

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геофизики

**«Результаты комплексирования методов оперативного исследований
бурового шлама и ГИС на примере ачимовских отложений Западной
Сибири»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 261 группы
направления (специальности) 05.04.01 Геология
профиль «Геофизика при поисках нефтегазовых месторождений»
геологического ф-та
Андрюхина Кирилла Владимировича

Научный руководитель

К. г.-м.н., доцент

А.Г. Маникин

подпись, дата

Зав. кафедрой

К. г.- м.н., доцент

Е.Н. Волкова

подпись, дата

Саратов 2026

Введение. Минерально-сырьевая база углеводородов России исторически базировалась на освоении гигантских месторождений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, где основную добычу обеспечивали сеноманские, валанжинские и неокомские залежи с высокими фильтрационно-ёмкостными свойствами. В настоящее время степень выработанности традиционных коллекторов достигла критических значений, что объективно смещает фокус нефтегазодобычи в сторону вовлечения в разработку сложно построенных, глубокозалегающих горизонтов. Особое место в этой стратегии занимают отложения ачимовской толщи, рассматриваемые как колоссальный резервуар нефти и газа, способный обеспечить поддержание уровня добычи на долгосрочную перспективу. Ачимовская толща представляет собой мощный пакет песчано-алевролитовых пород, сформировавшихся в условиях лавинной седиментации. Эти отложения залегают на глубинах 3400–3700 м и характеризуются крайне сложным геологическим строением: линзовидно-прерывистым характером песчаных тел, высокой литологической неоднородностью, низкой отсортированностью материала и гнездовидным распределением карбонатного цемента. Фильтрационно-ёмкостные свойства пород оцениваются как низкие ($K_p \approx 0,15$, проницаемость 0,5–1,5 мД), а разработка осложняется аномально высокими пластовыми давлениями (до 60 МПа) и температурами (105–115 °С). В таких условиях эффективность освоения напрямую зависит от качества информационного обеспечения процесса бурения.

Традиционные методы геофизических исследований скважин (ГИС), особенно в условиях горизонтального бурения и ограниченного приборного комплекса, не всегда позволяют оперативно и с необходимой детальностью оценивать коллекторские свойства. Лабораторные исследования керн, являющиеся эталоном точности, носят дискретный характер, требуют значительных временных и финансовых затрат и физически невозможны на большей части ствола скважины. В этом контексте возрастает роль бурового шлама – единственного непрерывного источника геологической информации,

доступного непосредственно в процессе проводки скважины. Исторически шлам использовался преимущественно для качественного литологического описания, однако развитие портативных спектрометрических технологий (в частности, рентгенофлуоресцентного анализа, РФА) открывает принципиально новые возможности. Переход от визуального описания к количественному элементному анализу позволяет реализовывать технологию оперативного геохимического каротажа, обеспечивающую непрерывный мониторинг разреза в реальном времени. Комплексирование геохимических данных бурового шлама с результатами ГИС устраняет слабые места каждого метода в отдельности: независимая геохимическая оценка пористости и литотипов верифицирует интегральные показания каротажных приборов, корректирует интерпретацию в интервалах карбонатной цементации и повышенной глинистости, а также позволяет прогнозировать осложняющие факторы бурения. Таким образом, разработка научно обоснованной методики количественной оценки коллекторских свойств по геохимическим данным шлама и её интеграция с традиционными геофизическими методами представляет собой актуальную задачу, решение которой повышает оперативность, достоверность и экономическую эффективность геологического сопровождения бурения ачимовских залежей.

Объект исследования: ачимовские отложения Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Предмет исследования: закономерности изменения фильтрационно-ёмкостных свойств пород ачимовской толщи, устанавливаемые путём комплексирования количественного рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама и традиционных методов ГИС.

Научная новизна исследования заключается в разработке принципиально нового подхода к оперативной оценке коллекторских свойств сложно построенных резервуаров, основанного на комплексировании количественного рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама с традиционными методами геофизических исследований скважин. Для ачимовских отложений

Уренгойского месторождения обоснована возможность перехода от дискретного кернового контроля к непрерывному геохимическому каротажу. Интеграция геохимической оценки, с интегральными показаниями ГИС позволила выявить и количественно скорректировать систематические погрешности традиционной интерпретации в интервалах карбонатной цементации и повышенной глинистости, что формирует научно обоснованную методологическую основу для повышения оперативности, достоверности и экономической эффективности геологического сопровождения бурения.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объём работы составляет 70 страниц.

Основное содержание работы. В первом разделе рассмотрены физико-географические особенности района исследований. Уренгойское месторождение расположено в 80 км к северу от г. Новый Уренгой в пределах Западно-Сибирской плиты. Территория характеризуется экстремальными природно-климатическими условиями: суровым субарктическим климатом, повсеместным распространением многолетнемерзлых пород.

Во втором разделе представлена геологическая характеристика объекта исследований. В тектоническом плане район приурочен к Надым-Тазовской синеклизе, где доминирующей структурой является Уренгойский мегавал. Стратиграфический разрез представлен терригенными отложениями мезозоя и кайнозоя. Особое внимание уделено ачимовской толще неокомского яруса, представляющей собой сложный комплекс песчано-алевролитовых клиноформ, сформировавшихся в условиях глубоководного континентального склона. Продуктивные тела имеют линзовидно-прерывистый характер, контролируются литологическим и литолого-тектоническим экранированием и характеризуются низкими ФЕС, что требует применения дифференцированных методов оценки коллекторских свойств.

В третьем разделе детально описана методика комплексирования РФА-анализа керна и бурового шлама, а также комплексирования с ГИС. Работы

проводились в два этапа: подготовительный отвечающий за создание теоретической модели и оперативный включающий в себя применение разработанной методики в условиях реального бурения. Подготовительный этап исследования был направлен на формирование математической базы геохимических данных. В рамках ОНР коллективом геологического факультета СГУ были проведены РФА-исследования каменного материала ачимовских отложений. Всего изучено 17 интервалов по 8 скважинам, общий изученный метраж керна составил 722,75 м, выполнено 1710 РФА-замеров со средней плотностью 2,4 точки на погонный метр. Измерения проводились на сухих, нерастёртых образцах керна с шагом 10–50 см, с замером от 1 до 2 минут.

Полученный массив данных обработан в ПО среде Statistica 14. Для выявления естественных групп образцов применён иерархический кластерный анализ методом Уорда. На уровне сходства 100 единиц уверенно выделены четыре устойчивые группы, получившие литологическую привязку на основе средних содержаний элементов:

- Кластер 1: «чистые» песчаники (макс. Si – 30,33%, мин. Al – 6,75%, K – 2,54%, Ca – 2,50%), обладающие наилучшими коллекторскими свойствами.
- Кластер 2: песчаники на карбонатном цементе (аномально высокие Ca – 14,11%, Mn – 0,43%, сниженный Si – 22,54%).
- Кластер 3: глинистые алевролиты (макс. Al – 8,10%, K – 3,22%, Fe – 8,65%).
- Кластер 4: смешанные разности (промежуточные значения Si, Al, Fe), характеризующиеся тонким переслаиванием песчаных и глинистых прослоев.

Факторный анализ подтвердил устойчивость выделения кластеров и выявил две ортогональные оси изменчивости: вертикальную (Фактор 1), контролирующую степень глинизации (Al, K, Ti, Fe), и горизонтальную (Фактор 2), отражающую влияние карбонатной цементации (Ca, Mn) и кварцевого скелета (Si). Результаты кластеризации продемонстрировали, что

все четыре литотипа присутствуют в каждой изученной скважине, хотя их доли варьируют в зависимости от фациальной обстановки.

На основе выявленных высокоррелирующих параметров методом множественной линейной регрессии построена модель следующего вида:

$$s_{Кп} = 0,1294 - 0,01276 \cdot \left(\frac{Ti}{Zr}\right) + 0,2821 \cdot ГМ - 0,2561 \cdot ФМ \quad (1)$$

где Ti/Zr – отношение титана к цирконию, ГМ – гидролизатный модуль, ФМ – фемический модуль. Коэффициенты модели получены методом наименьших квадратов; их статистическая значимость подтверждена t -критерием Стьюдента

Верификация модели по формуле 1 проводилась на независимой керновой выборке. Сравнение расчётных значений $s_{Кп}$ с лабораторными измерениями показало отсутствие систематического смещения, а расхождения в большинстве случаев не превышали 0,03–0,04 долей единицы. Максимальные отклонения приурочены к интервалам сложного переслаивания, однако модель адекватно воспроизводит вертикальную изменчивость коллекторских свойств, синхронно фиксируя пики и минимумы пористости. Статистическая оценка полной выборки подтвердила визуальные наблюдения, что позволяет использовать модель для оперативной оценки пористости по данным РФА керна и, после соответствующего учёта особенностей пробы, бурового шлама.

Оперативный этап включал отбор и пробоподготовку шламовых проб непосредственно с вибросит с шагом 2 м. Разработан строгий четырёхстадийный протокол подготовки шлама к РФА-анализу: (1) отмывка от бурового раствора и глинистой взвеси; (2) щадящая сушка (100–150 °С) для предотвращения дегидратации минералов; (3) магнитная сепарация для удаления техногенной металлической стружки; (4) истирание в агатовой/виброцентробежной мельнице до фракции < 50 мкм. Только при строгом соблюдении данного протокола обеспечивается воспроизводимость и достоверность количественных данных. Для автоматизации обработки сырых данных РФА разработан скрипт на языке Python, реализующий классификацию

пробы по литотипам, расчёт геохимических коэффициентов и синтетической пористости. Цикл обработки одной пробы не превышает 10–15 минут, что позволяет использовать методику в режиме реального времени. Сформирована каменная коллекция из более чем 2300 законсервированных шламовых проб, обеспечивающая преемственность исследований и возможность ретроспективного анализа.

В четвёртой главе изложены результаты комплексирования геохимических данных бурового шлама с традиционными методами ГИС и их прикладное применение. Апробация методики в условиях реальной буровой площадки выполнена на примере скважины «А», вскрывающей ачимовские отложения горизонтальным стволом в непосредственной близости от эталонной вертикальной скважины «Керн №6». Сравнительный анализ геохимических планшетов (включая корреляционную схему, представленную в Приложении А) демонстрирует высокую степень литолого-геохимической сходимости между двумя объектами. На обоих разрезах уверенно воспроизводится четырёхчленная кластерная структура, отражающая основные литотипы. Распределение кластеров по глубине показывает аналогичную цикличность и последовательность смены фаций. Кривые распределения петрогенных элементов и производных геохимических коэффициентов попадают в те же диапазоны изменчивости. В высокопроницаемых интервалах отношение Ti/Zr стабильно снижается, тогда как в глинистых пропластках возрастает, полностью повторяя тренды эталонного разреза. Расчётная кривая $sKп$ по шламовым данным воспроизводит характерную ритмичную структуру с чётко выраженными зонами повышенной ёмкости, приуроченными к песчаным телам первого кластера. Локальные различия в детализации объясняются технологической природой шлама (усреднение материала при циркуляции, дискретность опробования), однако общая последовательность литологических циклов и амплитуды вариаций пористости остаются статистически идентичными. Это подтверждает принцип инвариантности геохимических

коэффициентов к степени измельчения породы при условии соблюдения протокола пробоподготовки.

Следующим этапом стало исследование скважины «Б», где реализована полноценная интеграция геохимического анализа шлама с данными стандартного комплекса ГИС. В пределах одного ствола сопоставлены две независимые оценки пористости: синтетическая (sКп) по РФА шлама и пористость по ГИС (РНП) по нейтронному, акустическому и плотностному каротажу. В большинстве интервалов кривые демонстрируют удовлетворительную сходимость

Заключительным этапом стало геохимическое сопровождение горизонтального ствола скважины «В». В процессе углубки фиксировались эпизоды резкого снижения механической скорости бурения (МСБ) и повышения нагрузки на долото. Анализ геохимического планшета продемонстрировал высокую эффективность методики в качестве оперативного инструмента контроля. Чётко прослеживаются интервалы, соответствующие кластеру 2, геохимическая интерпретация которых указывает на песчаники с высоким содержанием карбонатного цемента (пики Са и Mn). Наличие карбонатной цементации приводит к существенному уплотнению породы и увеличению её абразивности и прочности на сжатие. Оперативное выявление данных интервалов по РФА шлама позволило геологической службе заблаговременно предупредить буровую бригаду. Получение информации о смене литотипа на карбонатно-цементированный песчаник дало возможность оперативно скорректировать параметры режима бурения: оптимизировать осевую нагрузку на долото и частоту вращения ротора для предотвращения преждевременного износа вооружения и аварийных ситуаций. Результаты подтвердили, что комплексирование методов выходит за рамки исключительно геологических задач, выступая эффективным инженерным инструментом повышения безопасности и экономичности процесса бурения.

Заключение. В рамках выполненной выпускной квалификационной работы разработана и экспериментально обоснована комплексная методика

оценки фильтрационно-ёмкостных свойств ачимовских отложений Уренгойского месторождения, основанная на интеграции количественного рентгенофлуоресцентного анализа бурового шлама с традиционными геофизическими исследованиями скважин, что позволило полностью достичь поставленной цели и решить все сформулированные задачи. На основе статистической обработки массива из 1710 РФА-замеров кернового материала с применением иерархического кластерного и факторного анализа объективно выделены четыре устойчивых литотипа, дифференцированных по степени глинистости и типу цементации, при этом корреляционный анализ продемонстрировал, что наиболее информативными предикторами пористости выступают не абсолютные содержания элементов, а генетически обусловленные геохимические коэффициенты, такие как отношение Ti/Zr , гидролизатный и фемический модули. Построенная множественная регрессионная модель расчёта синтетической пористости ($sKп$) характеризуется высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,739$), а её верификация на независимой керновой выборке подтвердила отсутствие систематического смещения и расхождение расчётных значений с лабораторными данными в пределах $\pm 0,03-0,04$. Апробация методики на буровом шламе скважин «А», «Б» и «В» доказала независимость химических элементов к агрегатному состоянию пробы при условии строгого соблюдения четырёхстадийного протокола пробоподготовки, включающего отмывку, щадящую сушку, магнитную сепарацию и тонкое истирание. Комплексирование независимой геохимической оценки с данными стандартного комплекса ГИС позволило скорректировать петрофизическую интерпретацию и повысить достоверность определения эффективной пористости. Практическая значимость работы заключается в создании готового к промышленному внедрению инструмента оперативного геологического сопровождения бурения, обеспечивающего в режиме реального времени непрерывный геохимический мониторинг разреза, прогнозирование литологических изменений и оптимизацию технологических параметров проходки. Комплексирование геохимических данных по шламу с результатами

интерпретации ГИС формирует кумулятивный эффект, выражающийся в снижении неопределённости интерпретации и возможности оптимизации объёма дорогостоящих геофизических исследований. Дополнительно создается верифицируемая шламовая коллекция для долгосрочного хранения. Перспективы дальнейшего развития исследования связаны с адаптацией регрессионной модели под соседние лицензионные участки, интеграцией алгоритмов машинного обучения для повышения точности прогноза в условиях экстремальной неоднородности, а также расширением перечня элементов-индикаторов за счёт учёта микроэлементного состава. Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую эффективность комплексирования методов оперативного исследования бурового шлама и геофизических исследований скважин, что обеспечивает повышение оперативности, достоверности и экономической целесообразности геологического обеспечения бурения сложно построенных ачимовских залежей Западной Сибири и служит методологической основой для перехода от дискретного кернового контроля к непрерывному цифровому геохимическому каротажу.