

УДК 550.372: 552.578.3

А.О. Хотылев¹, Е.В. Козлова², В.С. Белохин³, А.А. Майоров⁴, Т.Г. Исакова⁵,
Н.В. Пронина⁶, Г.А. Калмыков⁷, О.В. Хотылев⁸

БИТУМЫ КАК ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗОН НИЗКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ПОРОДАХ ФУНДАМЕНТА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Сколковский институт науки и технологий, 121205, Москва, Большой Бульвар, 30., стр. 1

Фонд «Национальное интеллектуальное развитие», 119192, Москва, Ломоносовский проспект, 27, корп. 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Skolkovo Institute of Science and Technology, 121205, Moscow, Bolshoy Boulevard, 30, bld. 1

Foundation «National Intellectual Development», 119192, Moscow, Lomonosovsky prospect, 27, p. 1

Представлены результаты исследований вещественного состава и физических свойств пород доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты. Показано наличие в породах битумов группы антраксолитов и керитов. Мы предполагаем, что битумы образуют палеозалежь позднепалеозойского возраста, преобразованную в условиях апокатагенеза. Пропитка сильно преобразованным органическим веществом приводит к резкому уменьшению удельного электрического сопротивления до значений 1–30 Ом·м, что необходимо учитывать при интерпретации зон низкого сопротивления на каротажных данных.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, битумы, фундамент, пиролиз Rock-Eval, низкоомные коллекторы, Западная Сибирь.

This article presents the results of studies of the material constitution and physical properties of rocks of foundation of the West Siberian Plate. It is shown that anthraxolite and kerite groups are present in bitumen rocks. We assume that the bitumens create a Late Paleozoic paleo-deposit, transformed under the conditions of apocatagenesis. Impregnation with highly transformed organic matter leads to a significant decrease in electrical resistivity to values of 1–30 Ohm metre, which must be taken into consideration when interpreting low-resistivity zones on log data.

Key words: electrical resistivity, bitumen, pre-Jurassic foundation, Rock-Eval pyrolysis, low resistance collectors, Western Siberia.

Введение. Необходимость установления причин низкого удельного электрического сопротивления пород возникла при изучении керна метаосадочных пород из нескольких скважин одного из месторождений Краснотуркменского свода в центральной части Западной Сибири, расположенных в 120 км к северо-западу от г. Ханты-Мансийск, на территории Октябрьского и Ханты-Мансийского районов Ханты-Мансийского административного округа — Югры.

При интерпретации кривых геофизических исследований скважин (ГИС), низкоомные интер-

валы были интерпретированы как водонасыщенные трещиноватые или брекчированные участки. Однако подобная интерпретация не подтвердилась исследованиями каменного материала. Керна представлен массивными и слаботрещиноватыми метаморфическими породами, характеризующимися невысокой пористостью и проницаемостью. Очевидно, стоило ожидать, что удельное электрическое сопротивление (УЭС) будет контролироваться в этом случае составом пород. Таким образом, была сформирована цель наших исследований: установление причины низкого удельного электри-

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, ассистент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: akhotylev@gmail.com

²Сколковский институт науки и технологий, центр добычи углеводородов, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: e.kozlova@skoltech.ru

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геофизики горючих ископаемых, науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: lordbvc@mail.ru

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, магистрант; e-mail: alex.yoga@gmail.com

⁵Фонд «Национальное интеллектуальное развитие», эксперт; e-mail: t.isakova@oilmsu.ru

⁶Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геофизики горючих ископаемых, доцент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: nvprncl@geol.msu.ru

⁷Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геофизики горючих ископаемых, профессор, доктор геол.-минер. н.; e-mail: gega64@mail.ru

⁸Фонд «Национальное интеллектуальное развитие», вед. геолог, канд. геол.-минер. н.; e-mail: hot63@mail.ru

ческого сопротивления пород в восточной части Красноленинского свода.

На сегодняшний день прямой источник информации о строении нефтегазоносных бассейнов — данные изучения кернового материала, полученного в результате бурения. Но часто керн не отбирается или отбирается только фрагментарно, поэтому существенное значение приобретают данные геофизических исследований скважин. По данным геофизического каротажа проводится корреляция пластов, определяются геологические границы, оцениваются водо- и нефтенасыщенность пород, перспективность тех или иных горизонтов с точки зрения нефтедобычи.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) — один из важных геофизических параметров, в осадочных породах сопротивление в комплексе с другими методами (ГК, НК, СП и др.) используется для выделения литотипов, например, карбонатизированных песчаников, глин, плотных известняков или доломитов. Помимо этого, УЭС отражает флюидонасыщение (углеводородами или водными растворами) межзерновых коллекторов, в которых поровый объем заполнен флюидом. Разделение по типу флюида проводится за счет существенно более высокого удельного электрического сопротивления (или низкой проводимости) углеводородов (УВ) по сравнению с минерализованными пластовыми водами. Зоны низкого сопротивления в базовом случае рассматриваются как водонасыщенные пласты, а высокоомные интервалы — как потенциальные нефтенасыщенные зоны. Однако еще в конце 1980-х гг. была выявлена проблема низкоомных межзерновых коллекторов, когда по данным геофизических исследований скважин юрские нефтенасыщенные коллекторы в Западной Сибири принимали за неперспективные водонасыщенные [Мельник, 2018; Гусев, 2016; Ежова, 2006].

На примерах осадочных толщ неоднократно показано, что сопротивление горных пород зависит от ряда факторов. К наиболее распространенным и важным из них относятся:

- количество, характер распределения, состав глинистых минералов;
- особенности диагенетических и катагенетических преобразований пород, наличие низкоомных минералов;
- характер и степень трещиноватости пород;
- тип флюидного заполнения пор и трещин;
- размер пор и их конфигурация;
- структура и текстура пород;
- ориентировка текстур (чаще всего слоистости) пород по отношению к скважине или направлению замера;
- минерализация пластовых вод.

Низкоомные неглинистые фазы, понижающие УЭС, представлены оксидами титана, сульфидами (пирит, пирротин, халькопирит), гидроксидами железосодержащих минералов, крустификацион-

ными хлоритами. Но влияние этих фаз значительно зависит от количества: для пирита нижний предел устанавливается в 5–7% (по разным источникам), при содержании, ниже которого он не оказывает значимого влияния на УЭС. Детально влияние перечисленных выше факторов рассмотрено в работах [Мельник, 2018; Мельник, Ерофеев, 2014; Гусев, 2016; Семенов и др., 2006; Ежова, 2006] и в ссылках в них.

В породах фундамента нефтенасыщение встречается реже, поэтому природа зон низкого сопротивления пород изучена хуже. В метаморфических и метаморфизованных породах поровый коллектор обычно отсутствует, а методы сопротивления отражают преимущественно электрические свойства самих пород и зависят в большей степени от минерального состава и структурно-текстурных особенностей отложений.

Трещинный коллектор, который обычно встречается в породах фундамента, имеет пористость <1% и по-разному может выражаться в данных УЭС — это зависит не только от типа флюидонасыщения, но и от свойств и состава вмещающих плотных и нетрещиноватых пород. В этом конкретном случае однозначного решения задачи о типе флюида в трещиноватых коллекторах не существует.

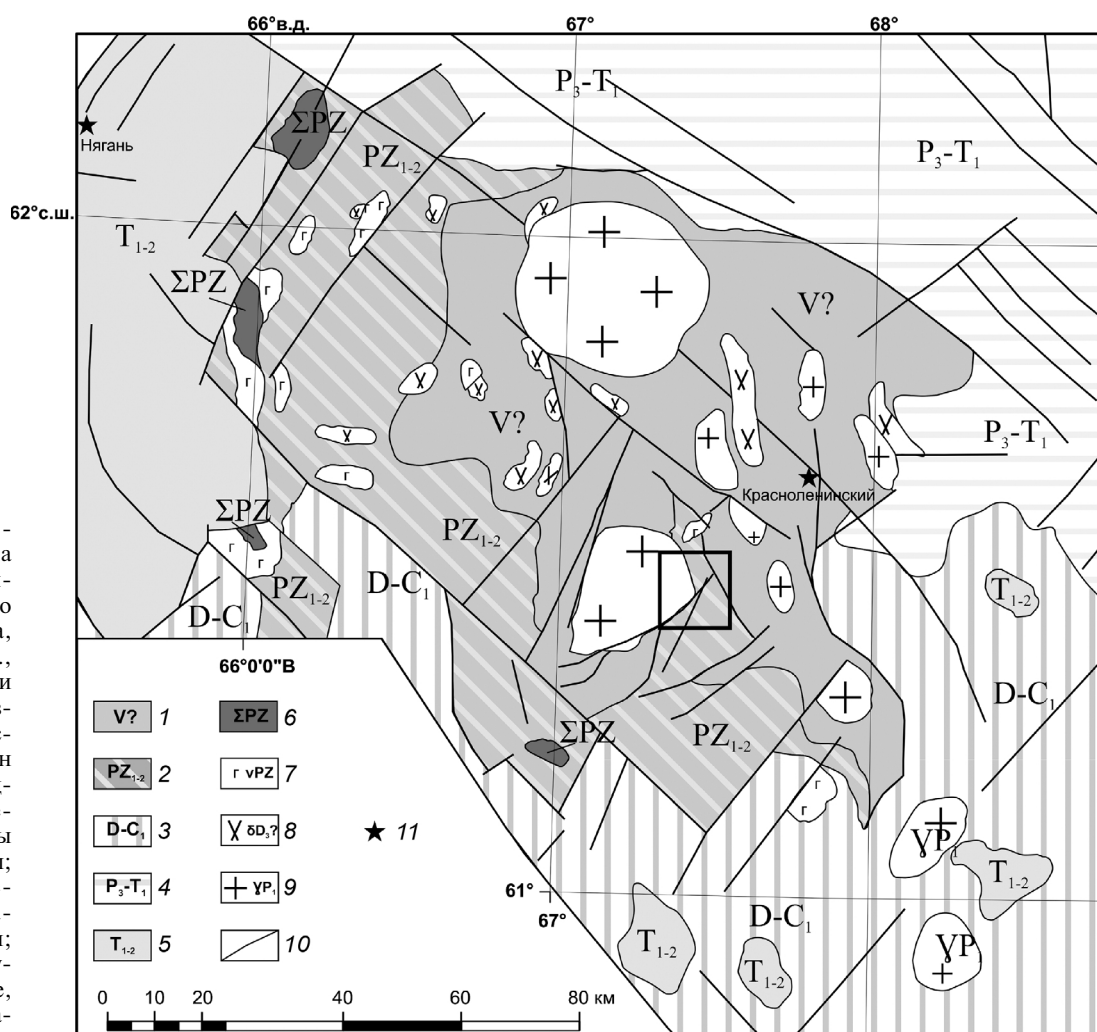
В базовом случае низкоомные зоны в фундаменте рассматриваются как интервалы тектонического брекчирования или участки трещинного коллектора, заполненного минерализованной водой. Первоначально наша гипотеза состояла в том, что появление низкоомных интервалов в изученных скважинах связано с трещиноватостью и водонасыщением, а доля и особенности состава и распределения глинистых минералов (которых обычно в породах фундамента немного) играют меньшую роль.

Район исследования. Исследованная площадь расположена в центральной части Красноленинского свода (поднятия) Западно-Сибирской молодой плиты, имеющей сложное и неоднородное строение. В строении Западно-Сибирской плиты выделяют три структурных этажа [Западная Сибирь, 2000; Сурков, Жеро, 1981]:

- складчатый фундамент, включающий в себя осадочные, метаморфические и магматические образования рифейско-палеозойского возраста;
- промежуточный, рифтогенный этаж, сложенный базальтами и риолитами поздней перми и раннего триаса, сменяющимися вверх по разрезу терригенными толщами среднего и верхнего триаса. Стратиграфический объем этого комплекса на территории Западно-Сибирской плиты различен;
- плитный чехол, представленный мезозойско-кайнозойскими, практически недислоцированными осадочными толщами.

Нижние два структурных этажа — доюрское основание, или доюрский комплекс плиты, нижний этаж отдельно — фундамент, второй (проме-

Рис. 1. Геологическая карта-схема строения фундамента Красноленинского свода по [Шадрина, 2018; Иванов и др., 2016], с авторскими дополнениями и изменениями. Район исследований показан квадратом: 1 — вендские (?) нижнепалеозойские кварциты и слюдяные сланцы; 2 — ниже-среднепалеозойские метатерригенные толщи; 3 — девон-каменноугольные терригенные, карбонатные и вулканогенные комплексы; 4 — верхнепермская-нижнетриасовая вулканогенная рогожниковская толща; 5 — ниже-среднетриасовые вулканы туринской серии; 6 — тела палеозойских ультрабазитов; 7 — тела палеозойских габбро и долеритов; 8 — тела позднедевонских (?) диоритов; 9 — массивы гранитов и гранодиоритов нижнепермского комплекса; 10 — разрывные нарушения; 11 — населенные пункты



жуточный) этаж — переходный комплекс между складчатым фундаментом и недеформированными толщами осадочного чехла.

В северо-восточной части фундамента Красноленинского свода развиты поднедокембрийские метаморфические толщи [Шадрина, 2018], представленные кварцитами и биотит-мусковит-кварцевыми сланцами (рис. 1). Южную и западную части составляют слабометаморфизованные терригенно-осадочные милонитизированные толщи, представленные метапесчаниками, метаалевролитами и в меньшей степени серицит-гидрослюдистыми сланцами. Западнее, в районе Ем-Еговской вершины, по нашим данным, в этих терригенно-осадочных толщах фиксируются пачки вулканитов контрастного состава. Южнее, в Южно-Елизаровском прогибе также описаны терригенно-вулканогенные образования. Возраст всех этих терригенно-осадочных и терригенно-вулканогенных толщ по немногочисленным фаунистическим находкам принимается как девонско-каменноугольный [Тугарева и др., 2018; Бочкарев, Брехунцов, 2015; Чувазов, 2009]. Перечисленные осадочные

и метаморфические толщи интродуцированы несколькими крупными гранит-гранодиоритовыми массивами раннепермского возраста [Иванов и др., 2018; Федоров и др., 2006], а на Ем-Еговской вершине — мелкими интрузиями, предположительно, позднедевонского возраста [Хотылев и др., 2021]. С северо-запада и северо-востока Красноленинский свод ограничен Южно-Бобриковским мегапрогибом, а также Елизаровским прогибом и Рогожниковским валом соответственно, в которых развиты триасовые и пермско-триасовые вулканические комплексы [Шадрина, Кондаков, 2014; Бочкарев и др., 2013].

Материалы и методы исследований. Так как основной нашей задачей было установление, каким из параметров породы контролируется УЭС, то, чтобы показать связь УЭС горной породы с ее составом и структурно-текстурными особенностями, использованы данные о минеральном составе пород, фильтрационно-емкостных свойствах, а также информация о количестве и состоянии органического вещества (ОВ), которое было обнаружено в этих породах.

Для определения минерального состава пород изучены шлифы и проведен рентгенофазовый анализ (РФА, 63 обр.). На цилиндрических образцах замерено электрическое сопротивление нескольких типов: УЭС образцов, на 100% насыщенных водой с минерализацией 17 г/л (109 обр.); определено УЭС при остаточном водонасыщении (89 обр.); сопротивление образцов, высушенных при 80 °С на протяжении 14 сут. (29 обр.). Для оценки пористости и проницаемости использованы значения коэффициентов пористости (K_p , 114 обр.) и проницаемости с поправкой Клинкенберга ($K_{пр}$, 85 обр.), полученные газовольметрическим методом. Количество органического вещества подсчитано по данным пиролиза Rock-Eval, для корреляций использован параметр ТОС (total organic carbon), отражающий количество органического углерода ($C_{орг}$) в породе в вес.% (37 обр.).

Наиболее полный комплекс исследований выполнен на образцах из двух скважин (скв. А и В) — РФА, УЭС, пиролиз, изучение шлифов, определение пористости и проницаемости. Кроме того, были использованы данные об УЭС, минеральном составе и фильтрационно-емкостных свойствах ряда образцов из скважин, расположенных в этом же районе.

Минеральный состав пород был определен рентгенофазовым методом на приборе ДРОН-3М на кафедре нефтегазовой седиментологии и морской геологии МГУ имени М.В. Ломоносова (аналитик В.Л. Косоруков)

Измерение пористости (K_p) и проницаемости ($K_{пр}$) образцов проводилось газовольметрическим методом на аппаратуре АР-608 в лабораторных условиях (давление обжима 500 РСІ), в качестве рабочего флюида использовался азот.

Измерение удельного электрического сопротивления образцов проводилось согласно ГОСТ

25494-82 на аппаратуре «ПетроОм» (Экогеоспром, Россия). Образцы зажимали кернодержателем при одинаковом для всех образцов давлении. При измерении УЭС на сухих образцах не применялись вспомогательные прокладки между образцом и электродами. При измерении полностью или частично насыщенных образцов использовали прокладки из фильтровальной бумаги, смоченные минерализованной водой (минерализация соответствовала минерализации насыщения образцов — 17 г/л).

Создание остаточной водонасыщенности осуществлялось методом полупроницаемой мембраны на установке группового капилляриметра. Этот подход, в отличие от метода центрифугирования, позволяет сохранить образцы.

Общая схема работы с образцами содержала следующие этапы:

- 1) выбуривание, торцевание, промывка и сушка (при 102 °С до постоянного веса);
- 2) измерение пористости и проницаемости по газу;
- 3) насыщение образца минерализованной водой (минерализация 17 г/л);
- 4) измерение УЭС насыщенного образца;
- 5) создание остаточного насыщения образца методом полупроницаемой мембраны;
- 6) оценка коэффициента остаточного водонасыщения весовым методом;
- 7) измерение УЭС на образцах при остаточном насыщении;
- 8) сушка образцов в течение 14 сут при 80 °С;
- 9) измерение УЭС сухих образцов.

Весь цикл описанных измерений проводился в лаборатории кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова. Результаты определения УЭС и фильтрационно-емкостных свойств для наиболее представительных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения УЭС и фильтрационно-емкостных свойств для пород Красноленинского свода по нашим данным

Параметр	Значение	Метаалевролиты, скв. 1А, 2В	Метопесчаники, скв. 1А, 2В	Гранодиориты	Серицит-кварцевые сланцы	Сланцы серицит-гидрослюдисто-кварцевые
Количество, <i>n</i>		14	7	29	11	19
УЭС _{100%} , Ом·м	ср	25	302	282	397	263
	мин	0,2	67	55	202	76
	макс	60	849	967	862	560
УЭС _{ов} , Ом·м	ср	34	842	4029	2121	3927
	мин	0,0005	100	111	352	377
	макс	85	1713	19000	3940	18675
K_p	ср	2,557	0,454	1,92	1,03	1,25
	мин	0,62	0,02	0,657	0,302	0,314
	макс	8,136	1,748	5,302	2,249	3,067
$K_{пр}$, мД	ср	0,048	0,054	—	0,086	0,024
	мин	0,001	0,001	—	0,001	0,001
	макс	0,551	0,106	—	0,611	0,261

Примечания. УЭС_{100%} — сопротивление при 100%-ной водонасыщенности, УЭС_{ов} — сопротивление при остаточной водонасыщенности, K_p — коэффициент пористости, $K_{пр}$ — коэффициент проницаемости.

Характеристика органического вещества в изученных породах получена методом пиролиза Рок-Эвал на приборах Rock-Eval-6 («Vincitechnology», Франция) и рабочей станции HAWK («Wildcattechnology», США) по стандартным температурным программам *bulk rock* и *reservoir* [Козлова и др., 2015; Lafargue et al., 1994; Лопатин, Емец, 1987]. Количество органического углерода (ТОС) определяли в породе по количеству термодесорбированных УВ (S_0 — газообразные, S_1 — легкие нефтяные, S_{2a} — тяжелые нефтяные, S_{2b} — асфальтены и продукты крекинга керогена [Баталин, Вафина, 2013]) и выделению CO и CO₂ при нагревании и сжигании (S_3 и S_4). Для разделения легкой и тяжелой нефтяных частей использовались температурные диапазоны программы РЕЗЕРВУАР. Для разделения асфальтенов и продуктов крекинга керогена для нескольких образцов проведена экстракция хлороформом в аппарате Сокслета, а также повторный пиролиз (табл. 2). Определение элементного состава органического вещества (CHN) выполнено на приборе ЛЕКО (элементный анализатор CHNS 260, производитель LECO, США). Исследования проводились в Центре добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, результаты исследований приведены в табл. 3.

Для уточнения состава органического вещества на прозрачно-полированном шлифе была проведена рамановская спектроскопия. Спектры комбинационного рассеяния получены на автоматическом рамановском спектрометре XPloRA («HoribaScientific», Япония), совмещенном с конфокальным микроскопом (геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, лаборатория локальных методов исследования вещества, аналитик В.Д. Шербаков), при возбуждающем излучении с длиной волны 532 нм и мощностью ~12 мВт. Регистрация проведена в диапазоне 100–3900 см⁻¹, при параметрах, дающих спектральное разрешение около 1 см⁻¹.

Результаты исследований и их обсуждение. Нами изучены породы доюрского комплекса, вскрытые скважинами А и В в центральной части Каменной вершины, которые, предположительно, относятся к терригенно-осадочным породам девонско-каменноугольного возраста. Как указано выше, для образцов из этих пород измерены УЭС, фильтрационно-емкостные свойства, определен минеральный состав и проведены пиролитические исследования.

Литологическая характеристика пород. В скважине А вскрыты в верхней части (интервал 2278,0–2289,5 м) светло-коричневые, бежевые метапесчаники мелко-тонкозернистые, рассланцованные, с просечками кальцита, доломита и птитиматовыми прожилками черного кварца. В метапесчаниках присутствуют пачки темно-серых до черных кварц-серицитовых углеводистых сланцев мощностью до 30 см.

В нижней части (интервал 2385–2395 м) метапесчаники представлены только единичными пачками мощностью до 20 см, а преобладают плотные темно-серые тонкослоистые тектонизированные метаалевролиты (рис. 2, а, б). Породы пронизаны многочисленными жилами кварца, разлинзованы, с плейчатых текстурами, угол падения сланцеватости меняется от 50 до 90° (горизонтальная) к оси керна.

Породы фундамента со структурным несогласием перекрыты юрскими грубообломочными конгломератами с песчаным матриксом и карбонатным цементом. Ниже контакта развиты процессы выветривания: высветление, трещиноватость, дезинтеграция пород фундамента, развитие оксидов железа, образование каверн с кварцем.

Метапесчаники тонко- и мелкозернистые, плохо окатанные, преимущественно кварцевые со слюдисто-кварцевым тонкозернистым цементом. Текстура неслоистая, часто брекчиевая, тектонизированная. Обломки представлены угловатыми зернами кварца с волнистым и блоковым погасанием (0,1–0,3 мм, 15–20%), с единичными обломками плагиоклазов близкого размера и фрагментами микрокварцитов. Обломочный компонент содержится в матриксе, сложенном тонкими обломками кварца (0,08–0,02 мм, 30–40% породы), листочками серицита и гидрослюды (0,04–0,08 мм, 10–15%), единичными листочками мусковита (до 0,16 мм). В породе развиты неровные, линзовидные, заливистые, с раздувами прожилки гранулированного кварца и мелкокристаллического кальцита мощностью 0,1–1 мм в количестве до 5–8% (рис. 2, в, г). Отмечены ромбические порфириобласты пирита размером до 1–1,2 мм. ОВ тонкое пылевидное или в виде мелких просечек (не более 0,1%).

Метаалевролиты фактически представляют собой тонкоплосчатые лепидо-гранобластовые тонко-микрокристаллические серицит-кварцевые сланцы, пропитанные черным изотропным ОВ. Текстура пород линзовидная, плейчатая, микроскладчатая, осложнена отдельными изолированными выделениями кварца, которые создают порфириобластовую или даже почти редкоочковую структуру. Породы сложены листочками серицита размером <0,005 мм (до 70–75%) и кристаллами гранобластового кварца (до 15%), который составляет линзовидные скопления размером 0,5–5 мм (рис. 2, а, б). Полосчатость породы обусловлена наличием линз светлого кварца и полосами, обогащенными черным ОВ. Мощность таких полос до 0,5 мм, они составляют до 40% породы, но видимых отличий в минеральном составе (кроме ОВ) в них нет.

ОВ представлено многочисленными просечками и прожилками линзовидной формы мощностью 0,01–0,05 мм, протяженностью 0,5–6 мм и более, ориентированными вдоль сланцеватости и по птити-

Таблица 2

Данные пиролитических исследований

№ образца	Глубина, м	Литология	S ₁ +S _{2a} масла и смолы, мг/г	S _{2b} асфальтены и продукты крекинга керогена, мг/г	S ₃ , мг CO ₂ /г породы	T _{max} , °C	ТОС, %	НІ, мг УВ/г ТОС	ОІ, мг CO ₂ /г ТОС	РС, вес. %	RC, вес. %	СС, %	NSO, мг/г	Битум, мг/г породы
13A	2278,06	метапесчаники тонкозернистые	0,11	0	0,08	—	0,1	90	80	0,01	0,09	0,7	1	1,11
1A	2280,07	метаалевролиты	1,17	0,57	0,16	—	0,33	258	48	0,16	0,17	8,69	2,46	3,63
14A	2280,27	метаалевролиты	1,79	0,88	0,05	415	0,4	250	12	0,23	0,17	7,53	2,77	4,56
15A	2285,63	метапесчаники	0,05	0,03	0,03	—	0,11	36	27	0,02	0,09	0,25	1,03	1,08
16A	2288,8	метапесчаники	0,03	0,02	0,05	—	0,21	10	24	0,01	0,2	0,32	2,24	2,27
17A	2289,01	метапесчаники грубозернистые	0,02	0,01	0,04	—	0,23	9	17	0	0,23	0,05	2,57	2,59
2A	2289,08	метапесчаники	0,03	0,01	0,07	—	0,04	50	175	0,02	0,02	0,93	0,24	0,26
18A	2294,7	метаалевролиты	0,05	0,02	0,04	—	0,06	67	67	0,01	0,05	0,33	0,58	0,63
19A	2297,23	метапесчаники	0,46	0,22	0,01	486	0,33	118	3	0,07	0,26	1,36	3,11	3,57
4A	2385,2	метаалевролиты	0,05	0	0,03	—	1,7	1	2	0,04	1,66	0,26	18,44	18,49
3A	2385,26	метаалевролиты углеродистые	0	0,01	0,04	487	0,31	3	13	0	0,31	0,07	3,45	3,45
5A	2385,8	метпесчаники среднезернистые	0	0,02	0,04	486	0,35	6	11	0,01	0,34	0,13	3,8	3,8
6A	2385,9	метаалевролиты	0,05	0	0,02	—	1,67	1	1	0,02	1,65	0,62	18,33	18,38
7A	2386,26	метаалевролиты	0,05	0	0,02	—	0,81	4	2	0,01	0,8	0,23	8,89	8,94
8A	2387,85	метаалевролиты	0	0	0,01	—	0,15	0	7	0,01	0,14	0,14	1,56	1,56
9A	2388,35	метаалевролиты углеродистые	0,03	0	0,02	—	0,77	1	3	0,01	0,76	0,08	8,44	8,47
10A	2389,7	метапесчаники	0	0,01	0	494	0,4	2	0	0,01	0,39	0,2	4,34	4,34
11A	2390,79	метаалевролиты	0,02	0	0	—	0,4	2	0	0,01	0,39	0,14	4,33	4,35
12A	2391,56	метаалевролиты	0,01	0	0	—	0,35	0	0	0,02	0,33	0,08	3,67	3,68
1B	2369,37	метаалевролиты углеродистые	0,03	0,02	0,18	—	0,15	13	120	0,01	0,14	3,46	1,57	1,61
2B	2372,73	метаалевролиты	0,04	0,02	0,06	—	0,6	5	10	0,01	0,59	0,13	6,58	6,62
3B	2372,75	метаалевролиты	0,31	0,16	0,25	—	0,88	28	28	0,05	0,83	5,68	9,38	9,69
4B	2373,11	метаалевролиты углеродистые	0,18	0,09	0,06	—	0,5	22	12	0,02	0,48	0,51	5,42	5,6
5B	2374,4	метаалевролиты углеродистые	1,09	0,54	0,07	454	4,71	18	1	0,14	4,57	0,05	51,32	52,41
6B	2374,73	метаалевролиты углеродистые	0,82	0,41	0,04	—	2,89	20	1	0,1	2,79	0,06	31,41	32,23
7B	2376,04	метаалевролиты углеродистые	1,59	0,78	0,13	—	1,73	103	8	0,2	1,53	0,12	17,78	19,37
8B	2376,48	метаалевролиты углеродистые	0,23	0,11	0,03	—	0,75	19	4	0,03	0,72	0,02	8,11	8,34
9B	2376,55	метаалевролиты	0,05	0,02	0,02	—	0,11	27	18	0,01	0,1	0,02	1,13	1,18
10B	2377,63	метаалевролиты	0,24	0,12	0,01	—	0,33	42	3	0,03	0,3	0,02	3,45	3,69
1B	2408,08	метаалевролиты углеродистые	0,31	0,15	0,1	—	1,76	13	6	0,04	1,72	0,15	19,26	19,57
12B	2408,73	метаалевролиты	0,22	0,11	0	—	1,73	10	0	0,04	1,69	0,24	18,89	19,11
13B	2409,72	метаалевролиты	0,18	0,09	0,02	446	1,51	10	1	0,02	1,49	0,17	16,64	16,83
14B	2409,93	метаалевролиты углеродистые	0,33	0,16	0,06	447	2,52	11	2	0,04	2,48	0,2	27,72	28,05

Примечания. ТОС — органический углерод, РС — пиролизуемый углерод, RC — остаточный углерод, СС — минеральный углерод. Образцы 1A–13A — из скв. 1A, образцы 1B–14B — из скв. 2B.

Таблица 3

Значения фильтрационно-емкостных свойств и УЭС изученных пород

Номер образца	Скважина	Глубина, м	K_n	$K_{пр}$, мД	УЭС _{100%} , Ом·м	УЭС _{ов} , Ом·м	УЭС _{сух} , Ом·м
1А	1А	2280,07	8,136	0,067	59,8391	161,52	542033,3
2А	1А	2289,08	1,748	0,041	172,4877	611,5773	1696800
3А	1А	2385,26	0,357	0,008	0,91	9,8833	1,227823
4А	1А	2385,2	0,365	0,106	0,792	8,2402	10,605
5А	1А	2385,8	0,28	0	67,7004	100,8948	123,9607
6А	1А	2385,9	0,289	0,001	0,2915	2,2445	1,649667
7А	1А	2386,26	0,259	0	0,2083	2,5953	1,649667
8А	1А	2387,85	0,214	0,001	781,1484	2955,29	131973,3
9А	1А	2388,35	0,341	0,024	9,7357	12,3104	13,90433
10А	1А	2389,7	0,365	0	80,6672	235,8468	136,6867
11А	1А	2390,79	0,281	0,001	849,7288	1713,427	1508267
12А	1А	2391,56	0,367	0,064	106,1032	117,968	148,47
1В	2В	2369,37	3,141	0,005	46,1951	74,6576	471333,3
2В	2В	2372,73	6,357	0,015	31,7647	45,6978	1767500
3В	2В	2372,75	2,285	0,003	—	4,3074	8,8375
4В	2В	2373,11	3,364	0,015	—	12,0792	16,16673
5В	2В	2374,4	4,636	0,004	20,1	0,0004	0,542033
6В	2В	2374,73	0,62	0	45	0,1012	0,8484
7В	2В	2376,04	4,557	0,005	—	0,4356	1,178333
8В	2В	2376,48	3,031	0,001	—	6,3657	5,773833
9В	2В	2376,55	2,996	0,003	43,3048	68,3845	106050
10В	2В	2377,63	4,858	0,007	48,6233	85,0124	54203,33
11В	2В	2408,08	0,576	0,002	38	0,0005	7,871267
12В	2В	2408,73	0,678	0,002	—	0,4674	3,417167
13В	2В	2409,72	0,62	0,008	1,94	4,0874	5,255367

Примечания. K_n — коэффициент пористости, $K_{пр}$ — коэффициент проницаемости, УЭС_{100%} — сопротивление 100%-но водонасыщенных образцов, УЭС_{ов} — сопротивление образцов при остаточной водонасыщенности, УЭС_{сух} — сопротивление высушенных образцов.

матитовыми прожилками вкрест к сланцеватости, визуально оно составляет от 1–2 до 10–12%.

Породы, вскрытые скважиной В, во всем изученном интервале (2372–2412 м) представлены милонитизированными тонкозернистыми терригенными образованиями: метапесчаниками, метаалевролитами и метааргиллитами. Преобладают метаалевролиты тонкозернистые гранолепидобластовые, неотчетливо полосчатые до сланцеватых.

Текстура сильно зависит от степени милонитизации и варьирует от однородной, очень неотчетливо полосчатой до сланцеватой, линзовидно-полосчатой. Широко развита плейчатость, иногда встречаются кварцевые прожилки малой мощности, деформированные в птитиматитовые складки. Породы смяты в складки, что хорошо заметно в изменении угла сланцеватости к оси керна от 90° (горизонтальная) до 40°.

Породы фундамента со структурным несогласием перекрыты разнообломочными конгломератами и галечниками юрского возраста. Под контактом отмечено развитие коры выветривания, что выражено в высветлении пород и интенсивной трещиноватости.

Породы фундамента однородны по составу, сложены агрегатом гранобластового кварца (размер кристаллов 0,008–0,05 мм) и листочков серицита и гидрослюд (0,008–0,04 мм) (рис. 2, д, е). Фиксируются выделения серовато-зеленого хлорита, который образует лепидобластовые гнезда размером не более 0,1–0,15 мм. Среди акцессорных минералов присутствует немногочисленный пирит, образующий ксеноморфные просечки вдоль сланцеватости длиной не более 0,5 мм. Доля минералов варьирует: кварц составляет от 20–22 до 50–55%, слюды от 10–15 до 50%, хлорит от 1–2 до 10–15%, пирит не более 1–3%. Эти колебания обуславливают изменения по разрезу от тонкозернистых кварцевых метапесчаников с серицитом до метаалевролитов и в единичных случаях почти бескварцевых серицит-гидрослюдистых сланцев (метааргиллиты).

Породы неравномерно насыщены черным изотропным ОВ, доля которого в шлифах оценивается от 0,1 до 35–40% (свыше 1/2 поля зрения непрозрачно). Интервалы, насыщенные ОВ, характеризуются наиболее интенсивным развитием сланцеватости и линзовидно-полосчатых текстур, из всего изученного интервала (13 м) на такие

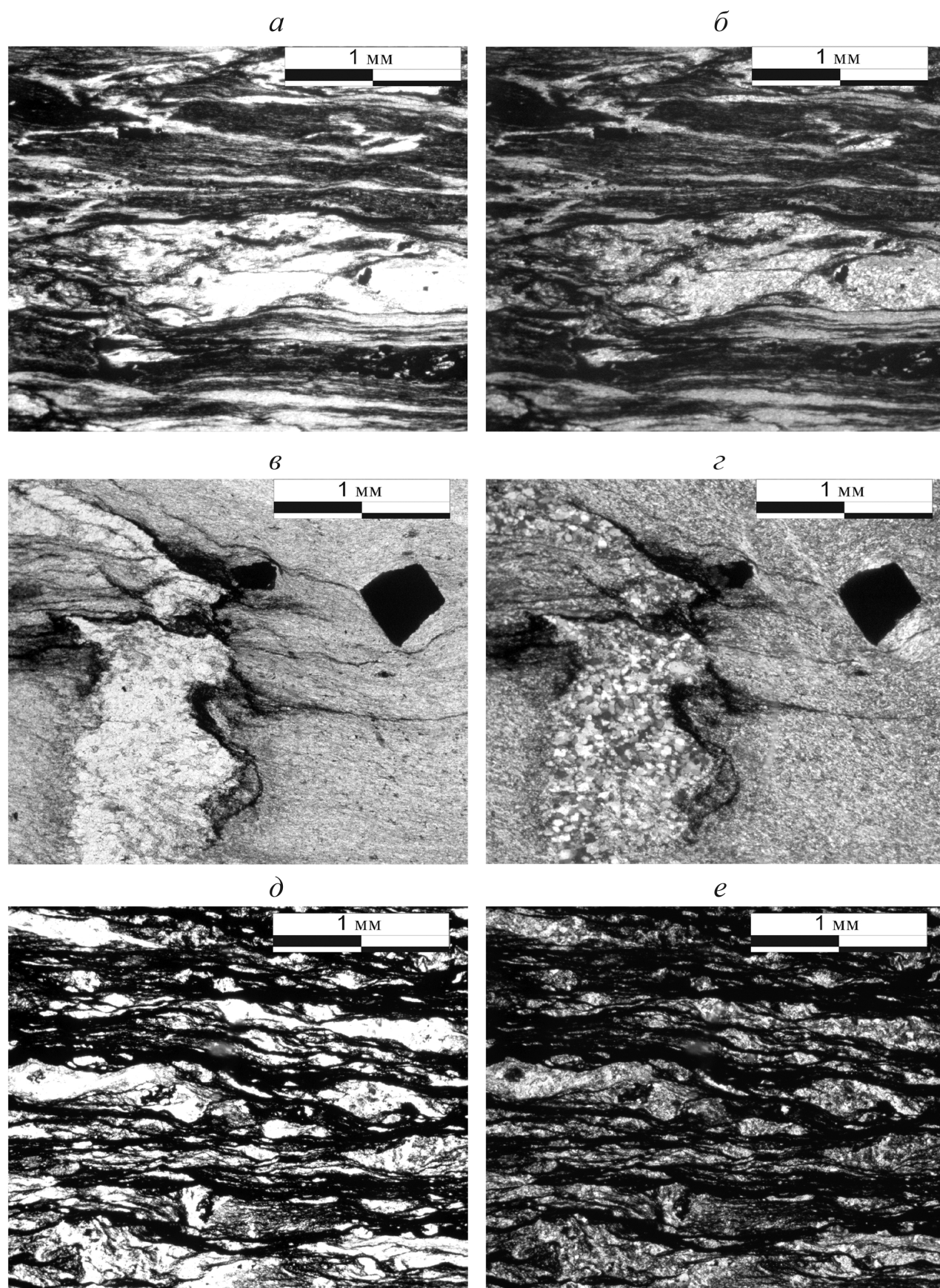


Рис. 2. Фото шлифов изученных пород: *а, б* — алевролиты песчаные с линзами гранобластового кварца, пропитанные черным ОВ, образец 4А, скв. А; *в, г* — тонкозернистые серицит-кварцевые песчаники с птитиматитовым прожилком гранобластового кварца и крупным ромбическим кристаллом пирита, образец 8А, скв. А; *д, е* — милонитизированные, линзовидно-полосчатые песчаные серицит-кварцевые алевролиты, с просечками и прожилками черного ОВ, образец 5В, скв. В; *а, в, г* — без анализатора, *б, г, е* — с анализатором

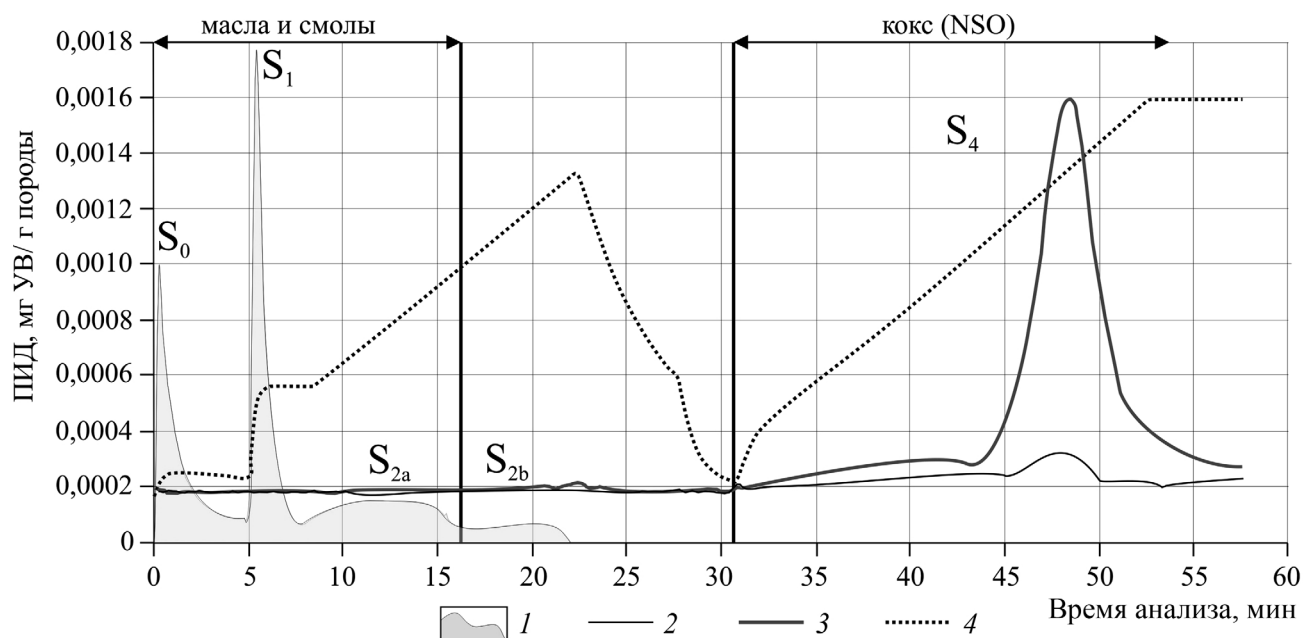


Рис. 3. Пример пирограммы образца из скв. А, глубина 2388,35 м, обр. 9А: 1 — ПИД (пламенно-ионизационный детектор); 2 — ИК CO_2 ; 3 — ИК CO ; 4 — температура печи

углеродистые, насыщенные ОВ разности приходится 50%.

Кроме того, были измерены физические свойства ($УЭС$, K_p , $K_{пр}$) следующих метасадочных и магматических пород фундамента из нескольких скважин Красноленинского свода (табл. 1):

- серицит-кварцевые сланцы с мусковитом и биотитом, хлоритом и турмалином мелко-тонкокристаллические, лепидогранобластовые, тонкополосчатые (11 образцов);
- гранодиориты средне-мелкокристаллические, массивные (29 образцов);
- сланцы серицит-гидрослюдисто-кварцевые гранолепидобластовые, тонкокристаллические, тонкополосчатые, плейчатые (19 образцов).

Эти породы не содержат ОВ, поэтому пиролитические исследования на них не проводились.

Физические свойства пород. Сопротивление водонасыщенных образцов (100% насыщения) метапесчаников, серицит-кварцевых сланцев, серицит-гидрослюдисто-кварцевых сланцев Красноленинского свода близкое и колеблется от 260 до 850 Ом·м. Близкими значениями характеризуются и гранодиориты, $УЭС_{100\%}$ которых составляет 280–967 Ом·м. Для кварцитов отмечены несколько большие значения $УЭС_{100\%}$ — от 977 до 7077 Ом·м. Метаалевролиты характеризуются самыми низкими значениями сопротивления из всех изученных пород: от 25 до 60 Ом·м при 100% водонасыщении.

Однако метаалевролиты и метапесчаники из скважин А и В обладают существенно более низким удельным электрическим сопротивлением при остаточном водонасыщении, чем все прочие породы (табл. 1).

Породы доюрского комплекса характеризуются более низкими значениями пористости и

проницаемости по сравнению с породами осадочного чехла. У метасадочных пород значения коэффициента пористости колеблются в интервале от 0,2 до 3–5 и в среднем составляют 1–2%. Метаалевролиты отличаются несколько большей пористостью со значениями K_p до 8,1%. Гранодиориты характеризуются близкими к метасадочным образованиям значениями K_p и варьируют от 1,9 до 5,3%.

Проницаемость метаморфических пород весьма низкая, значения коэффициента проницаемости у всех изученных образцов не превышают 0,62 мД, в среднем составляют 0,05–0,1%.

Состав органического вещества. Для оценки состава ОВ проанализирована коллекция, состоящая из 34 образцов из двух скважин (табл. 2).

Для образцов из скважины А получены разные характеристики для песчаных и алевролитовых разностей. В песчаниках фиксируются наиболее низкие значения ТОС — до 0,4 вес.% (в среднем 0,26 вес.%), при этом из основной массы выделяется очень малое количество ОВ (<0,1 мг ОВ/г породы). Однако в карбонатизированных разностях песчаников количество S_1+S_2 достигает 2,76 мг ОВ/г породы. Столь значительное остаточное количество $C_{орг}$ в песчаниках свидетельствует о сохранении в них миграционных ОВ, а S_2 относится преимущественно к тяжелым углеводородным соединениям, выкипающим при высокой температуре.

В темно-серых метаалевролитах гораздо больше органического углерода, его количество достигает 1,67 вес.%, но в основном за счет непиролизующего, остаточного углерода, определяемого на стадии окисления пиролитического анализа (рис. 3). Из-за низкой концентрации ОВ

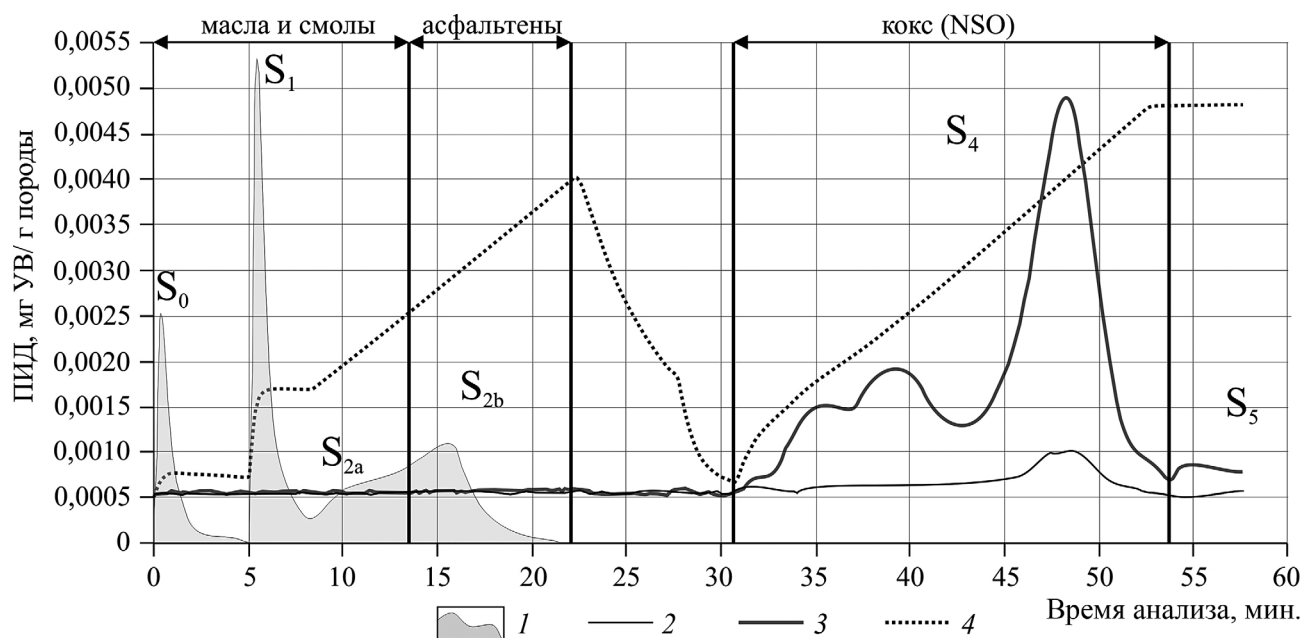


Рис. 4. Пример пирограммы образца из скв. В, глубина 2374,73 м, обр. 6В: 1 — ПИД (пламенно-ионизационный детектор); 2 — ИК CO_2 ; 3 — ИК CO ; 4 — температура печи

не удастся корректно определить температуру пика S_2 , которая в этом случае будет определять температуру плавления тяжелой нефтяной фракции (предположительно асфальтенов). Но для сравнения с образцами из второй скважины в табл. 2 мы привели несколько значений, которые составляют диапазон 486–494 °C T_{max} .

Среди образцов из скважины В пиролизом были исследованы только углеродистые метаалевролиты. Содержание ТОС здесь гораздо выше, варьирует от 0,11 до 4,71, в среднем составляет 1,44 вес.%. Соответственно, содержание ТОС увеличивается и количество пиролизуемых углеводородов достигает 2,37 мг УВ/г породы ($S_1 + S_2$) (табл. 2). На пирограммах также видно, что среди

УВ преобладают масла, смолисто-асфальтеновые компоненты детектируются двойными пиками S_{2a} и S_{2b} (рис. 4) [Баталин, Вафина, 2013]. Основная же доля органического углерода приходится на непиролизуемый углерод (на пирограмме фиксируется большой пик S_4 на стадии окисления). T_{max} составляет 446–454 °C. После экстракции хлороформом в образце уменьшились пики S_1 и S_2 , однако максимум пика S_2 остался на той же температуре. Судя по изменению пика S_2 практически в 4 раза, в образце присутствовали и растворимые смолисто-асфальтеновые компоненты (рис. 5).

Удельное электрическое сопротивление пород. Изначально нами была выдвинута наиболее очевидная гипотеза, что УЭС будет контролиро-

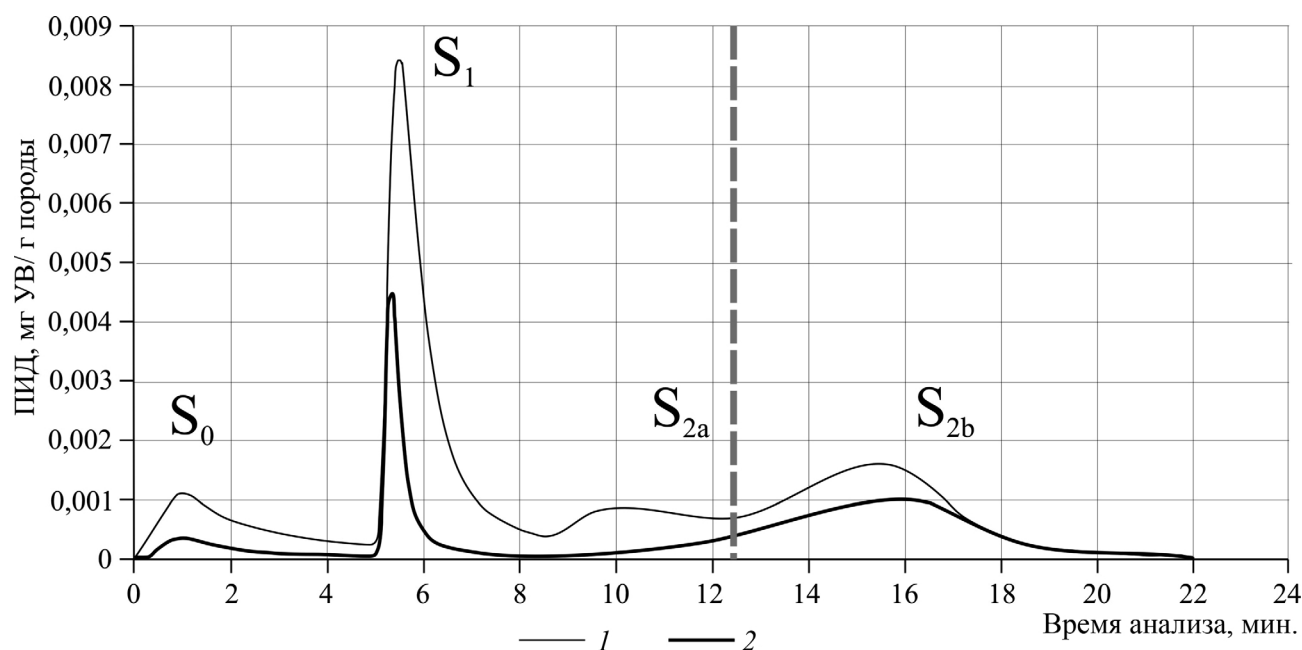


Рис. 5. Пирограмма образца 5В из скважины В до и после экстракции: 1 — до экстракции, 2 — после экстракции

ваться пористостью и проницаемостью пород за счет насыщения проводящим минерализованным флюидом. Действительно, для изученных пород обозначается отчетливая связь между сопротивлением и пористостью, особенно четкая для водонасыщенных пород: увеличение пористости от 0,2–0,3 до 10% приводит к снижению значений УЭС от 10^3 до 10 Ом·м (рис. 6, а). На том же графике видно, что у некоторых проб с высокой пористостью (5–10%) сопротивление после высушивания вырастает на 3–5 порядков — от 10 – 100 до 10^5 – 10^6 Ом·м. Очевидно, что у этих образцов низкое сопротивление контролируется водонасыщением. Однако есть пробы с низкими значениями сопротивления (1–10 Ом·м) и пористости (не более 1%), сопротивление которых не изменяется при насыщении флюидом и предположительно зависит от иных факторов.

С проницаемостью ситуация менее закономерная. При начальной интерпретации низкоомных интервалов по ГИС как «интервалов брекчирования» мы ожидали, что породы будут сильнотрещиноватыми и предполагали наличие повышенной проницаемости. Но проницаемость изученных пород не превышает 0,6–0,8 мД, и ожидавшаяся отрицательная связь со значениями УЭС не обнаружена (рис. 6, б).

Поэтому нами было высказано предположение, что на УЭС влияет состав минеральной матрицы. Для выяснения связи минерального состава пород и сопротивления проанализированы данные о содержании кварца (высокоомный компонент), пирита (низкоомный) и суммы глинистых минералов (гидрослюды, хлориты, каолинит и смешанослойные минералы группы монтмориллонита, низкоомный компонент) — именно эти компоненты порообразующие и составляют каркас пород. По результатам рентгенофазового анализа (РФА) и изучения шлифов в породах также отмечены сидерит, кальцит, доломит, гипс, полевые шпаты, турмалин, мусковит. Но так как зафиксированы эти минералы только в отдельных образцах в незначительном количестве, то в дальнейших обсуждениях они не упоминаются.

Количество глинистых минералов в изученных породах фактически не влияет на электрическое сопротивление пород: зависимость значений сопротивления от количества глинистых минералов не обнаружена (рис. 6, в). Из всех глинистых минералов монтмориллониты обладают наибольшей сорбционной способностью и могут за счет этого значительно увеличивать проводимость пород. Минералы группы гидрослюд также способствуют увеличению проводимости пород [Мельник, 2018], но в исследуемых породах монтмориллониты не обнаружены вовсе, а определяемые РФА «гидрослюды» вполне могут быть ближе к серицитам, чем к полноценным гидрослюдам, что подтверждается их оптическими характеристиками в шлифах. В ре-

зультате в неветрелых метаосадочных толщах фундамента эта группа минералов не привносит значительный вклад в увеличение проводимости горных пород.

Не обнаружена и связь между УЭС и содержанием пирита. В образцах, где количество пирита более 2–5%, УЭС всех типов остаются такими же, как и в образцах с количеством пирита ниже предела обнаружения — $<0,5\%$ (рис. 6, г). Мы считаем, что так как пирит в породе образует изолированные одна от другой линзовидные просечки (это хорошо видно в шлифах), то он не оказывает значительного влияния на проводимость. Эффект был бы замечен только в том случае, если бы просечки соприкасались между собой и формировали бы проводимые жилки и зоны.

Содержание кварца имеет слабую положительную связь с УЭС пород: при увеличении количества кварца с 10 до 70–80% сопротивление увеличивается на порядок (рис. 6, е). Это хорошо коррелирует с данными изучения шлифов: максимальные значения сопротивления у кварцевых песчаников и кварцевых алевролитов с невысокой долей серицит-гидрослюдистого матрикса и резким преобладанием аркозового компонента. Минимальные же значения УЭС у тонкозернистых алевролитов с большой долей серицит-гидрослюдистого матрикса и у метааргиллитов.

Гораздо более интересной оказалась ситуация с зависимостью УЭС от количества ОБ (рис. 6, д). Как хорошо заметно, при увеличении количества ТОС от 0,1–0,2 до 5% происходит уменьшение значений УЭС всех типов на 3 порядка и более. Несмотря на то что отчетливая связь между фильтрационно-емкостными свойствами и сопротивлением пород прослеживается (рис. 6), образцы с наиболее низким УЭС не самые пористые (K_p до 0,7%) и имеют крайне низкие значения проницаемости ($K_{пр} < 0,01$ мД), т.е. эти низкие значения сопротивления связаны именно с высоким содержанием ОБ, а не с фильтрационно-емкостными свойствами, количеством пирита, обилием глинистых минералов или иными параметрами.

Выявленная зависимость совершенно неожиданная, так как насыщение органическим веществом обычно приводит к увеличению сопротивления, за счет чего и выделяются нефте- и водонасыщенные интервалы (см. обзор в начале статьи). Например, для пород баженовской свиты известны четкие положительные зависимости между количеством ОБ и УЭС [Скворцов и др., 2018].

Выявленная связь подтверждается и данными изучения шлифов. Наиболее проводимыми оказываются метаалевролиты и тонкозернистые метапесчаники с сланцеватыми линзовидно-полосчатыми текстурами, наполненные черным непрозрачным органическим веществом (рис. 2, а, б и д, е). Мы считаем, что повышенную проводи-

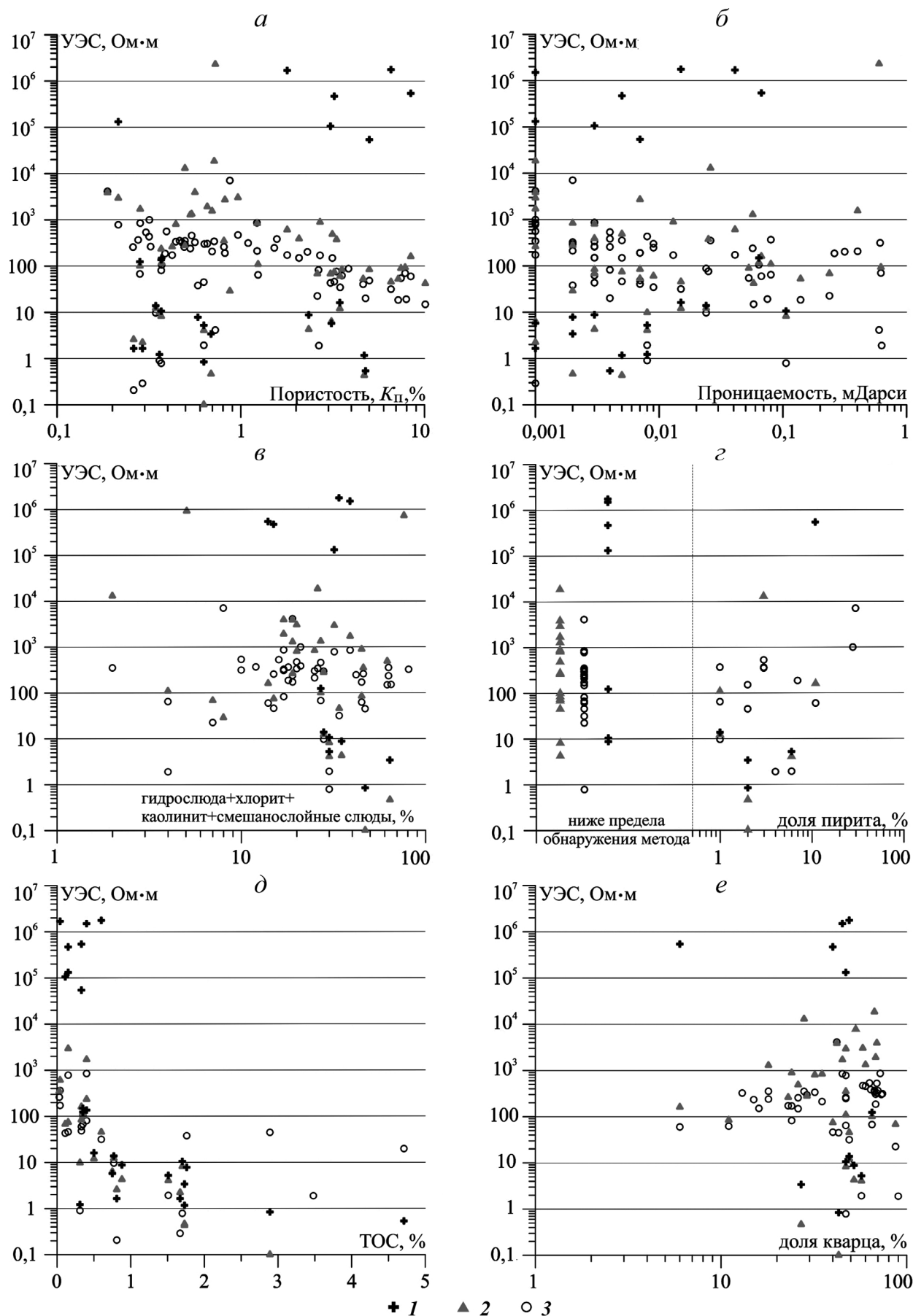


Рис. 6. Зависимость УЭС разного типа от фильтрационно-емкостных свойств пород, количества органического углерода (ТОС), пирита, кварца и глинистых минералов (в масс. %): 1 – УЭС пород после высушивания; 2 – УЭС пород при остаточной водонасыщенности; 3 – УЭС пород при 100%-ном водонасыщении

мость создает органическая составляющая пород, представленная протяженными линзочками и просечками, часто сливающимися в единые слои, обеспечивающие проводимость по всему объему породы. В принципе такой эффект мог бы создать и пирит, но его выделения короткие, разрозненные и не соединяются в единые проводящие системы.

Таким образом, установлено, что УЭС в изученных метаосадочных толщах регулируется пористостью (увеличение пористости — уменьшение сопротивления) за счет насыщения водным проводящим флюидом, а также количеством ОВ (увеличение доли ОВ — уменьшение сопротивления).

Объединение результатов литологических и пиролитических исследований позволяет утверждать, что ОВ исследованных пород представлено природным пиробитумом, полученным в процессе термических реакций, в результате которых вытесняются более легкие углеводороды и остается нерастворимый, богатый углеродом остаток. По пирограммам можно отметить очень высокие значения температуры сгорания кокса на стадии окисления (пик S_4), близкие для образцов из обеих скважин. По температуре испарения среди углеводородов в низкотемпературной области можно выделить масла и тяжелые части нефти (предположительно смолы), а в высокотемпературной области — асфальтены (рис. 3, 4), что подтверждено дублированием анализа по программе РЕЗЕРВУАР и разделением пика S_2 на S_{2a} и S_{2b} .

Образцы метаалевролитов из скважины А характеризуются практически полным отсутствием высокотемпературного пика S_2 (рис. 2), что указывает на высокую степень преобразованности ОВ. Битум можно диагностировать как «антраксолит», подверженный сильной термической переработке [Филиппов, 2013; Меленевский и др., 2008]. Это подтверждается тем, что его не удалось растворить в хлороформе, а также атомными отношениями Н/С, равными 0,48 (С 3,95 вес.%; Н 0,16 вес.%; N 0,07 вес.%) Рост уровня термической преобразованности органического вещества сопровождается увеличением значения температуры $T_{\max}$. Однако в этой же скважине, в верхней части доюрского фундамента, карбонатизированные песчаники оказываются насыщены углеводородами с достаточно высоким водородосодержанием. Видимо, в верхней части породы не так сильно преобразованы. Битум из отложений скважины В содержит растворимую часть и нерастворимый остаток и, по-видимому, не был подвержен столь сильной термической переработке, как образцы из скважины А (рис. 3, 4). В пиролизируемой части здесь фиксируется как углеводородная составляющая, так и гетероатомные соединения нефтяного ряда, представленные растворимыми асфальтенами. Этот битум уместнее назвать альбертитом (керитом) [Филиппов, 2013] с низким содержанием масляной фракции и частичной растворимостью в

хлороформе. Атомное отношение Н/С равно 0,95 (С 4,4 вес.%, Н 0,35 вес.%, N 0,18 вес.%).

Пиролиз тяжелых компонентов природного битума (преимущественно асфальтенов) всегда сопровождается образованием кокса, и по количеству выделившихся УВ, СО и СО₂ можно оценить количество битума в мг на г породы (табл. 2). Максимальное количество среди образцов исследованных пород — 52 мг битума/г породы — зафиксировано в скв. В.

Таким образом, в обеих скважинах по пиролитическим данным обнаруживаются битумы ряда антраксолитов и альбертитов (керитов), что свидетельствует о достаточно высокой преобразованности ОВ. Битумы частично растворимы в органических растворителях, но основная их часть представлена черным углеродистым веществом — твердым нефтяным коксом, претерпевшим значительную термическую переработку. Нерастворимый битум из метаалевролитов скважины А представлен антраксолитами, которые были преобразованы до стадии апокатагенеза и практически не содержат водород. Наименее преобразовано ОВ из отложений, вскрытых скв. В, — степень катагенеза этих битумов, представленных керитами, скорее всего, можно оценить на уровне МК₃–МК₄.

Высокая степень преобразованности ОВ фиксируется и оптическими методами. В скрещенных николях ОВ не черное и изотропное, каким должно быть в неструктурированном состоянии, а тонкочешуйчатое с погасанием отдельных чешуй. Исчезновение оптической изотропности вещества связано с постепенным упорядочиванием структуры при прогреве, что и обеспечивает возникновение проводимости. Предельным случаем дальнейшего преобразования ОВ будет графит, у которого табличное значение УЭС составляет $8 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Но даже преобразование до стадии антраксолитов приводит к значительному уменьшению значений УЭС: так, для шунгинского антраксолита оно равно $2,18 \cdot 10^{-4}$ Ом·м [Шунгиты..., 1975].

Частично ОВ уже преобразовано в графит, что подтверждается данными рамановской спектроскопии. В разных зернах были получены воспроизводимые спектры с интенсивными линиями с центрами на 1347, 1584 и 2697 см⁻¹ (рис. 7), которые соответствуют графиту [Reich, Thomsen, 2004].

Крекинг нефти, который мог привести к образованию подобных битумов, происходит в природных условиях при подъеме температуры как минимум до 150 °С, например, за счет прогрева интрузивного тела [Меленевский и др., 2008]. Мы предполагаем, что уменьшение степени преобразованности ОВ в породах скв. А снизу вверх можно объяснить термальным воздействием расположенного рядом крупного Каменного гранитного плутона.

Исследованные породы представляют собой чередование относительно более грубозернистых

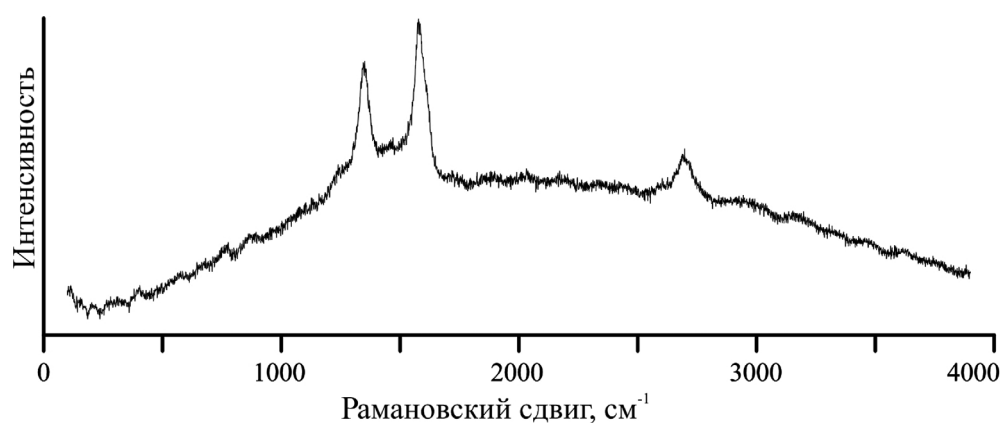


Рис. 7. Спектр рамановского сдвига для образца углеродистого метаалевролита из скв. А

метапесчаников и тонкозернистых метаалевролитов, неравномерно насыщенных углеродистым веществом. Изученные битумы — продукт преобразования первичного ОВ, содержавшегося в алевролитах и более тонкозернистых разностях, которые фактически были нефтематеринскими породами. Признак, указывающий на то, что органическое вещество в породах было первично-осадочным (а не представлено углеводородами, мигрировавшими извне), — приуроченность ОВ к тонкозернистым метаалевролитам и метааргиллитам. Если бы УВ насыщало коллектор, то оно с большей вероятностью сконцентрировалось бы в более грубозернистых метапесчаниках.

Таким образом, мы предполагаем, что изученный объект представляет собой метаморфизованную нефтяную систему, состоящую из переслаивающихся нефтематеринских и нефтесодержащих пород, с наибольшей концентрацией ОВ в тонкозернистых метаосадочных углеродистых толщах.

Наличие коры выветривания предъюрского возраста указывает на то, что к моменту выхода на поверхность этих пород (триас или начало юры) залежь уже была сформирована и метаморфизована. Предполагая — по аналогии со схожими породами фундамента Ем-Еговской вершины — девонско-каменноугольный возраст для изученных пород, можно ограничить период формирования залежи каменноугольно-триасовым временем. Если верно предположение о преобразовании ОВ за счет контактового воздействия массива, то это означает ранепермское время метаморфизма, так как Каменный массив внедрился в ассельско-сакмарское время [Иванов и др., 2018].

Поле развития подобных углеродистых толщ достаточно велико. По нашим данным, углеродистые серицит-кварцевые сланцы с прослоями песчаников и реже карбонатов встречаются в фундаменте Ем-Еговской вершины, восточного склона Каменной вершины, Водораздельного прогиба и Елизаровского склона.

Выводы. 1. Удельное электрическое сопротивление в изученных метаосадочных породах Красноленинского свода контролируется всего двумя параметрами. Первый из них — пористость пород,

влияние которой связано с заполнением порового пространства проводящими флюидами. Значимое влияние проницаемости, как основного параметра трещиноватости пород, не обнаружено: с ростом $K_{пр}$ практически не происходит изменение уровня сопротивления.

2. Впервые зафиксирована отчетливая отрицательная связь УЭС с содержанием ОВ (корреляция по ТОС). По степени влияния на значения сопротивления пород этот фактор сопоставим с влиянием уровня пористости: увеличение доли ТОС в породах на 0,5% приводит к падению сопротивления в 1000 раз.

4. Антракосолиты в изученных образцах имеют очень высокую степень преобразованности (апокатагенез) и предположительно соответствуют «разупорядоченному» графиту по структуре, за счет чего и возникает столь высокая электрическая проводимость пород.

5. Полученные закономерности позволяют утверждать, что в описанном случае зоны низкого сопротивления горных пород фундамента возникают не за счет высокой пористости и водонасыщения, а за счет наличия проводящих высокопреобразованных битумов. Это означает, что при интерпретации данных ГИС некорректно однозначно определять низкоомные интервалы в фундаменте как зоны дробления или повышенной трещиноватости, необходимо учитывать и состав пород, и вероятность такой битуминозной пропитки.

6. Изученный объект представляет собой метаморфизованную нефтяную систему в метаосадочных толщах, состоящих из переслаивания нефтематеринских и нефтесодержащих пород. Источником углеводородов, сейчас представленных битумами, было первичное ОВ из аргиллитов и алевролитов, в настоящее время выраженных метаалевролитами и метааргиллитами. Преобразование ОВ произошло, возможно, в результате контактового метаморфизма на границе с Каменным интрузивным массивом.

Благодарности. Авторы благодарны Д.А. Ксенофонтову, В.С. Щербакову, А.Ю. Бычкову (МГУ имени М.В. Ломоносова) за обсуждение проблем-

ных вопросов исследования и помощь при анализе результатов, а также И.А. Мельнику (ИШПР НИ ТПУ, Томск) за предоставление авторских статей по теме исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баталин О.Ю., Вафина Н.Г. Формы захвата свободных углеводородов керогеном // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10. С. 418–425.

Бочкарев В.С., Брехунцов А.М. Схема тектоники Урало-Сибирского региона // Горные ведомости. 2015. № 10. С. 6–39.

Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Чувашев Б.И. и др. Новые определения абсолютного возраста цирконов U-Pb системы из риолитов туринской серии — индикатора смены режима развития Урала // Горные ведомости. 2013. № 3. С. 6–28.

Гусев С.И. Анализ причин, приводящих к снижению удельного электрического сопротивления продуктивных коллекторов // Нефтепромысловое дело. 2016. № 5. С. 36–40.

Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях юго-востока Западно-Сибирской плиты // Изв. ТПУ. 2006. Т. 309, № 6. С. 23–26.

Западная Сибирь // Геология и полезные ископаемые России. Т. 2. / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 477 с.

Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. Возраст и состав гранитоидов из фундамента Красноленинского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) // Изв. УГГУ. 2018. Вып. 2 (50). С. 7–14.

Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогеносыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–54.

Лопатин Н.П., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геологии. М.: Наука, 1987. 143 с.

Меленевский В.Н., Борисова Л.С., Тимошина И.Д. Пиролитическая характеристика твердых битумов ряда кериты — антраксолиты // Геология нефти и газа. 2008. № 4. С. 40–45.

Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // Геология нефти и газа. 2018. № 6. С. 33–40.

Мельник И.А., Ерофеев Л.Я. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение // Геологическое моделирование. 2014. № 3. С. 46–50.

Семенов В.В., Мельник И.А., Питкевич В.Т. и др. Исследование низкоомных коллекторов с использова-

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

нием данных кернового материала // Геофизика. 2006. № 2. С. 42–47.

Скворцов М.Б., Дахнова М.В., Копилевич Е.А. и др. Методологические подходы к оценке ресурсов нефти в отложениях баженовской свиты // ГЕОЕВРАЗИЯ-2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. М., 2018. С. 120–124.

Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 143 с.

Тугарева А.В., Мороз М.Л., Чернова Г.А., Белова Е.В. Гранитоидный магматизм в пределах Фроловской мегавпадины Западной Сибири // Изв. вузов. Нефть и газ. 2018. № 6. С. 33–40. DOI:10.31660/0445-0108-2018-6-33-44.

Федоров Ю.Н., Иванов К.С., Ерохин Ю.В. и др. Гранитоиды приуральского региона Западной Сибири // Горные ведомости. 2006. № 12. С. 32–49.

Филиппов М.М. Антраксолиты. СПб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2013. 296 с.

Хотылев А.О., Майоров А.А., Худолей А.К. и др. Гранитоидные массивы Красноленинского свода в Западной Сибири: состав, строение, возраст и условия формирования // Геотектоника. 2021. № 2. С. 70–93. DOI: 10.31857/S0016853x21020053.

Чувашев Б.И., Бочкарев В.С., Брехунцов А.М. Морской девон на севере Западной Сибири // Докл. РАН. 2009. Т. 429, № 2. С. 234–237.

Шадрина С.В. Состав, строение, возраст пород доюрского основания северо-восточного обрамления Красноленинского свода // Геология нефти и газа. 2018. № 4. С. 27–33. DOI 10.31087-0016-7894-2018-4-27-33.

Шадрина С.В., Кондаков А.П. Новые данные о фундаменте северо-восточного обрамления Красноленинского свода // Геология и геолого-разведочные работы. 2014. № 11. С. 94–99.

Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования / Ред. В.А. Соколов, Ю.А. Калинин. Петрозаводск, 1975. 240 с.

Lafargue E., Espitalie J., Marquis F., Pillot D. Rock-Eval 6 Application in Hydrocarbon Exploration, Production and in Soil Contamination Studies // Rev. de l'Institut Français du Pétrole. 1994. Vol. 53, N 4. P. 421–437.

Reich S., Thomsen C. Raman spectroscopy of graphite // Philosophical Transactions of the Royal Soc. of London. Ser. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004. Vol. 362 (1824). P. 2271–2288.

Поступила в редакцию 26.01.2021

Поступила с доработки 28.01.2021

Принята к публикации 29.01.2021