Загрязненный буровым раствором шлам	25,74	0,05	0,77
карбонатизированные плотные интервалы (цемент)	13,945	0,640	0,163

Табл. 3. Средние содержания концентрация Ca–Mn–Sr в буровом шламе и карбонатизированных плотных пропластках

В пяти скважинах выполнен литохимический анализ керн с применением портативного РФА-спектрометра. Это позволило выявить изменения концентраций и соотношений индикаторных элементов, характерные для различных минералогических типов глин. Ниже рассмотрены геохимические особенности каждого типа глин в связи с их минералогическим составом и условиями осадконакопления, а также представлена сводная таблица разработанных геохимических индикаторов РФА для расчленения кровельных, подошвенных и внутрипластовых глин (табл. 5).

Кровельные и подстилающие глины (флюидоупоры) по данным PCA керн имеют гидрослюдисто-хлоритовый состав с подчиненным количеством смешанно-слоистых образований (ССО) и каолинита. Это отражается в элементном составе: в значительном росте концентраций Rb, Zn, K, Fe, Mg, увеличении отношения Ti/Zr на фоне снижения Si/Al. В ряде скважин выявлены различия в содержании серы S в кровельной и подошвенной глинах (рис. 4).

В геохимии Rb тесно связан с K из-за одинакового заряда (1+) и близких ионных радиусов, благодаря чему он изоморфно замещает калий и фиксируется в кристаллической

решетке иллита (Юдович, Кетрис, 2011). При этом K и Rb не способны входить в структуру хлорита и каолинита, а в ССО могут фиксироваться лишь частично (Дриц, Коссовская, 1991). Следовательно, их ассоциация указывает на преобладание иллитовой (гидрослюдистой) фазы в кровельных и подошвенных глинах, что согласуется с данными PCA керн. Увеличение содержаний Fe и Mg не является ключевым для литогеохимического расчленения глинистых пачек разного генезиса, тем не менее фиксация их в глинах-флюидоупорах была необходима для верификации метода РФА. Одновременное увеличение содержаний этих элементов отражает присутствие в рассматриваемых глинах хлорита, предположительно, магнезиально-железистого состава, что находит подтверждение в данных рентгеноструктурного анализа.

Повышение концентраций Zn в трансгрессивных глинах может быть связано со следующими факторами.

1. Сорбция в процессе осадконакопления: отрицательно заряженная поверхность глинистых минералов при длительном контакте с придонной водой сорбировала цинк – преимущественно на смектите (включая монтмориллонит) и хлорите (Schlegel et al., 2001; Ладонин, 2003).

Тип глин	Хлорит, %	Гидрослюда, %	Каолинит, %	ССО, %
Кровельные и подошвенные	40	45	1	14
Внутрипластовые	76	12	6	4

Табл. 4. Средний минеральный состав глинистой фракции ачимовских отложений Уренгойского НГКМ (по данным PCA)

Выделяемый интервал	Ключевые химические элементы	Вероятные причины изменений элементного состава	Рекомендации по сопровождению бурения
Кровельные и подошвенные глины	↑ K, Rb значительное превышение фона	• преимущественно гидрослюдистый состав	Критическая ситуация: выход из целевого интервала Требуется корректировка траектории: при повторе индикаторов в 5-10 пробах подряд (проходка ≥ 5 м) Направление корректировки определять по локальным особенностям S в кровле и подошве
	↑ Ti/Zr значительное превышение фона	• удаленность от берега; • низкое содержание тяжелых минералов; • Ti в составе глин.	
	↓ Si/Al значительное падение относительно фона	• увеличением доли глинистых минералов; • Al в составе глин.	
	↑ Zn, ↑ S значительное превышение фона	• восстановительные условия; • Zn в виде сульфидов;	
	↑ Zn значительное превышение фона ↓ S значительное падение относительно фона	• среда насыщена кислородом; • длительная сорбция Zn гидрослюдой	
Внутрипластовые глины	↑ K умеренное превышение фона	• снижение доли гидрослюды.	Штатная ситуация: глинистая перемычка внутри пласта Резких изменений траектории не требуется
	↑ Rb, Zn умеренное превышение фона	• высокая скорость седиментации, сорбция ограничена.	
	↑ Ti/Zr умеренное превышение фона	• приближение источника сноса	
	↓ Si/Al умеренное снижение относительно фона	• приближение источника сноса	
	↑ Zn, умеренное превышение фона ↓ S значительное падение относительно фона	• среда насыщена кислородом; • высокая скорость седиментации, сорбция ограничена.	

Табл. 5. Геохимические индикаторы РФА для расчленения кровельных, подошвенных и внутрипластовых глин

2. Постседиментационные процессы: по мере дигенетических и катагенетических преобразований происходила трансформация глинистого вещества с формированием вторичных минералов (Япаскурт, 2008). Сорбционная способность глин зависела от их минерального состава: ССО и хлорит сорбировали Zn интенсивнее, чем гидрослюда и каолинит с жесткой ненабухающей структурой (Дриц, Коссовская, 1991).

3. Восстановительные условия (сероводородное заражение): морские трансгрессии в глубоководных зонах могли сопровождаться дефицитом кислорода. В такой аконсидной обстановке сульфатредуцирующие бактерии выделяли сероводород (H_2S), связывавший Zn в сульфиды – сфалерит (ZnS) и изоморфную примесь в аутигенном пирите. Пики Zn и S служат индикаторами аноксии бассейна и могут использоваться в качестве реперов для уточнения корреляции клиноформных отложений ачимовской толщи (Деркачев и др., 2007).

Рост соотношения Ti/Zr в кровельных и подошвенных глинах отражает увеличение удаленности от источника сноса, что обусловлено разной гидравлической крупностью минералов-носителей (Юдович, Кетрис, 2011). Тяжелый и прочный циркон ($ZrSiO_4$) с крупными кристаллами накапливается в прибрежной (проксимальной) зоне. При трансгрессиях он осаждался, не доходя до удаленных зон седиментации, из-за чего его концентрация в дистальном осадке резко снижалась (Panchenko et al., 2021). В отличие от циркония, титан может присутствовать как в составе тяжелых минералов, так и в форме изоморфных примесей в тонкодисперсной пелитовой фракции. В результате этого содержание Ti в кровельных и подошвенных глинах увеличивалось относительно Zr, что вело к росту соотношения Ti/Zr (Юдович, Кетрис, 2011).

Уменьшение соотношения Si/Al обусловлено увеличением доли высокоглиноземистых глинистых минералов и соответствующим ростом концентрации алюминия на фоне снижения содержания мелкообломочного кварца (Юдович, Кетрис, 2011; Маслов, 2005).

Выявлено, что содержание серы (S) в кровельных и подошвенных глинах может резко различаться: например,

кровельные глины характеризуются интенсивным накоплением S (рис. 4, цифра 1), а подошвенные – снижением ее концентрации (рис. 4, цифра 2). В таком случае содержание серы становится ключевым маркером для литогеохимического расчленения кровельных и подошвенных глин. При этом концентрация S латерально изменчива по площади пласта: в разных скважинах кровельные глины могут демонстрировать как высокие, так и низкие значения. Это обусловлено площадными вариациями окислительно-восстановительного потенциала среды и содержания органического вещества, контролировавших интенсивность сульфатредукции (Юдович, Кетрис, 2011). Поэтому при вскрытии как кровли, так и подошвы пласта рекомендуется фиксировать особенности распределения S по данным РФА шлама для накопления статистики и последующего использования локальных геохимических характеристик при геонавигации.

Генетическая природа установленных литохимических аномалий напрямую связана с палеогеографическими условиями осадконакопления ачимовской толщи. Так, кровельные и подошвенные глины (рис. 4, цифры 1 и 3) формировались в периоды максимальных морских трансгрессий (Конторович и др., 2014), когда береговая линия удалялась, а терригенный снос с суши был минимальным. В глубоководные части бассейна поступал только тонкодисперсный материал, что привело к накоплению глин, обогащенных гидрослюдами (иллитом).

Внутрипластовые глины отличаются от кровельных пачек умеренным ростом концентраций Rb, Zn, K, Fe, Mg и отношения Ti/Zr на фоне снижения Si/Al. Снижение содержания K обусловлено изменением минерального состава – переходом к преимущественно хлоритовому составу, в кристаллической структуре которого этот элемент отсутствует. Одновременное повышение на этом фоне Fe и Mg с высокой степенью вероятности указывает на доминирование этой минеральной фазы, что согласуется с данными РСА керна, зафиксировавшими хлорит-гидрослюдистую ассоциацию с подчиненным количеством смешаннослойных образований и каолинита.

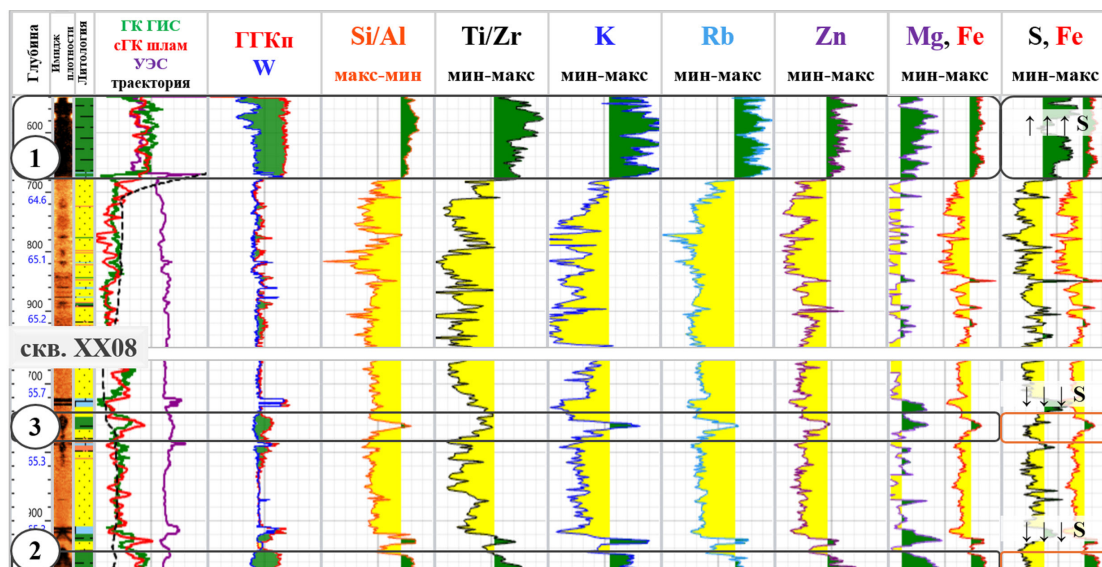


Рис. 4. Пример выделения разных типов глин по данным РФА шлама в скв. XX08. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – кровельная глина с высоким содержанием серы; 2 – подошвенная глина с низким содержанием серы; 3 – внутрипластовая глина

Из-за относительно высокой скорости седиментации и постоянного привноса обломочного материала пелитовая фракция не успевала сорбировать микроэлементы из морской воды, что обусловило лишь незначительный рост концентраций Rb и Zn. Привнос терригенного материала также обеспечил менее контрастное изменение Ti/Zr и Si/Al относительно песчаных коллекторов. Содержание серы (S) во внутрипластовых глинах характеризуется стабильно низкими значениями, что в сочетании с другими индикаторами позволяет выделять их в качестве внутрипластовых перемычек.

Особенности элементного состава этих глин обусловлены кратковременными флуктуациями уровня моря, что предопределило их отличие от флюидоупоров кровли и подошвы (рис. 4, цифра 3).

Корреляция внутри глинистых перемычек (флюидоупоров). Кровельные и подошвенные глины (рис. 5, цифра 1) могут включать прослои с резко отличающимся элементным составом (рис. 5, цифра 3). При этом по данным ГИС они характеризуются схожими показаниями плотностного и нейтронного каротажа при минимальных различиях ГК, из-за чего интерпретируются как единая глинистая пачка.

Элементный состав глинистого интервала, отмеченного на рис. 5 (цифра 1), соответствует характеристикам кровельных и подошвенных глин, подробно описанным в предыдущем подразделе. Элементный состав интервала, представленного на рис. 5 (цифра 3), имеет существенные отличия: отношение Si/Al занимает промежуточное положение между вмещающими глинами (кровельными, подошвенными) и песчаными коллекторами. Рост Si/Al на фоне падения концентраций K с высокой степенью вероятности указывает на сокращение доли алюмосиликатов (что может быть обусловлено как уменьшением содержания калиевых полевых шпатов, так и сменой минерального состава глин – снижением доли гидрослюд). Сопутствующее увеличение содержания кварца в совокупности характерно для увеличения доли алевролита (Юдович, Кетрис, 2011). Снижение содержаний Rb, Zn и отношения Ti/Zr также подтверждает уменьшение доли глинистой составляющей при переходе к алевролиту (Юдович, Кетрис, 2011). По данным РФА шлама, аутигенные процессы в этом интервале предположительно представлены карбонатизацией (небольшой рост Ca, Sr,

Mn), пиритизацией (увеличение Fe и S) и сидеритизацией (увеличение Fe и Ca) пород (Сахибгареев, 1989; Юдович, Кетрис, 2011). Из-за высокого сечения захвата тепловых нейтронов Fe в составе этих тяжелых минералов возникает ложное завышение водородосодержания и плотности. Это ведет к ошибочной интерпретации интервала как глин по ГИС, хотя геохимически разность классифицируется как карбонатизированный алевролит.

Применение принципов хемотратиграфии, базирующейся на фундаментальных геохимических подходах (Юдович, Кетрис, 2011), позволило выявить скрытые литогеохимические маркеры внутри монотонных глинистых флюидоупоров разреза.

Апробация методики интерпретации данных РФА шлама в условиях бурения горизонтальных скважин с ограниченным комплексом КВБ

Апробация методики интерпретации данных РФА шлама и практическая значимость применения технологии при бурении с минимальным комплексом ГИС подтверждены в процессе геонавигации скважины XX02, горизонтальный ствол которой был охарактеризован только методом гамма-каротажа. При проводке горизонтального участка скважины с использованием винтового забойного двигателя (ВЗД) был зафиксирован вход в интервал с аномально высокими показаниями ГК (рис. 6, цифра 2), однако установленные ранее геохимические закономерности позволили оперативно обосновать продолжение бурения в данном интервале: низкие содержания элементов глинистости (Zn, Fe, Ni) являлись индикаторами нахождения горизонтального ствола в коллекторе; повышение показаний ГК контролировалось преимущественно ростом концентрации тория (Th), а также увеличением доли акцессорных минералов – носителей Zr, Р и Ti.

В процессе дальнейшей проводки из-за невозможности контроля траектории с ВЗД компоновка низа буровой колонны (КНБК) была заменена на роторно-управляемую систему (РУС), что также позволило записать полный комплекс КВБ (рис. 6, цифра 3). Данные КВБ подтвердили, что пройденный ранее радиоактивный интервал представлен коллектором. Таким образом, было еще раз подтверждено, что природа аномалии ГК связана не с повышенной глинизацией пород или входом в неколлектор, а с повышенной концентрацией тяжелых минералов

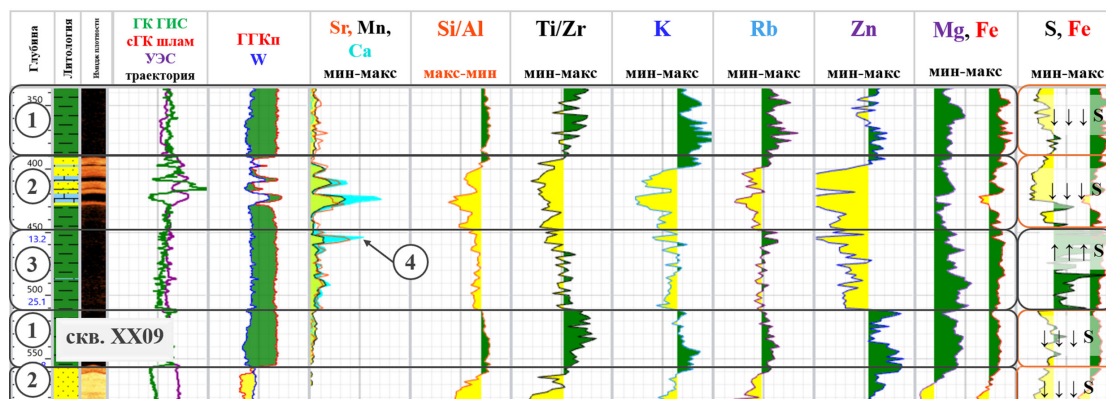


Рис. 5. Пример выделения глин разного состава в пределах глин-флюидоупоров. Цифрами обозначены: 1 – интервалы глин с характерным элементным составом кровельных и подошвенных глин; 2 – интервалы коллекторов; 3 – предположительно, плотный глинистый алевролит; 4 – техногенные карбонаты

– носителей радиоактивных элементов. Это подтверждает прикладную ценность интерпретации данных РФА шлама при сопровождении горизонтального бурения в условиях минимального комплекса ГИС.

После достижения глубины 5135 м по стволу скважины исследования РФА шлама по инициативе заказчика были остановлены, и дальнейшая геонавигация осуществлялась исключительно по данным полного комплекса КВБ. При бурении ниже указанной отметки отмечено резкое повышение показаний гамма-каротажа (ГК), превысившее значения в ранее встреченном интервале и достигшее уровня ГК кровельных глин (рис. 6, цифра 4). Согласно интерпретации данных полного комплекса КВБ, данный интервал идентифицируется как коллектор, что указывает на дальнейшее увеличение содержания тяжелой фракции с повышенной радиоактивностью в разрезе. Данный вывод полностью согласуется с обоснованной выше природой естественной радиоактивности отложений, установленной по данным РФА шлама.

Обсуждение результатов

Разделение коллекторов и неколлекторов

по элементному составу

Разработанный подход к экспресс-выделению петрофизических типов базируется на классических хемотратиграфических подходах (Юдович, Кетрис, 2011; Pearce et al., 1999; Ratcliffe et al., 2015). В отличие от классических моделей, ориентированных в основном на макрокомпоненты Si и Al, для ачимовских отложений Уренгойского НГКМ доказана диагностическая ценность расширенного комплекса элементов. Ключевую роль в дифференциации

разреза играют микроэлементы Zn, Ni, Fe, элементы акцессорной тяжелой фракции (Th, Zr, P, Ti, K) и индикаторы карбонатизации (Ca, Mn, Sr).

Важное научное значение имеет инверсия показаний ГК в радиоактивных песчаниках. При геонавигации с минимальным комплексом ГИС (только ГК) в терригенных разрезах Западной Сибири рост естественной радиоактивности стандартно интерпретируется как вход в глинистый неколлектор. РФА шлама позволяет оперативно определить природу аномалии: сопряженный рост концентраций Th, Zr, P и Ti при низких содержаниях Al, Zn, Ni, Fe указывает на локальное накопление тяжелой фракции акцессорных минералов (монацита, циркона, апатита) в высокодинамичных условиях седиментации коллекторов. Этот вывод согласуется с концепцией стратиграфии тяжелых минералов (Svendsen, Hartley, 2002).

Отдельную задачу представляет оперативное выявление плотных карбонатизированных прослоев от техногенного загрязнения шлама мраморной крошкой из бурового раствора. Критерием их дифференциации выступает поведение Mn. Синхронное накопление Ca–Mn–Sr со средним содержанием Mn около 0,64% маркирует природную аутигенную цементацию. Это не противоречит исследованиям (Cui et al., 2025) о постседиментационном преобразовании проницаемых песчаников под воздействием глубинных гидротермальных флюидов, где ионы Mn^{2+} и Sr^{2+} могут изоморфно замещать Ca^{2+} в структуре кальцита. Напротив, при техногенном загрязнении содержание Mn находится в пределах фона (0,005–0,05%), что обусловлено чистотой исходного сырья (белого мрамора) и технологическим контролем качества коьматанта.

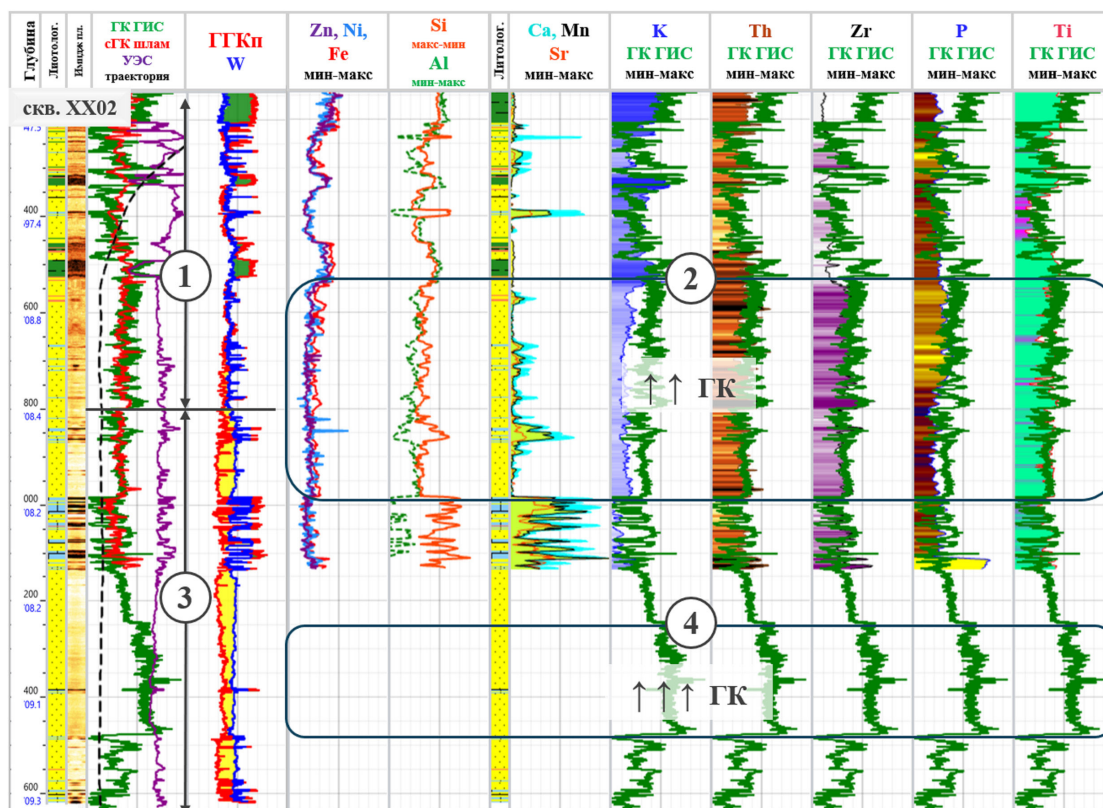


Рис. 6. Пример выделения литотипов по данным РФА шлама в процессе бурения горизонтальной скважины с ГК. Цифрами отмечены: 1 – интервал бурения с ВЗД и запись только ГК; 2 – интервал коллектора с повышенной радиоактивностью; 3 – интервал бурения с РУС и полным комплексом КВБ; 4 – интервал коллектора с радиоактивностью сопоставимой с кровельными глинами

Типизация глин (кровельных, подошвенных и внутрипластовых) по элементному составу

При геонавигации стандартный комплекс КВБ не различает генетически разные типы глин вследствие сходства их геофизических характеристик. Комплексование каротажа с экспресс-анализом РФА шлама обеспечивает их расчленение за счет выявленной связи между элементным и минеральным составом отложений.

Выраженный рост концентраций калия (K) и рубидия (Rb) в кровельных и подошвенных глинах объясняется кристаллохимическими особенностями слоистых силикатов. Согласно литохимическим исследованиям (Юдович, Кетрис, 2011; Дриц, Коссовская, 1991), ион Rb^+ , обладая близким к K^+ радиусом и аналогичным зарядом, изоморфно замещает его и фиксируется в межпакетных пространствах кристаллической решетки иллита. Хлорит и каолинит лишены этой связи. Ассоциация K–Rb служит признаком преобладания иллита (гидрослюды), что подтверждается данными РСА керн: доля гидрослюды в кровельных и подошвенных глинах достигает 45% против 12% во внутрипластовых разностях.

Природа установленных литохимических различий связана с палеогеографической динамикой бассейна седиментации. Кровельные и подошвенные пачки формировались в эпохи максимальных трансгрессий (Конторович и др., 2014), характеризующиеся удалением береговой линии, дефицитом терригенного сноса и доминированием пелитовой седиментации в дистальных зонах. В пользу этой модели свидетельствует рост параметра Ti/Zr на фоне падения Si/Al . Разнонаправленный тренд обусловлен тем, что крупные гидравлически стабильные кристаллы циркона ($ZrSiO_4$) осаждались в проксимальной зоне, не достигая удаленных участков бассейна, тогда как титан (Ti) доносился дальше в составе тонкодисперсного глинистого матрикса (Panchenko et al., 2021).

Накопление Zn и S в кровельных трансгрессивных глинах связано со спецификой режима застойных глубоководных зон. Из-за замедления седиментации пелитовая фракция долго контактировала с придонной водой, сорбируя растворенный Zn (Ладонин, 2003; Schlegel et al., 2001). В условиях анокии сульфатредукция фиксировала Zn) и Fe в форме аутигенных сульфидов – сфалерита (ZnS) и пирита (FeS_2) (Деркачев и др., 2007). Пространственная изменчивость концентраций S отражает неравномерность распределения окислительно-восстановительной обстановки в палеобассейне. Это не позволяет применять единые пороговые значения элемента и требует учета локальных геохимических трендов.

Изменение элементного состава внутрипластовых глин по сравнению с вмещающими коллекторами менее выражено, чем у глин флюидоупоров. Переход к преимущественно хлоритовому составу (до 76% по данным РСА керн) стирает калий-рубидиевую аномалию, а рост Fe и Mg отражает магнезиально-железистую специфику аутигенного хлорита. Умеренные значения отношений Ti/Zr , Si/Al и низкий фон серы доказывают, что данные перемиčky формировались в условиях высокой скорости седиментации, активного привноса терригенного материала и аэрации бассейна.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оперативной привязки

траектории ствола скважины к геологическому разрезу при бурении как с полным, так и с ограниченным комплексом КВБ. Идентификация типа глин на забое позволяет службе геонавигации оперативно корректировать траекторию скважины при входе в глинистый неколлектор, что снижает неэффективную проходку и риски зарезки боковых стволов.

Границы применимости технологии РФА шлама при геонавигации

Широкое внедрение метода в практику бурения горизонтальных скважин ограничено следующими факторами.

1. Геологические особенности объектов: выявленные связи между элементным составом, минералогией и литологией характеризуют особенности ачимовских отложений Уренгойского НГКМ. Перенос индикаторов на другие пласты и месторождения требует дополнительной калибровки.

2. Временные задержки: экспресс-анализ бурового шлама характеризуется неизбежными временными задержками получения результатов по сравнению с данными КВБ (выноса материала с забоя на поверхность составляет около 40 мин, его пробоподготовка и проведение измерений – 15–20 мин). Данное обстоятельство обязывает контролировать скорость бурения (не более 10–15 м/ч), что позволяет получать геохимическую информацию с минимальным отставанием по глубине от текущего забоя.

3. Качество пробоподготовки: достоверность данных зависит от очистки шлама от бурового раствора и металлической стружки (результата износа долота и КНБК).

4. Гомогенизация материала: фракционная неоднородность влияет на точность измерений. Компенсация этого эффекта требует истирания пробы до порошкообразного состояния и прессования, что повышает трудоемкость полевых работ.

Направления дальнейших исследований

Развитие предложенного подхода предполагает проведение исследований по следующим направлениям:

1. Расширение геохимической базы данных: сбор и анализ данных РФА по новым скважинам для верификации и оценки устойчивости геохимических индикаторов на других участках и месторождениях-аналогах;

2. Оценка возможности посадки эксплуатационной колонны (ЭК) по данным РФА шлама: выделение устойчивых глин между транзитным горизонтом со сниженным пластовым давлением и целевым пластом. Идентификация типа глины позволяет исключить посадку ЭК во внутрипластовые глины транзитного пласта, что уменьшит риски гидроразрывов, поглощений раствора и прихватов инструмента.

Заключение

В рамках проведенного исследования были адаптированы фундаментальные литохимические закономерности, разработанные в классических отечественных трудах (Юдович, Кетрис, 2000, 2011), а также подходы, представленные в зарубежных исследованиях, применительно к оперативным задачам геонавигации в разрезе ачимовской толщи Уренгойского НГКМ. Разработана,

обоснована и внедрена в практику методика оперативной интерпретации данных РФА шлама, учитывающая особенности элементного состава ачимовских отложений. Данный подход доказал свою эффективность при бурении как с полным, так и с минимальным комплексом каротажа во время бурения, обеспечив пространственное позиционирование ствола горизонтальных скважин, возможность оценки емкостных свойств пород (в условиях отсутствия полного комплекса КВБ) и минимизацию неэффективной проходки.

Несмотря на высокую эффективность метода, его повсеместное внедрение не всегда целесообразно. Даже для ачимовских отложений Уренгойского НГКМ применение технологии требуется далеко не во всех скважинах. Внедрение данного метода должно быть экономически и технологически обоснованным, что обуславливает необходимость выработки строгих критериев для выбора скважин-кандидатов. В их числе, например, скважины, бурящиеся в краевой присклоновой части ачимовского конуса выноса, траектории которых по сейсмическому прогнозу выходят в зону резкого сокращения эффективных толщин, скважины, бурящиеся в зонах с высокой неоднородностью толщин глинистых перемишек, а также скважины с ограниченным комплексом ГИС.

Каждый геологический объект уникален, что выражается, в частности, в специфическом, свойственном только ему элементном составе пород. Следовательно, подходы к интерпретации данных РФА и задачи, решаемые с помощью предложенной технологии на одном месторождении или пласте, могут не подходить для другого. Успех внедрения технологии определяется не только правильным выбором объекта исследования и критериев подбора скважин, но и качеством организации самого производственного процесса (высокой культуры отбора шлама и соблюдения регламента многоэтапной пробоподготовки).

Благодарности

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

Литература

- Держачев А.Н., Николаева Н.А., Можеровский А.В., Григорьева Т.Н., Иванова Е.Д., Плетнев С.П., Баринев Н.Н., Чубаров В.М. (2007). Минералогические и геохимические показатели условий аноксигенного осадконакопления в локальных впадинах Охотского моря в позднем плейстоцене – голоцене. *Тихоокеанская геология*, 26(3), с. 3–33.
- Дриц В.А., Коссовская А.Г. (1991). Глинистые минералы: слюды, хлориты. М.: Наука, 176 с.
- Каулина Т.В., Лялина Л.М., Ильченко В.Л. (2019). Последовательность образования REE-Th-U минералов в Лицевском урановорудном районе Кольского региона. *Вестник МГТУ*, 22(1), с. 12–22. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-12-22>
- Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Никитенко Б.Л., Попова Н.И., Шуртыгин Б.Н. (2014). Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде. *Геология и геофизика*, 55(5–6), с. 745–776. <https://doi.org/10.15372/GiG20140504>
- Куликов П. Ю., Панченко И.В., Гарипов Р.А. (2023). Применение портативных XRF анализаторов (химический состав пород) для расчета минерально-компонентной модели черных сланцев.
- Ладонин Д.В. (2003). Влияние железистых и глинистых минералов на сорбцию меди, цинка, свинца и кадмия в узловом горизонте дерново-подзолистой почвы. *Почвоведение*, 36(10), с. 1065–1073.
- Маслов А.В. (2005). Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 289 с.

- Мухаметшин Р.З., Галеев А.А. (2014). Диагностика древних водо-нефтяных контактов инструментальными методами. *Нефтяное хозяйство*, 10, с. 28–33.
- Сахибгареев Р.С. (1989). Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Ленинград: Недра, 260 с.
- Скоробогатов В.А., Строганов Л.В., Копеев В.Д. (2003). Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 352 с.
- Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Ян П.А. (2023). Особенности использования литогеохимических индикаторов с целью реконструкции палеоклимата и состава источников сноса в Западно-Сибирском позднелюрско-нижнемеловом осадочном бассейне. *Литология и полезные ископаемые*, 6, с. 588–599. <https://doi.org/10.31857/S0024497X2370026X>
- 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.
- Яласкурт О.В. (2008). Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 356 с.
- Bhatia M.R. (1983). Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6), pp. 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- Cui H., Zhu S., Gao Y., Chen W. (2025). Hydrothermal activity near the Permian–Triassic transition in the south-western Ordos Basin, China: Evidence from carbonate cementation in Upper Permian sandstones. *Sedimentology*, 72(1), 227–257. <https://doi.org/10.1111/sed.13232>
- Eder V.G., Ryzhkova S.V., Kostyreva E.A. et al. (2020). Lithologic, geochemical and geophysical characteristics of the boundary strata of the Bazhenov and Kulomza horizons (Lower Cretaceous base) in the central regions of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 61(7), pp. 767–782. <https://doi.org/10.15372/RGG2019124>
- Eder V.G., Ryzhkova S.V., Dzyuba O.S., Zamirailova A.G. et al. (2022). Lithostratigraphy and sedimentation conditions of the Bazhenov Formation (Western Siberia) in the central, southeastern, and northern regions of its occurrence. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 30(5), pp. 334–359. <https://doi.org/10.1134/S0869593822050021>
- Ellis D.V. (1987). Well Logging for Earth Scientists. New York: Elsevier, 532 p. ISBN 0-444-01180-3.
- Lemière B. (2018). A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2018.02.006>
- Panchenko I. V., Kulikov P. Yu., Garipov R. A. (2021). Practical application of chemostratigraphy and lithochemistry methods in the study of oil bearing black shale. *EAGE/SPE Workshop on Shale Science 2021*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202151034>
- Pearce T. J., Besly B. M., Wray D. S., Wright D. K. (1999). Chemostratigraphy: A method to improve interwell correlation in barren sequences – a case study using onshore Duckmantian/Stephanian sequences (West Midlands, U.K.). *Sedimentary Geology*, 124(1–4), pp. 197–220. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00128-6)
- Potts P.J., West M. (Eds.) (2008). Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for In Situ Analysis. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 291 p. <https://doi.org/10.1039/9781847558640>
- Pozzi A., Casal F. (2018). Advanced surface logging technology for unconventional plays: Well-site applications in tight reservoirs. *First Break*, 36(7), 57–66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0106>
- Prundeanu I., Chelariu C., Contreras Perez D. (2021). Elemental geochemistry of the Upper Cretaceous reservoir and surrounding formations applied in geosteering of horizontal wells, Lebăda Field – Western Black Sea. *Oil, Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 76, 1. <https://doi.org/10.2516/ogst/2020083>
- Ratcliffe K.T., Wilson A., Payenberg T., Rittersbacher A., Hildred G.V., Flint S.S. (2015). Ground truthing chemostratigraphic correlations in fluvial systems. *AAPG Bulletin*, 99(1), 155–180. <https://doi.org/10.1306/06051413120>
- Roser B.P., Korsch R.J. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1–2), pp. 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Rozanova E. P., Tourova T. P., Kolganova T. V., Lysenko A. M., Mityushina L. L., Yusupov S. K., Belyaev S. S. (2001). Desulfacinum subterraneum sp. nov., a new thermophilic sulfate-reducing bacterium isolated from a high-temperature oil field. *Microbiology*, 70(4), 466–471. <https://doi.org/10.1023/A:1010494413559>

Schlegel M.L., Manceau A., Charlet L., Chateigner D., Hazemann J.-L. (2001). Sorption of metal ions on clay minerals. III. Nucleation and epitaxial growth of Zn phyllosilicate on the edges of hectorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(22), pp. 4155–4170. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00700-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00700-1)

Svendsen J.B., Hartley N.R. (2002). Synthetic heavy mineral stratigraphy: Applications and limitations. *Marine and Petroleum Geology*, 19(4), 389–405. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(02\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(02)00010-7)

West M., Ellis A.T., Kregsamer P., Potts P.J., Strelci C., Vanhoof C., Wobrauschek P. (2008). Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23, 1409–1437. <https://doi.org/10.1039/B813039F>

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

Владимир Константинович Виноградов – начальник отдела прогнозирования геологии месторождений управления геологического мониторинга разработки месторождений департамента разработки месторождений, ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия

Петр Валерьевич Быбин – главный технолог проекта отдела геонавигации управления геонавигации департамента геологии и разработки, ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

Андрей Сергеевич Буткеев – заместитель генерального директора – главный геолог, 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

Кирилл Владимирович Андрияхин – младший научный сотрудник, ООО «Тюменьгеоспектр»; ассистент кафедры общей геологии и полезных ископаемых геологического факультета, Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
e-mail: k.andryuhin@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 1)

L.A. Uspenskaya^{1*}, N.A. Schadchnev¹, V.K. Vinogradov¹, P.V. Bybin², A.S. Butkeev³, A.G. Manikin^{4,5}, K.V. Andryukhin^{4,5}

¹NOVATEK PJSC, Moscow, Russian Federation

²NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

³ARCTICGAS JSC, Noviy Urengoy, Russian Federation

⁴Tyumengeospektir LLC, Saratov, Russian Federation

⁵Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

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

Abstract. The paper presents a methodology for the rapid interpretation of X-ray fluorescence (XRF) data from drill cuttings, taking into account the lithogeochemical characteristics of the Achimov Formation deposits of the Urengoy oil and gas condensate field (Russia). Based on a comprehensive analysis of core and cuttings material, geochemical indicators were established that allow reservoirs and non-reservoirs, represented by clay-rich and dense carbonate-cemented intervals, to be distinguished. The chemical composition characteristics of genetically distinct clay types – upper, intraformational, and basal clays – were determined. These clay types exhibit similar geophysical characteristics according to the data from the full logging-while-drilling suite. The possibility of identifying clay types from XRF data of drill cuttings was demonstrated, enabling the rapid determination of the well position relative to the productive interval and informed adjustment of the well trajectory. Geochemical indicators were also established to distinguish natural dense carbonate-cemented intervals from carbonate contamination introduced into the cuttings from the drilling fluid in the form of marble chips. The results demonstrate the effectiveness of enhanced drill cuttings analysis in the Achimov Formation deposits of the Urengoy field for reducing non-productive drilling during horizontal

well construction, both with a full and a minimal logging-while-drilling suite.

Keywords: Achimov formation, X-ray fluorescence analysis, drill cuttings, chemical composition, lithogeochemical, geosteering, horizontal drilling

Recommended citation: Uspenskaya L.A., Schadchnev 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>

References

Bhatia M.R. (1983). Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6), pp. 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>

Cui H., Zhu S., Gao Y., Chen W. (2025). Hydrothermal activity near the Permian–Triassic transition in the south-western Ordos Basin, China: Evidence from carbonate cementation in Upper Permian sandstones. *Sedimentology*, 72(1), 227–257. <https://doi.org/10.1111/sed.13232>

- Derkachev A.N., Nikolaeva N.A., Mozherovsky A.V., Grigorieva T.N., Ivanova E.D., Pletnev S.P., Barinov N.N., Chubarov V.M. (2007). Mineralogical and geochemical indicators of anoxic sedimentation conditions in local depressions within the Sea of Okhotsk in the Late Pleistocene–Holocene. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 26(3), pp. 3–33. (In Russ.)
- Drits V.A., Kossovskaya A.G. (1991). Clay Minerals: Micas, Chlorites. Moscow: Nauka, 176 p. (In Russ.)
- Eder V.G., Ryzhkova S.V., Kostyreva E.A. et al. (2020). Lithologic, geochemical and geophysical characteristics of the boundary strata of the Bazhenov and Kulomza horizons (Lower Cretaceous base) in the central regions of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 61(7), pp. 767–782. <https://doi.org/10.15372/RGG2019124>
- Eder V.G., Ryzhkova S.V., Dzyuba O.S., Zamirailova A.G. et al. (2022). Lithostratigraphy and sedimentation conditions of the Bazhenov Formation (Western Siberia) in the central, southeastern, and northern regions of its occurrence. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 30(5), pp. 334–359. <https://doi.org/10.1134/S0869593822050021>
- Eder V.G., Zamirailova A.G., Yan P.A. (2023). Features of the use of lithogeochemical indicators for reconstructing the paleoclimate and composition of sediment sources in the Late Jurassic–Early Cretaceous West Siberian sedimentary basin. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Mineral Resources*, (6), pp. 588–599. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0024497X2370026X>
- Ellis D.V. (1987). Well Logging for Earth Scientists. New York: Elsevier, 532 p.
- Kaulina T.V., Lialina L.M., Ilchenko V.L. (2019). Sequence of REE-Th-U minerals in the Litsa uranium ore area (the Kola Region). *Vestnik MGTU = Scientific Journal of Murmansk State Technical University*, 22(1), pp. 12–22. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-12-22>
- Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkova V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N. (2014). Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5–6), pp. 745–776. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20140504>
- Kulikov P.Yu., Panchenko I.V., Garipov R.A. (2023). Application of portable XRF analyzers (rock chemical composition) for calculating a mineral-component model of black shales. (In Russ.)
- Kurchikov A.R., Borodkin V.N. (2010). Geological Structure and Petroleum Potential of the Achimov Formation of Northern West Siberia. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 138 p. (In Russ.)
- Ladonin D.V. (2003). Effect of iron and clay minerals on the sorption of copper, zinc, lead, and cadmium in the nodal horizon of sod-podzolic soil. *Pochvovedenie*, 36(10), pp. 1065–1073. (In Russ.)
- Lemière B. (2018). A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, pp. 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.006>
- Maslov A.V. (2005). Sedimentary Rocks: Methods of Study and Interpretation of the Data Obtained. Yekaterinburg: UGGU Publ., 289 p. (In Russ.)
- Mukhametshin R.Z., Galeev A.A. (2014). Diagnostics of ancient oil–water contacts by instrumental methods. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, (10), pp. 28–33. (In Russ.)
- Panchenko I.V., Kulikov P.Yu., Garipov R.A. (2021). Practical application of chemostratigraphy and lithochemistry methods in the study of oil-bearing black shale. *EAGE/SPE Workshop on Shale Science 2021*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202151034>
- Pearce T.J., Besly B.M., Wray D.S., Wright D.K. (1999). Chemostratigraphy: A method to improve interwell correlation in barren sequences – a case study using onshore Duckmantian/Stephanian sequences (West Midlands, U.K.). *Sedimentary Geology*, 124(1–4), pp. 197–220. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00128-6)
- Potts P.J., West M. (Eds.). (2008). Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for In Situ Analysis. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 291 p. <https://doi.org/10.1039/9781847558640>
- Pozzi A., Casal F. (2018). Advanced surface logging technology for unconventional plays: Well-site applications in tight reservoirs. *First Break*, 36(7), 57–66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0106>
- Prundeanu I., Chelariu C., Contreras Perez D. (2021). Elemental geochemistry of the Upper Cretaceous reservoir and surrounding formations applied in geosteering of horizontal wells, Lebăda Field – Western Black Sea. *Oil, Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 76, 1. <https://doi.org/10.2516/ogst/2020083>
- Ratcliffe K.T., Wilson A., Payenberg T., Rittersbacher A., Hildred G.V., Flint S.S. (2015). Ground truthing chemostratigraphic correlations in fluvial systems. *AAPG Bulletin*, 99(1), 155–180. <https://doi.org/10.1306/06051413120>
- Roser B.P., Korsch R.J. (1988). Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1–2), pp. 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Rožanova E. P., Tourova T. P., Kolganova T. V., Lysenko A. M., Mityushina L. L., Yusupov S. K., Belyaev S. S. (2001). Desulfacinum subterraneum sp. nov., a new thermophilic sulfate-reducing bacterium isolated from a high-temperature oil field. *Microbiology*, 70(4), 466–471. <https://doi.org/10.1023/A:1010494413559>
- Sakhibgareev R. S. (1989). Secondary Alterations of Reservoirs during the Formation and Destruction of Oil Accumulations. Leningrad: Nedra, 260 p. (In Russ.)
- Schlegel M.L., Manceau A., Charlet L., Chateigner D., Hazemann J.-L. (2001). Sorption of metal ions on clay minerals. III. Nucleation and epitaxial growth of Zn phyllosilicate on the edges of hectorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(22), pp. 4155–4170. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00700-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00700-1)
- Skorobogatov V.A., Stroganov L.V., Kopeev V.D. (2003). Geological Structure and Oil and Gas Potential of Yamal. Moscow: Nedra-Businesscenter, 352 p. (In Russ.)
- Svendsen J.B., Hartley N.R. (2002). Synthetic heavy mineral stratigraphy: Applications and limitations. *Marine and Petroleum Geology*, 19(4), 389–405. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(02\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(02)00010-7)
- West M., Ellis A.T., Kregsamer P., Potts P.J., Strelcić C., Vanhoof C., Wobrauschek P. (2008). Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23, 1409–1437. <https://doi.org/10.1039/B813039F>
- 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

Vladimir K. Vinogradov – Head of Reservoir Geology Forecasting Division, NOVATEK PJSC, Moscow, Russian Federation

Petr V. Bybin – Chief Project Technologist, Geosteering Division, NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

Andrey S. Butkeev – Deputy General Director – Chief Geologist, 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

Kirill V. Andryukhin – Junior Researcher, LLC Tyumengeospektr LLC; Assistant, Department of General Geology and Mineral Resources, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation
e-mail: k.andryukhin@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/>)