

9 (124) сентябрь 2014

ГОРНЫЕ ВЕДОМОСТИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ТРИАСОВЫМ ОТЛОЖЕНИЯМ
СЕВЕРО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**ОСОБО ОХРАНЯЕМЫЕ ПРИРОДНЫЕ ТЕРРИТОРИИ
ПРИУРАЛЬСКОГО РАЙОНА И ИХ РОЛЬ
В СОХРАНЕНИИ БИОРАЗНООБРАЗИЯ
РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО МИРА**

**ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ
ТЮМЕНСКОГО СЕВЕРА**

*«Богатство неср
есть залог величия державы»*
M.B. Ломоносов

СПЕКТРЫ ЯМР РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОРОД, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ БАЖЕНО-АБАЛАКСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М.Ю. Зубков, А.Г. Потапов

ООО «ЗапСибГЦ», г. Тюмень, ZubkovMYu@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Приведены спектры ЯМР различных литологических типов пород, входящих в состав баженовской и абалакской свит. Выявлены и объяснены причины расхождения в значениях пористости, определенных с помощью ЯМР-релаксометра и весовым методом. Рассмотрены особенности спектров ЯМР пород-коллекторов и неколлекторов, входящих в состав баженовской свиты. Предложена модель «двойной пористости» в глинистых минералах и понятие «твёрдых растворов» углеводородов в битумах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Баженовская и абалакская свиты, литологические типы пород, пористость, спектры ЯМР, время поперечной релаксации, пиролиз.

NMR SPECTRA OF DIFFERENT ROCK TYPES COMPOSING BAZHENOV-ABALAK UNIT IN THE WESTERN SIBERIA

M.Yu. Zubkov, A.G. Potapov

ZapSibGC, LLC, Tyumen, ZubkovMYu@mail.ru

ABSTRACT

NMR spectra of different lithological rock types composing Bazhenov and Abalak formations are demonstrated. Reasons of difference between porosity values defined by NMR-relaxometer and by weight method are identified and explained. Peculiarities of NMR spectra of reservoir and non-reservoir rocks composing Bazhenov formation are examined. Clay mineral “dual porosity” model and the concept of hydrocarbon solid solutions in bitumen have been suggested.

KEY WORDS

Bazhenov and Abalak formations, lithological rock types, porosity, NMR spectra, transverse relaxation rate, pyrolysis.

ВВЕДЕНИЕ

Отнесение углеводородных залежей, содержащихся в верхнеюрском бажено-абалакском комплексе, к разряду трудноизвлекаемых с вытекающими из этого факта налоговыми льготами вновь привлекло внимание нефтегазодобывающих компаний к этим отложениям. Однако до настоящего времени не разработаны общепринятые методики выделения коллекторов в верхнеюрском разрезе и оценки их емкостных свойств [6]. В этой связи следует отметить, что в последнее время наблюдается интенсивное развитие метода ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в сильном поле, позволяющего производить определение не только величины пористости в различных типах коллекторов, но и оценивать распределение пор, присутствующих в них, по размерам [1, 2, 4, 5, 7–9].

Логично предположить, что ЯМК может оказаться полезным при выделении продуктивных интервалов в разрезе бажено-абалакского комплекса. Однако никто из специалистов, занимающихся проблемами нефтегазоносности рассматриваемых отложений, не проводил целенаправленных исследований ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) спектров образцов различных литологических типов пород, слагающих верхнеюрские отложения, для оценки возможности использования этого метода при определении их емкостных свойств. Целью настоящей публикации является анализ спектров ЯМР различных литологических типов пород, входящих в состав верхнеюрских отложений, в лабораторных условиях, включая как разновидности, не являющиеся коллекторами, так и таковые, имеющие прямые признаки нефтенасыщения.

МЕТОДЫ И ОБЪЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой для публикации послужили результаты литолого-петрофизических и геохимических исследований 39 образцов, взятых из отложений баженовской и абалакской свит в пределах Каменной и Пальяновской площадей, а также Тортасинского ЛУ.

Изучение вещественного состава отобранных образцов осуществлялось с помощью рентгено-структурного анализа (PCA), оптической и электронной (РЭМ) микроскопии, а также с использованием геохимических методов — пиролиза (Рок-Эвал) и анализатора органического углерода (Сорг) «АН-7529М». Спектры ЯМР получены на релаксометре «Хроматэк Протон 20М». Для определения величины объемного водородсодержания в образцах использовались кривые поперечной релаксации (T_2).

Образцы, отобранные из бажено-абалакского комплекса Каменной площади, после получения

первоначального (предварительного) спектра ЯМР в воздушно-сухом состоянии подвергались термической обработке в течение 6 часов (сначала в реторте при температуре 180 °C, а затем в сушильном шкафу при 250 °C). После каждого этапа термообработки снимался спектр ЯМР с оставшимися в образцах водородсодержащими флюидами. После этого получались спектры ЯМР образцов, полностью насыщенных сначала керосином, а затем водой. Кроме того, для сравнения определялась пористость тех же образцов весовым методом, как по керосину ($K_p_{кер}^{вес}$), так и по воде ($K_p_{вода}^{вес}$).

Использование реторты позволило определить объемы воды (H_2O) и углеводородов (УВ), выделившихся из образцов при 180 °C, которые обозначены нами как $V_p_{H_2O}$ и $V_p_{УВ}$ соответственно (объемы измеряются в мл). Потери веса образцов после их сушки в сушильном шкафу при 250 °C обозначены как M_c (потери веса измеряются в г).

По результатам пиролиза определены содержания низкотемпературных УВ (пик S_1 на пирограмме) и высокотемпературных УВ (пик S_2^1 и S_2 на пирограммах), причем как в сантиметрах кубических, так и в объемных процентах (от объема исследованных образцов). Их объемы обозначены как V_{S_1} и V_{S_2} соответственно. Низкотемпературные УВ в первом приближении соответствуют преимущественно керосиновой фракции нефти. Высокотемпературные УВ входят в состав масляной фракции и также выделяются вследствие термокрекинга битумов и керогена. Содержание органического вещества (ОВ) приводится в весовых процентах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предваряя обсуждение полученных результатов исследования спектров ЯМР, обратим внимание на то, что употребление понятия «пористость» по ЯМР ($K_p_{ЯМР}$) не вполне корректно, так как на самом деле с помощью релаксометра определяется не собственно пористость образцов, а суммарное объемное содержание водорода, входящего в состав флюидов, насыщающих тот или иной образец. Далее мы увидим, что высушивание образцов по стандартной методике (при 105 °C) не позволяет полностью освободить их от присутствующих в них водородсодержащих флюидов, поэтому, донасыщая их, например, водой или керосином, мы получаем завышенные значения пористости по данным ЯМР по сравнению с весовым методом.

Особенно большие ошибки получаются при исследованиях с помощью ЯМР глинистых образцов и образцов, содержащих в себе жидкие УВ, как, например, битуминозных отложений

баженовской свиты. Напротив, как мы увидим ниже, образцы, в которых присутствуют смешаннослойные образования с набухающими пакетами в их составе, обладают специфическими свойствами. Они заключаются в том, что молекулы водородсодержащих флюидов, попадая в межслоевое пространство этих глинистых минералов, настолькоочно прочно удерживаются ими, что время релаксации атомов водорода, входящих в их состав, становится коротким и не фиксируется прибором, поэтому значения пористости этих образцов, полученные весовым методом, оказываются выше, чем величина «пористости», полученная с помощью ЯМР. Тем не менее, учитывая вышесказанное, мы для краткости используем понятие «пористость» по ЯМР, обозначив его как $K_{\text{ПЯМР}}$.

Прежде чем приступить к анализу полученных спектров ЯМР, сделаем некоторые замечания по поводу особенностей наименования литологических типов пород, входящих в состав баженовской и абалакской свит, так как в настоящее время отсутствует общепринятая классификация этих пород. Для этого за основу возьмем принцип преобладающих компонентов, слагающих их, включая также и органические остатки, если они также являются породообразующими, например: пирит-керогеновый аргиллит или карбонатный радиолярит или, наконец, фосфоритовый копролит.

В состав отложений баженовской свиты входят преимущественно аутигенные, в том числе биогенные, компоненты, такие как органическое вещество (кероген, битум), кремнезем, пирит, фосфаты (ихтиодетрит), копролиты (карбонатного, фосфатного состава), карбонаты (кальцит, доломит), а также терригенный материал (мелкоалевритовые обломки кварца, альбита, слюды, а также гидрослюды и другие глинистые минералы).

Абалакская свита (в верхней части), так же как и баженовская, сложена преимущественно аутигенными, в том числе и биогенными, компонентами. Однако по направлению к подошве в ее составе начинают преобладать терригенные обломки глинистой и алевритовой размерности с маломощными карбонатными пропластками, имеющими аутигенное, скорее всего хемогенное, происхождение.

Наиболее многочисленная коллекция образцов отобрана из верхнеюрских отложений Каменной площади, однако все они не являются коллекторами, так как имеют низкую открытую пористость и практически непроницаемы. Среди образцов, поднятых из битуминозных отложений баженовской свиты в пределах этой площади,

можно условно выделить три основных литологических типа:

- слабокремнистые кероген-пиритовые аргиллиты, характеризующиеся сравнительно невысоким содержанием в них ОВ (8–10 %) и высоким содержанием пирита (16–18 %);
- кремнистые пирит-керогеновые аргиллиты с высоким содержанием ОВ (18–20 %) и пирита (20–22 %);
- карбонатные радиоляриты с низким содержанием ОВ (2–4 %) и пирита (1–3 %).

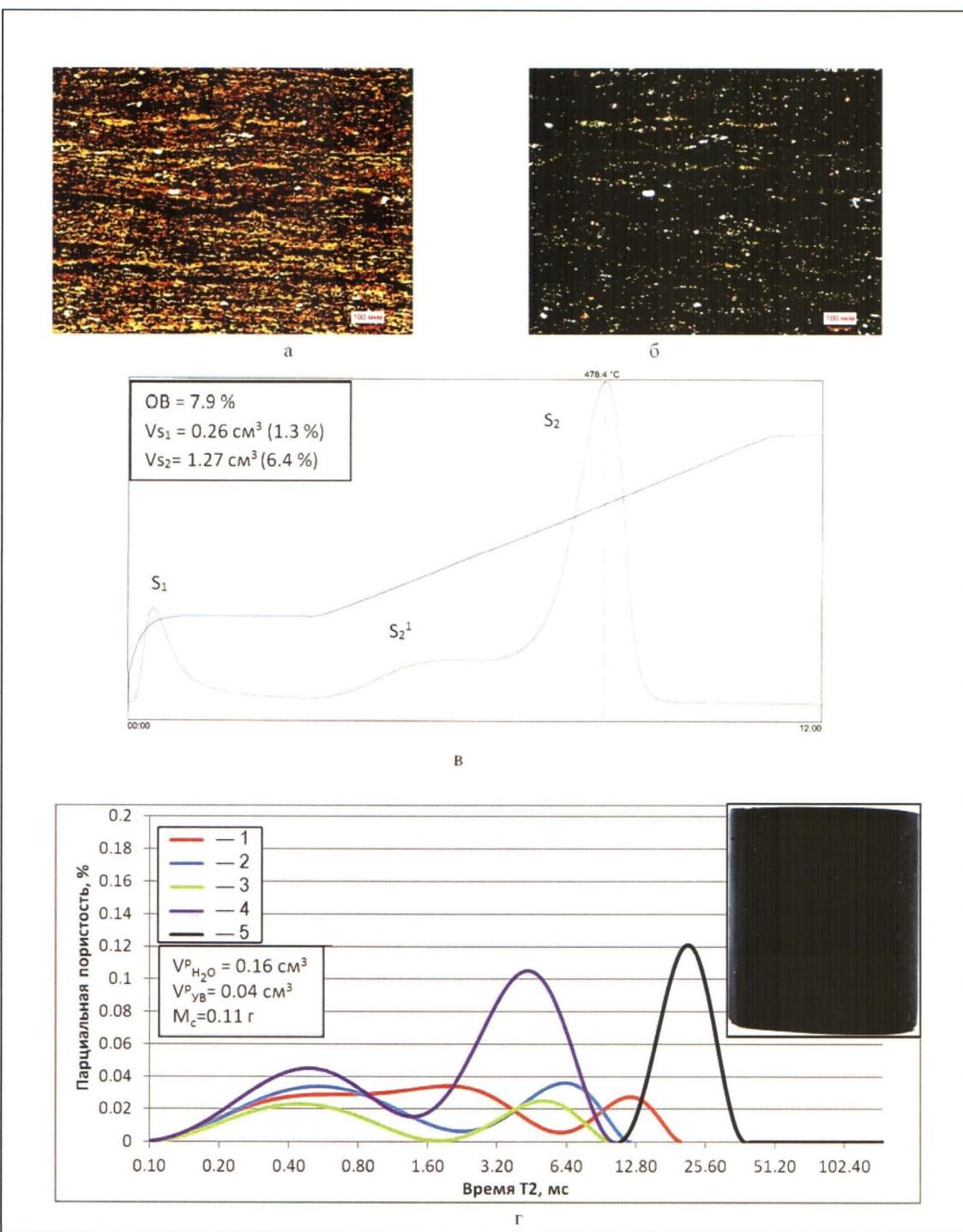
Образцы, отобранные из абалакской свиты Каменной площади, представлены двумя литологическими типами:

- карбонатно-алевритовыми аргиллитами с низким содержанием ОВ (2–3 %) и средним содержанием пирита (4–6 %);
- алеврит-глауконитовыми аргиллитами с еще более низким содержанием ОВ (1–2 %) и более высоким содержанием пирита (8–10 %).

Анализ спектра ЯМР слабокремнистого кероген-пиритового аргиллита (рис. 1а, 1б) показал, что в результате термического воздействия на него сначала в реторте, а затем в сушильном шкафу происходит закономерное уменьшение величины объемного водородсодержания в нем (рис. 1г). Если в воздушно-сухом состоянии объемное водородсодержание в рассматриваемом образце, которое с принятыми выше оговорками мы для краткости обозначили как $K_{\text{ПЯМР}}$, составляло 5.27 %, то после реторты уже стало равным 2.99 %, а после сушки — всего 1.49 % (см. рис. 1г).

Сопоставление объемов воды и УВ, выделяющихся из образцов в реторте (вследствие протекания процессов термодистилляции), с одной стороны и изменение значений $K_{\text{ПЯМР}}$ до и после реторты с другой показывает, что величина уменьшения $K_{\text{ПЯМР}}$ в 1.4–2.5 раза больше, чем суммарный объем выделяющихся из образцов воды и УВ. При условии если допустить, что отмеченные несовпадения связаны не только с погрешностями измерений, расчетов и возможными потерями флюидов в ловушках реторты, то в процессе температурного воздействия на образец часть водородсодержащих флюидов, не удаляясь из образца, переходит в высоковязкое состояние и не фиксируется с помощью релаксометра. Следует отметить, что воды в процессе термодистилляции образцов выделяется гораздо больше (в 2–5 раз), чем УВ (см., например, рис. 1г). Скорее всего, основная часть УВ и в целом нафтидов после термодистилляции остается в образцах.

В процессе сушки, следующей за термодистилляцией (ретортой), из образцов удаляется



Условные обозначения:

г:

- 1 – до реторты, $Kn_{ЯМР} = 5.27 \%$;
- 2 – после реторты, $Kn_{ЯМР} = 2.99 \%$;
- 3 – после сушки, $Kn_{ЯМР} = 1.49 \%$;
- 4 – насыщенный керосином, $Kn_{ЯМР} = 12.20 \%$;
- 5 – $Kn_{пред_{ЯМР}} = 3.58 \%$.

Рис. 1. Фотографии шлифов без (а) и с анализатором (б), пиrogramма (в) и спектры ЯМР слабокремнистого кероген-пиритового аргиллита до и после термического воздействия и последующего насыщения его керосином (г), Каменная площадь, баженовская свита (расшифровка сокращений дана в тексте). На врезке приведена фотография этого же образца, насыщенного керосином, на ней хорошо видны «техногенные» трещины, выделяющиеся темно-серым цветом

гораздо меньше флюидов, чем после термодистилляции (см. рис. 1г). Поэтому разница между изменением Кп^{ЯМР} (реторта) и Кп^{ЯМР} (сушка) с одной стороны и величиной потери веса (Mc) с другой не так велика. Причем для некоторых образцов характерно, что потери веса при их сушке превышают величину уменьшения их «пористости», полученную по данным ЯМР (Кп^{ЯМР}). В этих образцах наблюдаются «опережающие» потери веса при их высушивании по сравнению с уменьшением их объемного водородсодержания по результатам замеров с помощью ЯМР. Такое явление становится возможным в том случае (не считая феномен, связанный с погрешностями в замерах и расчетах), если происходит выделение (термическая возгонка) водородсодержащих флюидов (скорее всего, УВ), которые, например, в силу высокой их вязкости не фиксировались на спектрах ЯМР, а потому их удаление из образцов не отражается на их спектрах.

После термического воздействия на образец слабокремнистого кероген-пиритового аргиллита он был насыщен керосином, и его величина Кп^{ЯМР} в этом состоянии составила 12.2 % (см. рис. 1г). Однако следует отметить, что после всех экспериментов с этим и большинством других образцов они покрылись частой сетью микротрещин (см. фото врезку на рис. 1г), а некоторые даже разрушились по этим трещинам. Вероятно, что появившийся после насыщения образца керосином пик с самым большим временем релаксации на спектре ЯМР обязан этим трещинам, в которых присутствует керосин, удерживаемый капиллярными силами (см. рис. 1г). Это дополнительная «техногенная» трещинная емкость, не существовавшая в пластовых условиях в образце в таком явном виде, хотя и была заложена природными процессами при уплотнении осадка и последующих тектонических напряжениях, которым он подвергался.

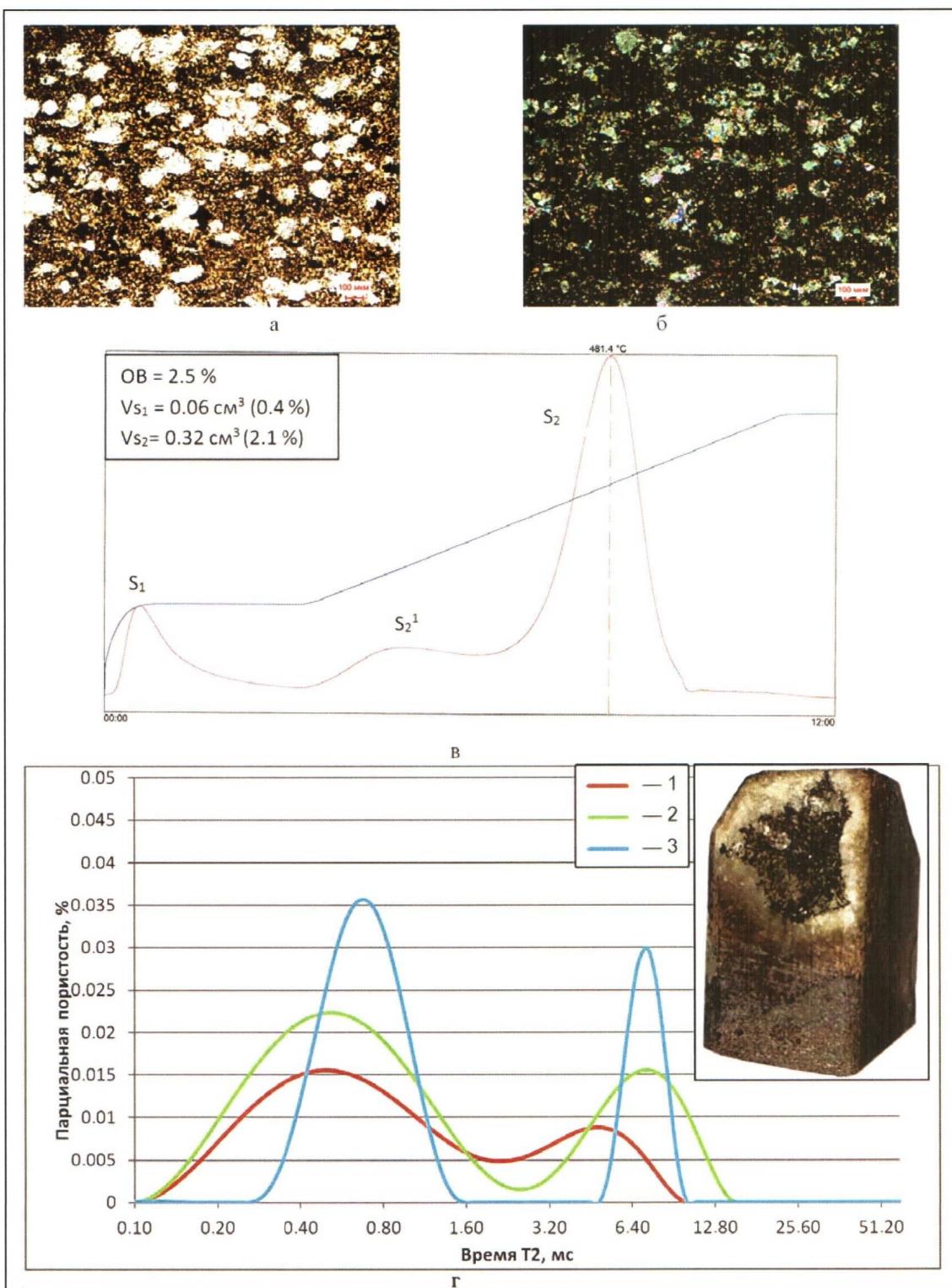
Поскольку остающиеся в образцах после термического воздействия водородсодержащие флюиды представлены главным образом УВ или более широким классом нафтидов, то анализ результатов пиролиза рассматриваемых образцов представляет интерес. На пирограммах фиксируются обычно два (S_1 и S_2) или три (S_1 , S_2 и S_2') пика (рис. 1в). Первый (низкотемпературный) пик, максимум которого приходится примерно на 180–200 °С, соответствует нефтеподобным сравнительно легким УВ, представленным преимущественно бензиновой и керосиновой, а также частично масляной фракциями. Происхождение второго (высокотемпературного) пика (или пиков) связано с испарением более высокотемпера-

турных УВ и с выделением их из битумов и керогена в результате процесса их термокрекинга.

По данным пиролиза получается, что в рассматриваемом образце низкотемпературных УВ содержится порядка 0.26 см³, или 1.3 % от его объема (см. рис. 1в). Причем в результате термодистилляции около 0.04 см³ УВ испарились из образца и осталось порядка 0.22 см³. В процессе последующей сушки испарились еще 0.11 г, или приблизительно 0.12 см³ УВ (принимается, что после термодистилляции воды в образце уже не осталось). Таким образом, в образце осталось порядка 0.22–0.12=0.1 см³, или 0.5 % от его объема низкотемпературных УВ (см. рис. 1г).

По результатам анализа спектра ЯМР величина Кп^{ЯМР} после сушки рассматриваемого образца составила 1.49 %, тогда как за минусом объема низкотемпературных УВ ее величина равна 1.49–0.5=0.99 %. Оставшиеся 0.99 % — это, скорее всего, объем, занятый высокотемпературными УВ, которые входят в состав пика S_2^1 , а может быть, и S_2 (см. рис. 1в). Суммарный объем УВ, выделившихся при пиролитическом разложении высокомолекулярных соединений и керогена, составляет порядка 6.4 % от объема рассматриваемого образца (см. рис. 1в). Полученный спектр ЯМР соответствует лишь 0.99 % УВ, или примерно 15 % от всего объема этих УВ. Основная часть высокотемпературных УВ, входящих в состав пиков S_2^1 и S_2 , скорее всего, присутствует в виде «твердых растворов» в составе очень вязких или даже твердых битумов, а потому они не дают ЯМР спектров, о чем уже говорилось выше. Большая часть этих высокотемпературных УВ выделяется вследствие термокрекинга не только битумов, но и самого керогена, содержание которого в рассматриваемом образце составляет около 8 % (см. рис. 1в).

Следующий образец, представленный кероген-карбонатным радиоляритом (рис. 2а, 2б), не подвергался термообработке. Из него было изготовлено два образца, один из которых являлся монолитным, а второй содержал каверну, заполненную твердым битумом черного цвета (рис. 2г, врезка). Сопоставляя ЯМР спектров, полученных от обоих образцов в воздушно-сухом состоянии, можно отметить, что Кп^{ЯМР} второго образца (с каверной) имеет немного большую величину, чем первого (монолитного), и время релаксации ЯМР сигнала у второго образца также немного больше, чем у первого (см. рис. 2г). Казалось бы, логично предположить, что увеличение пористости и времени релаксации у второго образца связано с наличием в нем твердого битума, но, как мы увидим ниже, это не совсем так.



Условные обозначения:

2:

1 – монолитный, $K_{\text{п}}^{\text{ЯМР}} = 1.45 \%$;

2 – с битумом, $K_{\text{п}}^{\text{ЯМР}} = 1.63 \%$;

3 – насыщенный керосином, $K_{\text{п}}^{\text{ЯМР}} = 2.84 \%$.

Рис. 2. Фотографии шлифов без (а) и с анализатором (б), пиrogramма (в) и спектры ЯМР кероген-карбонатного радиолярита монолитного и с каверной, заполненной черным битумом (см. фото на Врезке), а также в насыщенном керосином состоянии (г). Каменная площадь, баженовская свита

Скорее всего, отмеченный феномен связан с наличием дополнительных объемов микрокапельной нефти, захваченной в процессе роста кристаллов эпигенетического кальцита, окружающего каверну с битумом, в результате чего он приобрел светло-коричневую окраску (см. рис. 2г, врезка).

$K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ рассматриваемого образца в состоянии, насыщенном керосином, составляет всего 2.48 % (см. рис. 2г). В отличие от рассмотренного выше и других исследованных образцов в нем отсутствуют «техногенные» микротрешины, поэтому расположение пиков на кривой релаксации после насыщения образца керосином не изменилось, увеличилась лишь их амплитуда (см. рис. 2г).

После сушки образца при 105 °C величина его $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ уменьшилась до 1.11 %. Скорее всего, отмеченное уменьшение значения $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ связано с испарением воды, так как УВ, сохраняющиеся в негерметизированных образцах, имеют, как правило, более высокие температуры кипения, что мы наблюдаем на пирограммах (см. рис. 1в, 2в). Следовательно, полученная величина $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ после сушки образца соответствует, предположительно, объемному содержанию в нем жидких УВ.

По результатам пиролиза в рассматриваемом кероген-карбонатном радиоляриите содержание низкотемпературных УВ составляет всего порядка 0.06 см³, или 0.4 % от его объема, а высокотемпературных УВ — 0.32 см³, или 2.1 % (рис. 2в). С учетом воды, которая испарила из порового пространства радиоляриита в процессе его сушки, доля (подвижных) высокотемпературных УВ, которые фиксируются на спектре ЯМР, составляет 1.11–0.4=0.71 %. Следовательно, лишь третья часть от высокотемпературных УВ является подвижной (фиксируется на спектре ЯМР), а остальные УВ присутствуют в растворенном состоянии в битумах и выделяются вследствие их термокрекинга, а также при термическом разложении керогена (см. рис. 2в, 2г).

Кремнисто-пирит-керогеновый аргиллит характеризуется самым высоким содержанием в нем ОВ, составляющих 20.3 % (рис. 3а-в). Судя по его спектру ЯМР, большинство пор, присутствующих в нем, имеют очень мелкие размеры, в результате чего максимальное их количество составляет время поперечной релаксации около 0.2–0.3 мс (рис. 3г). Кроме того, он характеризуется очень низкой пористостью (см. рис. 3г).

Сопоставляя изменение $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ до и после реторт с объемами выделившейся воды и УВ из образца в результате термодистилляции, можно отметить, что, как и в рассмотренном выше случае с кероген-пиритовым аргиллитом, изменение $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ намного (в 1.6 раза) больше,

чем суммарный объем воды и УВ, собранных в реторте (см. рис. 3г). Действительно, вследствие термодистилляции величина $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ рассматриваемого образца уменьшилась на 1.83 %, а суммарный объем воды и УВ, выделившийся из образца, составил 1.16 % от его объема. Отмеченный феномен, скорее всего, объясняется той же причиной, о которой говорилось выше, а именно резким увеличением вязкости остающегося после термодистилляции в поровом пространстве образца битума, в результате чего время релаксации сигнала ЯМР некоторой части УВ, содержащихся в нем в растворенном состоянии, уменьшается настолько, что уже не фиксируется на спектре ЯМР.

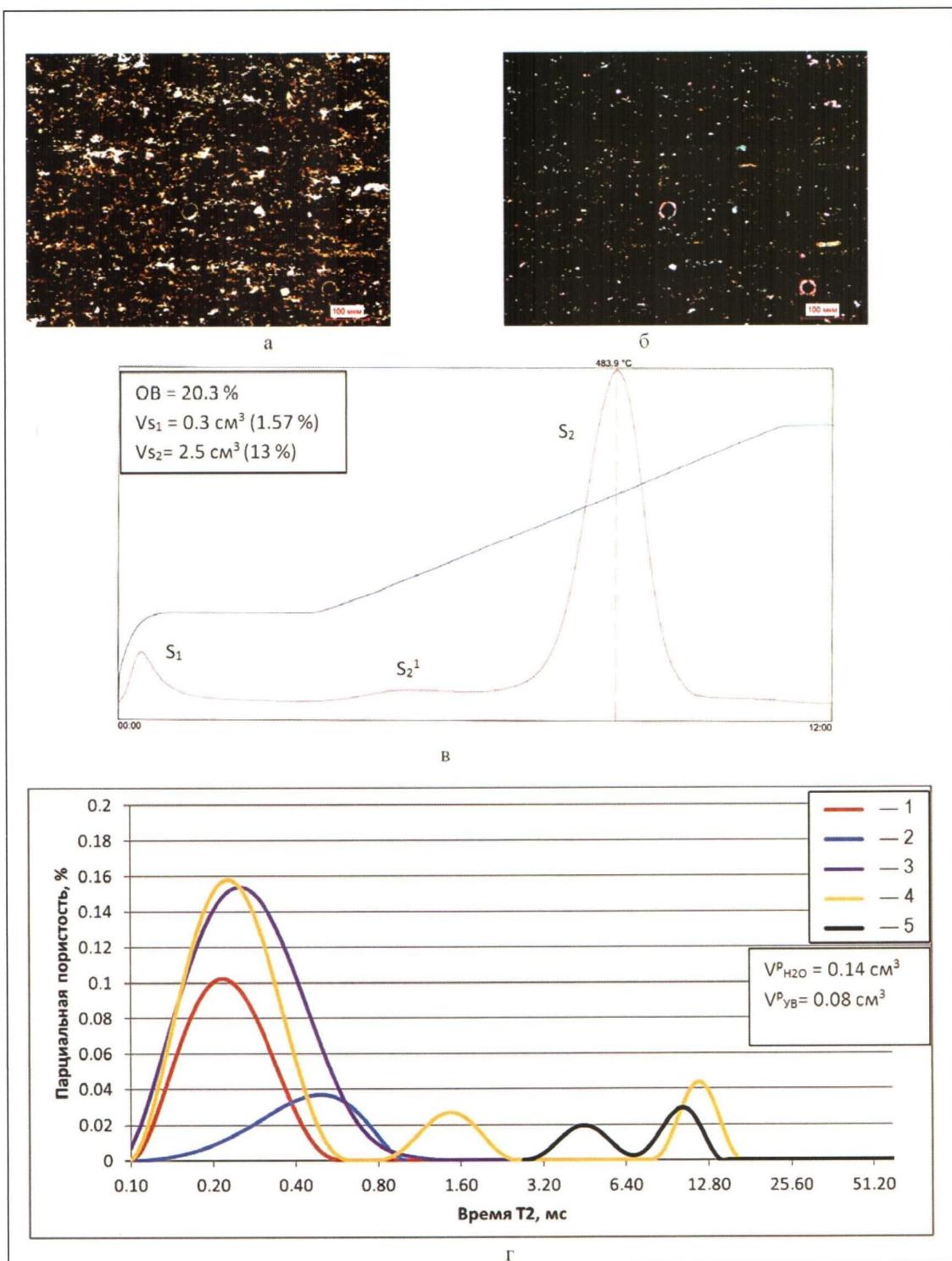
Величина $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$ после реторты составляет всего 0.72 %, а объем низкотемпературных УВ по данным пиролиза (за вычетом собранных в реторте УВ 0.42 %) равен 1.57–0.42=1.15 % (рис. 3в, 3г). Следовательно, 0.43 % этих УВ имеют очень короткое время релаксации, вследствие чего прибор не фиксирует их существование в образце. Это свидетельствует о том, что они присутствуют в образце в виде упомянутых выше «твёрдых растворов» в очень вязких, почти твердых битумах, заполняющих его поровое пространство.

Смещение максимума на кривой релаксации в область больших времен после термодистилляции может объясняться перераспределением остаточного флюида либо особенностями математической обработки очень слабого сигнала ЯМР (см. рис. 3г).

Величины $K_{\text{П}}^{\text{ЯМР}}$, полученные на рассматриваемом образце в случае насыщения его керосином, а затем водой, показали очень близкие значения (около 3 %), да и сами кривые релаксации имеют близкую форму с основным максимумом вблизи времени поперечной релаксации T_2 , равного 0.2–0.3 мс (см. рис. 3г). Появление небольших пиков на кривых релаксации в области больших времен, скорее всего, объясняется образованием уже упомянутой выше «техногенной» трещиноватости, обусловленной термическим воздействием на образец, а также его разуплотнением вследствие снятия литостатической нагрузки, существовавшей в пластовых условиях.

Отложения абалакской свиты отличаются от баженовских осадков меньшим содержанием в них ОВ, а также других компонентов биогенного происхождения и, напротив, более высокой концентрацией терригенного (абиогенного) материала, представленного преимущественно мелкоалевритовой и глинистой фракциями.

Анализ ЯМР спектров карбонатно-алевритового аргиллита (рис. 4а, 4б) показал,

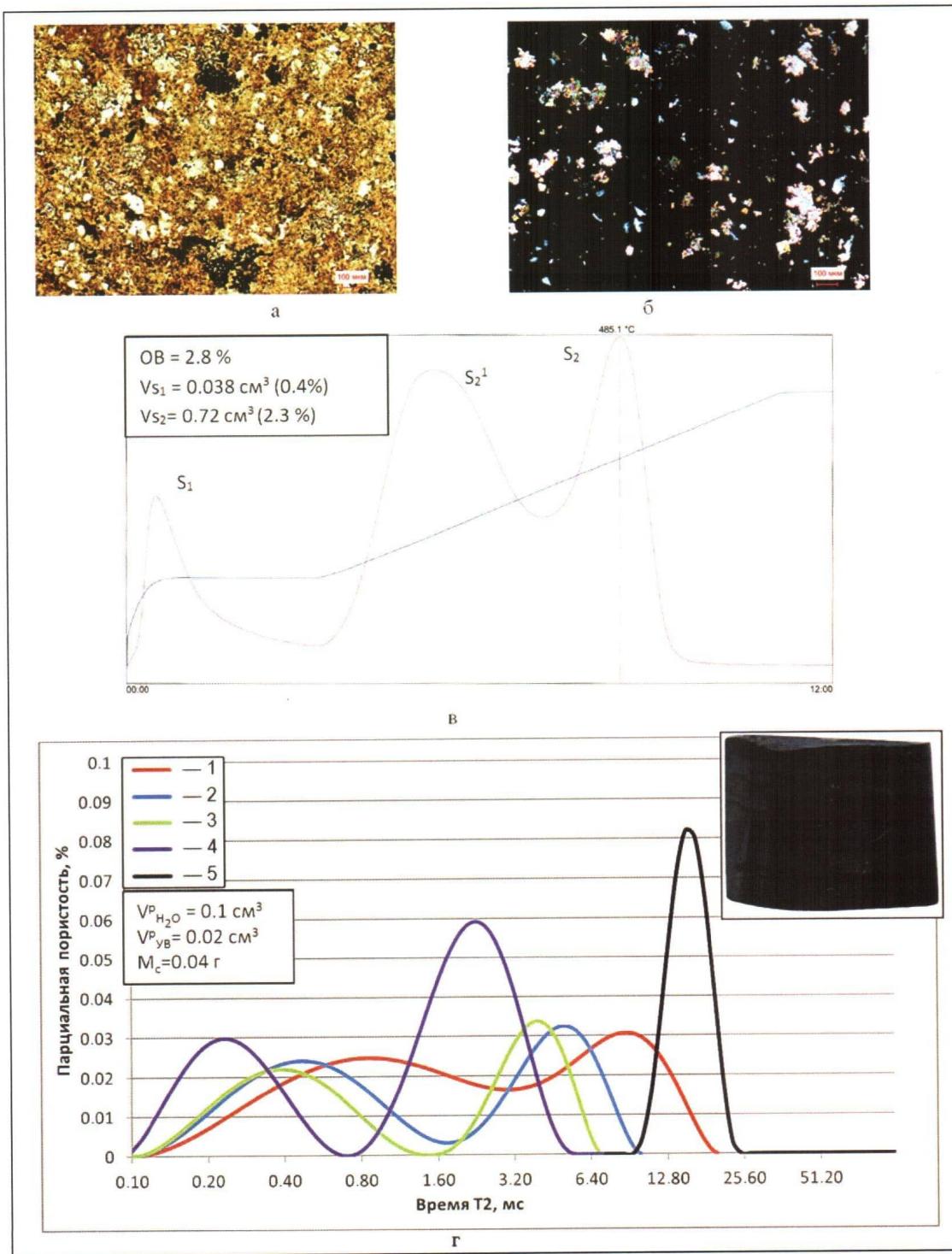


Условные обозначения:

2:

- 1 – до реторты, Kn^{ЯМР} = 2.55 %;
- 2 – после реторты, Kn^{ЯМР} = 0.72 %;
- 3 – насыщенный керосином, Kn^{ЯМР} = 2.90 %;
- 4 – насыщенный водой, Kn^{ЯМР} = 3.00 %;
- 5 – Kn_{трещ}^{ЯМР} = 0.29 %.

Рис. 3. Фотографии шлифов без (а) и с анализатором (б), пиrogramма (в) и спектры ЯМР кремнисто-пирит-керогенового аргиллита до и после термического воздействия и последующего насыщения его керосином и водой (г). Каменная площадь, баженовская свита



Условные обозначения:

ε:

- 1 – до реторты, Kn^{ЯМР} = 3.57 %;
- 2 – после реторты, Kn^{ЯМР} = 2.28 %;
- 3 – после сушки, Kn^{ЯМР} = 1.91 %;
- 4 – насыщенный керосином, Kn^{ЯМР} = 4.76 %;
- 5 – Kn_{трещ}^{ЯМР} = 1.42 %.

Рис. 4. Фотографии шлифов без (а) и с анализатором (б), пирограмма (в) и спектры ЯМР карбонатно-алевритового аргиллита до и после термического воздействия и последующего насыщения его керосином (г). Каменная площадь, абалакская свита. На Врезке приведена фотография этого же образца, насыщенного керосином, на ней хорошо видны «техногенные» трещины, выделяющиеся на снимке темно-серым цветом

что он обладает низкой Кп^{ЯМР}, величина которой закономерно уменьшается по мере увеличения интенсивности температурного воздействия на образец с 3.57 до 1.91% (рис. 4г). При этом отмечается постепенное уменьшение амплитуд пиков и их смещение в область меньшего времени релаксации T_2 (см. рис. 4г). Сопоставление разницы значений Кп^{ЯМР} до и после термодистилляции с одной стороны и объемы выделившейся воды и УВ в результате этого процесса с другой показало, что они практически совпадают по величине — 1.29 и 1.26% соответственно (см. рис. 4г). Иными словами, для рассматриваемого образца эффект влияния «твёрдых растворов» не проявляется, что связано, возможно, со свободным состоянием всех выделившихся в процессе термодистилляции флюидов. Следует заметить, что основной объем собравшихся в реторте флюидов представлен водой, а доля УВ в 5 раз меньше (см. рис. 4г).

Сравнивая объем низкотемпературных УВ (пик S_1 на пиограмме) и объем УВ, выделившихся вследствие термодистилляции карбонатно-алевритового аргиллита, можно отметить, что объем последних составляет лишь около половины от объема первых (см. рис. 4в, 4г).

Последующая сушка образца при 250 °C привела к уменьшению Кп^{ЯМР} до 1.91%, а абсолютное значение уменьшения пористости составило 0.37% (см. рис. 4г). При условии если предположить, что при сушке удалялись лишь УВ, так как вся вода, присутствовавшая в образце, испарилась в процессе термодистилляции, то почти половина значения уменьшения величины Кп^{ЯМР} объясняется испарением оставшихся низкотемпературных УВ, входящих в состав пика S_1 , а вторая половина — это УВ из пика S_2 ¹ (см. рис. 4в, 4г).

Несмотря на достаточно жесткое температурное воздействие на образец, в нем после сушки осталось порядка 1.91% от его объема подвижных УВ, входящих, скорее всего, в масляную фракцию (см. рис. 4г).

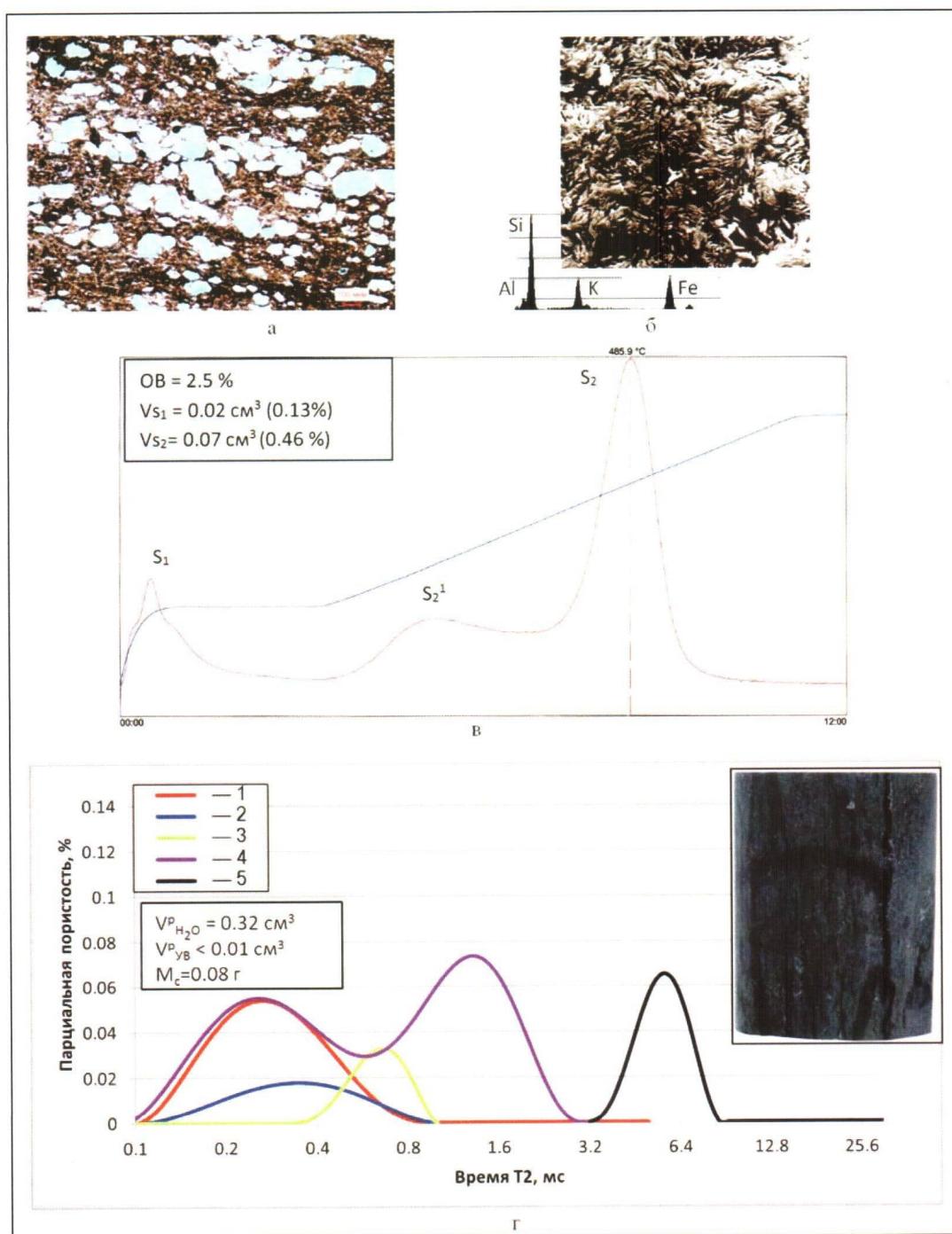
Последующее насыщение образца керосином отразилось на его спектре повышением интенсивности пиков и появлением дополнительного третьего пика в области больших времен релаксации T_2 (см. рис. 4г), что, возможно, объясняется присутствием в нем «техногенной» микропористости (о ней уже говорилось выше), которая не была заполнена флюидами во время предыдущих замеров.

Алевролит-глауконитовый аргиллит (рис. 5а, 5б) имеет очень низкую величину Кп^{ЯМР} в воздушно-сухом состоянии (всего 2.18%), которая резко уменьшается в процессе термодистилляции до 0.52% и менее значительно вследствие

его последующей сушки до 0.45% (рис. 5г). Сопоставление величины изменения Кп^{ЯМР} при термодистилляции (1.66%) и объема выделившейся из образца в результате этого процесса воды (0.32 см³, или 2.1%) свидетельствует о том, что воды в реторте собралось примерно в 1.3 раза больше, чем должно быть исходя из величины уменьшения Кп^{ЯМР} (см. рис. 5г). В реторте существуют также и УВ, но их объем слишком мал, чтобы оценить их количество объемным методом. Этим способом можно определить содержание УВ только при условии, что их в реторте присутствует более 0.01 см³, но предположим их выделилось из образца менее 0.01 см³, или менее 0.07%, то в этом случае, судя по результатам пиролиза, могло испариться около половины низкотемпературных УВ, присутствующих в образце (см. рис. 5в).

Еще более разительные отличия изменения величины Кп^{ЯМР} от потерь веса вследствие испарения флюидов отмечаются после сушки образца — 0.07 и 0.53% соответственно (см. рис. 5г). То есть испарились флюидов примерно в 7.6 раза больше, чем изменилась величина Кп^{ЯМР}. Это несовпадение можно попытаться объяснить описанным выше феноменом «твёрдого раствора». Однако из-за невысокой концентрации в алеврит-глауконитовом аргиллите ОВ и в первую очередь УВ, а также битумов только этим феноменом отмеченное явление не объяснить. Остается предположить, что в рассматриваемом образце не вся вода, присутствующая в нем, испаряется при 180 °C, скорее всего, она продолжает испаряться и при 250 °C. Лишь после сушки оставшийся объем Кп^{ЯМР}, равный 0.45%, вероятно, занят УВ, относящимися преимущественно к масляной фракции (см. рис. 5в, 5г). Однако возникает вопрос: почему ЯМР «не видит» выделившийся объем воды? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо вспомнить, что представляет собой глауконит, содержащийся в этом образце.

Глауконит — это железистая разновидность смешаннослоистых образований (ССО) на основе гидрослюды и монтмориллонита, в которых основная часть алюминия замещена железом (см. рис. 5б — элементный спектр). Причем в этом минерале число набухающих (монтмориллонитовых) пакетов может достигать 50–60% и даже более. Именно поэтому при прохождении глауконитовой пачки скважинами очень часто наблюдается образование в их стволах многочисленных крупных каверн, а иногда происходят и прихваты инструмента. При больших увеличениях хорошо видно, что зерна глауконита сложены плотно прижатыми друг к другу многочисленными



Условные обозначения:

г:

- 1 – до реторты, $Kn_{ЯМР} = 2.18 \%$;
- 2 – после реторты, $Kn_{ЯМР} = 0.52 \%$;
- 3 – после сушки, $Kn_{ЯМР} = 0.45 \%$;
- 4 – насыщенный керосином, $Kn_{ЯМР} = 9.47 \%$;
- 5 – $Kn_{трещ} = 1.8 \%$.

Рис. 5. Фотография прозрачного петрографического шлифа без анализатора (а), снимок РЭМ глауконитовых зерен с их элементным спектром (б), пиорограмма (в) и спектры ЯМР алеврит-глауконитового аргиллита до и после термического воздействия, а также последующего насыщения его керосином (г). Каменная площадь, абалакская свита. На врезке приведена фотография этого же образца, насыщенного керосином, на ней хорошо видны «техногенные» трещины, выделяющиеся темно-серым цветом

чешуйками, между которыми присутствуют очень узкие щелевидные поры с раскрытостью в среднем 0.1–0.3 мкм (см. рис. 5б). Но самые узкие «двумерные поры» находятся в межслоевых промежутках, в которых при полном насыщении набухающих пакетов водой может находиться до четырех молекул воды на каждую молекулу глауконита. Зная формулу глауконита, несложно подсчитать, что в 100 г этого глинистого минерала может содержаться около 9 г воды, или 9 % от его веса. Поскольку содержание глауконита в рассматриваемом образце варьирует в среднем в пределах 30–40 % (см. рис. 5а), то максимально возможное весовое содержание воды в нем может составлять около 2.7–3.6 %. Вследствие того, что слои в набухающих пакетах не являются электрически нейтральными (имеется избыточный отрицательный заряд на их поверхности, поэтому в них всегда присутствуют обменные катионы), вода, присутствующая в них, активно взаимодействует с поверхностью слоев в этих пакетах и обладает аномальными свойствами (в первую очередь аномально высокой плотностью) [3]. В зависимости от типа катионов, находящихся в межслоевом пространстве набухающих пакетов, вода, присутствующая в них, может сохраняться при нагревании образцов ССО до 200 °С и даже выше [3].

Исходя из сказанного можно предположить, что межслоевая вода настолько прочно удерживается электростатическими и иными видами связи в межслоевом пространстве, что времени релаксации ядер водорода, входящих в ее состав, слишком мало, чтобы быть зафиксированным релаксометром. Вода, испаряющаяся из межслоевого пространства глауконита, в процессе термодистилляции собирается в реторте, однако на спектрах ЯМР уменьшение объемного водородсодержания в образце не фиксируется. Позднее мы вернемся к обсуждению этого вопроса, когда будем анализировать спектры ЯМР образцов, насыщенных полностью водой и керосином, и сравнивать их с данными об их пористости, полученными весовым способом.

На спектре алеврит-глауконитового аргиллита, насыщенного керосином, выделяются три пика, отвечающих порам различного размера, присутствующим в образце (см. рис. 5г). Пик, отвечающий максимальному времени поперечной релаксации, скорее всего, характеризует объем многочисленных «техногенных» микротрещин, заполненных керосином, о причинах происхождения которых говорилось выше (см. рис. 5г).

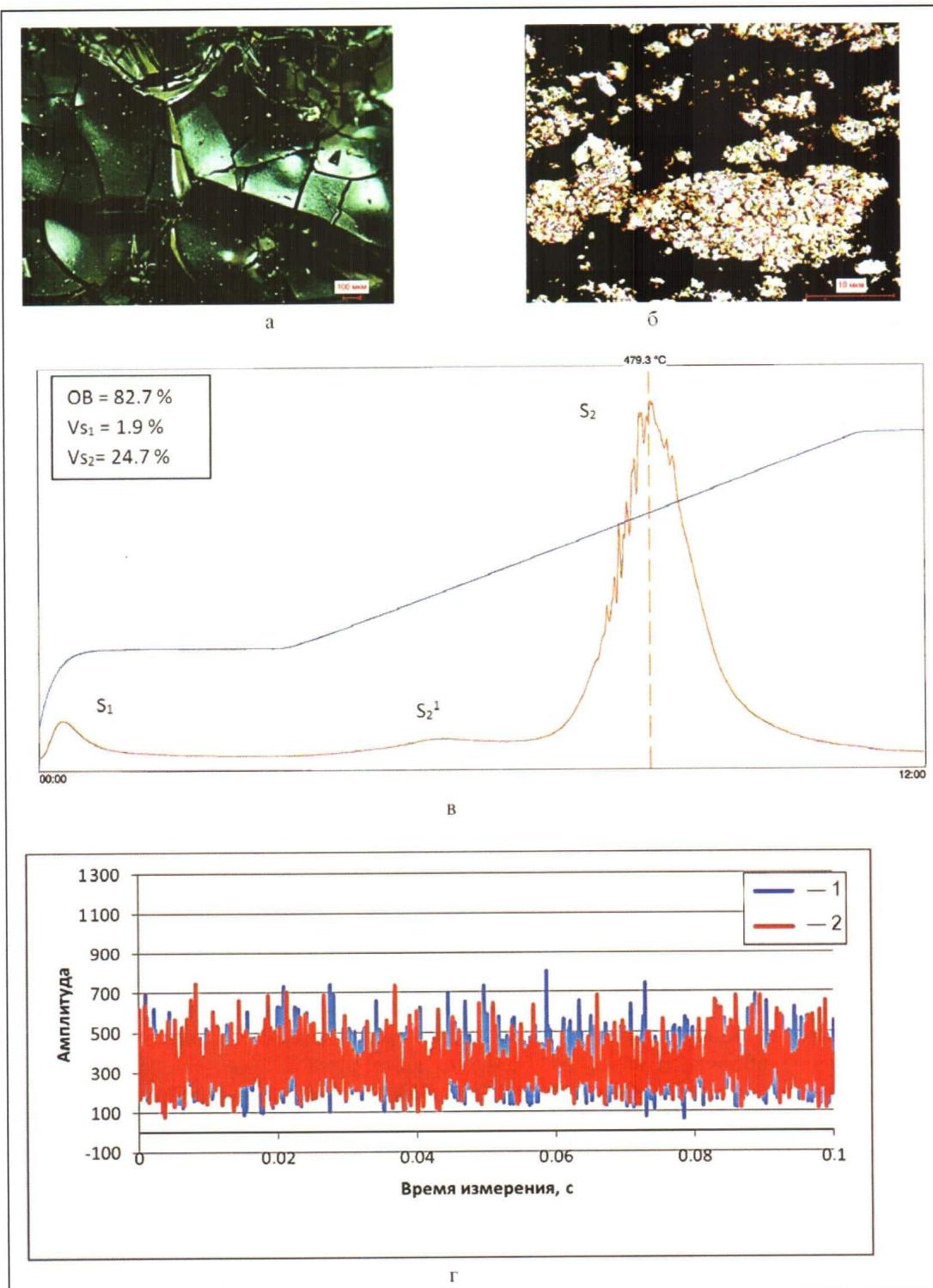
Возвращаясь к феномену «твёрдых растворов» УВ в битумах и к его поведению в магнитном поле релаксометра, рассмотрим результаты

таты пиролитических исследований образца битума. Этот образец имеет черный цвет и микротрещиноватую поверхность, а в петро-графическом шлифе он полупрозрачен и обладает темно-буровой окраской (рис. 6а, 6б). В рассматриваемом образце помимо самого битума присутствуют захваченные им в процессе движения по трещине обломки карбонатов (см. рис. 6б). Интересно, что, несмотря на присутствие на пирограмме этого битума уже известных нам пиков низкотемпературных (S_1) и высокотемпера-турных (S_2^1 и S_2^2) УВ, тем не менее спектр ЯМР от этого битума не фиксируется на релаксометре, а уровни сигнала и шума сопоставимы по ампли-туде (рис. 6в, 6г).

Таким образом, мы находим подтверждение сделанному выше предположению о существовании так называемых «твёрдых растворов» УВ в битумах, которые не дают спектра ЯМР, хотя и присутствуют в составе образцов, содержащих битум. Поэтому при испарении этих УВ из образцов в процессе их термодистилляции или обычной сушки спектры ЯМР этих образцов не изменяются, и по ним (спектрам ЯМР) невозможно зафиксировать процесс выхода из образцов УВ.

Сопоставление величин пористости в насыщенных керосином образцах, определенных весовым методом ($K_p_{\text{кер}}^{\text{вес}}$) и по спектру ЯМР ($K_p_{\text{кер}}^{\text{ЯМР}}$), отобранных из баженовской и абалкской свит, показало, что между этими параметрами существует значимая связь, однако при этом наблюдается систематическое завышение величины пористости, полученной по данным ЯМР, по сравнению с весовым методом (рис. 7а). Отмеченное завышение величины $K_p^{\text{ЯМР}}$ по сравнению с весовым методом объясняется тем, что даже после высушивания образцов при 105 °C в них остается некоторая часть прочно связанной (или так называемой «глинистой») воды, а также и УВ, сигнал от которых уже существует в спектре ЯМР еще до насыщения образцов керосином.

На обсуждаемой зависимости выделяется образец алеврит-глауконитового аргиллита, который имеет гораздо более высокую пористость, определенную весовым методом ($K_p^{\text{вес}}$), по сравнению с $K_p^{\text{ЯМР}}$ (см. рис. 7а). Отмеченная особенность этого образца объясняется описанными выше свойствами глауконита, а именно тем, что молекулы керосина, так же как и воды, попадая в межслоевое пространство набухающих слоев, оказываются настолькоочно прочно связанными некомпенсированными зарядами поверхности этих пакетов, что время их релаксации становится слишком коротким, чтобы релаксометр

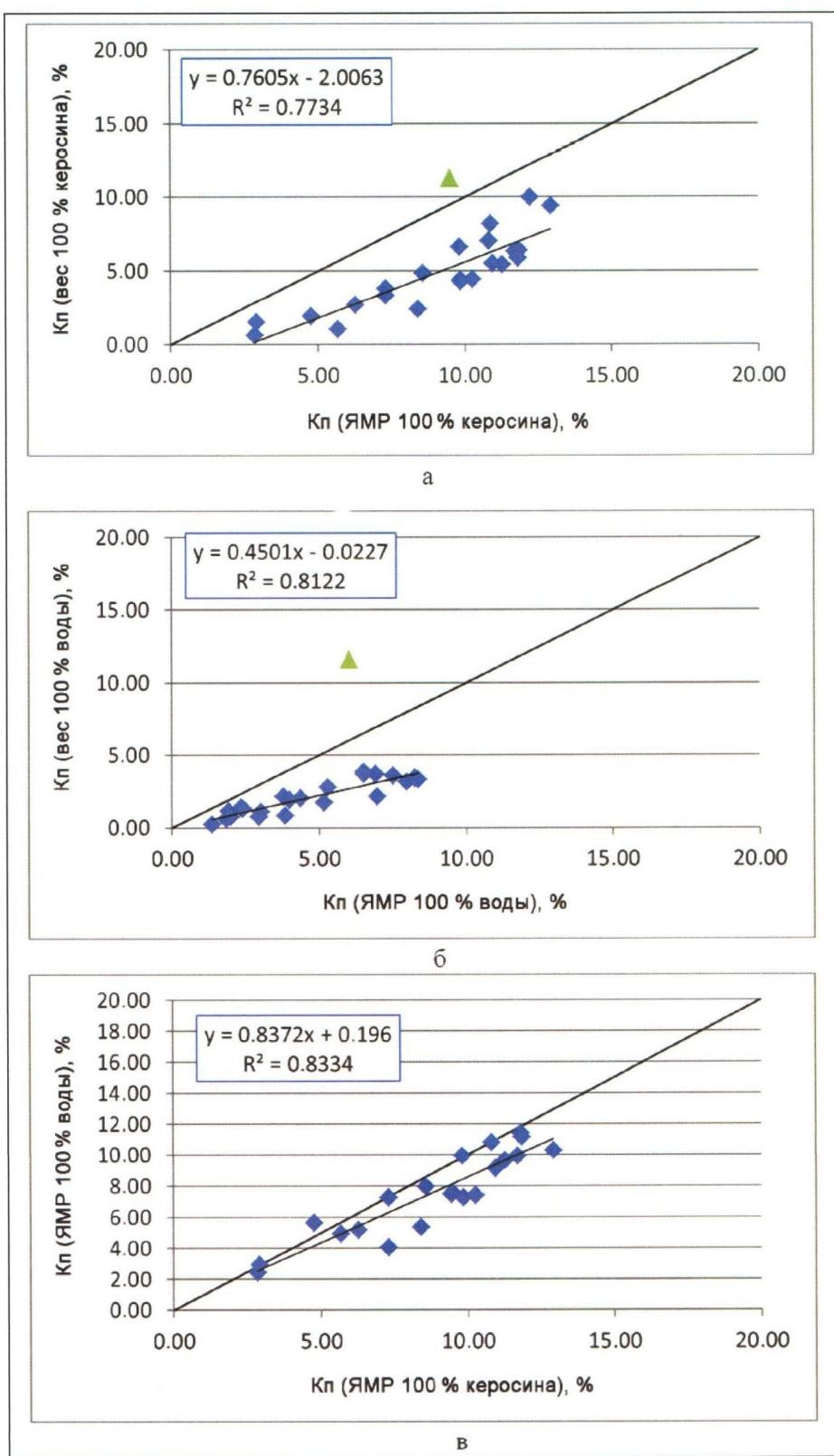


Условные обозначения:

г:

- 1 – сигнал от битума;
- 2 – шум.

Рис. 6. Фотографии поверхности (а) и прозрачного петрографического шлифа (б), пиrogramма (в) и релаксационные кривые ЯМР сигнала от твердого битума и шума (сигнал 2 отсутствие образца) (г). Пальяновская площадь, баженовская свита. В петрографическом шлифе (б) видно, что в битуме присутствуют обломки карбонатов



Условные обозначения:

а – $Kп^{вес} - Kп^{ЯМР}$ при 100 % насыщении образцов керосином; б – $Kп^{вес} - Kп^{ЯМР}$ при 100 % насыщении водой;
в – $Kп(вода)^{ЯМР} - Kп(керосин)^{ЯМР}$ между образцами, насыщенными водой и керосином соответственно;
треугольником обозначены фигуративные точки, соответствующие алеврит-глауконитовому аргиллиту
(см. рис. 5а, 5б).

Рис. 7. Зависимости значений пористости, определенные методами весовым и ЯМР. Каменная площадь, баженовская и абалакская свиты

смог его зафиксировать. Поэтому разница в величине пористости, определенной весовым и ЯМР методами, должна соответствовать объему межслоевого керосина, который «не видит» ЯМР-релаксометр. В рассматриваемом случае эта разница составляет около 2 %, что примерно соответствует нижнему пределу сделанных выше оценок содержания межслоевого флюида.

Зависимость между значениями $K_p^{\text{ЯМР}}$ и пористостью, определенной весовым методом при насыщении образцов водой ($K_p_{\text{вода}}^{\text{ЯМР}}$ и $K_p_{\text{вода}}^{\text{вес}}$), оказалась более пологой. Это, скорее всего, связано с методическими особенностями определения пористости частично гидрофобных образцов при насыщении их водой, а также присутствием в них после сушки при 105 °C связанный воды и УВ (рис. 7б). Действительно, в образцах, высущенных при стандартных условиях (105 °C), величина $K_p^{\text{ЯМР}}$ изменяется от 1.1 % (в карбонатных типах пород) до 6.9 % (в глинисто-битуминозных разновидностях).

Как и в рассмотренной выше зависимости, фигуративная точка, соответствующая алеврит-глauконитовому аргиллиту, оказалась заметно выше остальных. Это объясняется той же причиной, а именно вхождением молекул воды в межслоевое пространство, в котором они оказываются прочно связанными с поверхностью слоев, а потому имеют чрезвычайно короткое время релаксации, не фиксируемое прибором (см. рис. 7б). Для рассматриваемого образца разница между величинами $K_p_{\text{вода}}^{\text{ЯМР}}$ и $K_p_{\text{вода}}^{\text{вес}}$ оказалась равной 4 %. Более значительные различия между $K_p^{\text{ЯМР}}$ и $K_p^{\text{вес}}$ при насыщении образцов водой, а не керосином, скорее всего, объясняются более плотной упаковкой молекул воды в межслоевом пространстве, чем гораздо более крупных молекул УВ, входящих в состав керосина. Поэтому содержание молекул воды в межслоевом пространстве набухающих пакетов глauконита примерно в два раза больше, чем молекул УВ.

Интересно, что зависимость $K_p_{\text{вода}}^{\text{ЯМР}}$ — $K_p_{\text{кер}}^{\text{ЯМР}}$ является не просто значимой, но и имеет довольно высокий коэффициент корреляции (рис. 7в). Небольшое превышение значений $K_p_{\text{кер}}^{\text{ЯМР}}$ над величинами $K_p_{\text{вода}}^{\text{ЯМР}}$ может объясняться двумя причинами: во-первых, небольшим недонасыщением водой в различной степени гидрофобных аргиллитов баженовской свиты, а во-вторых, чуть более высоким водородсодержанием УВ, входящих в состав керосина по сравнению с водой (в 1.15–1.20 раза).

Рассмотрим теперь спектры ЯМР пород-коллекторов, входящих в состав баженовской свиты.

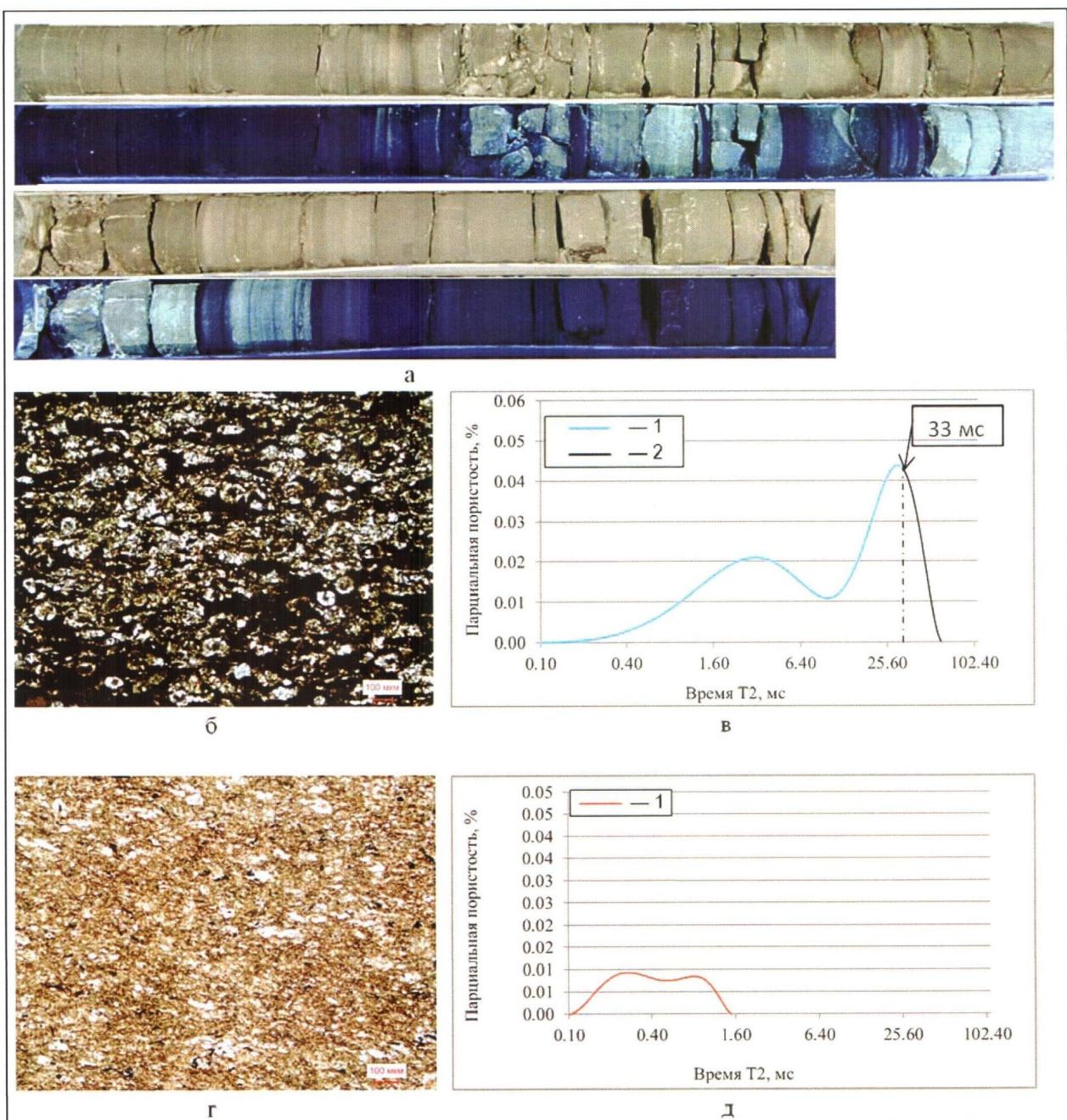
В разрезе баженовской свиты, вскрытой в пределах Тортасинского ЛУ, выделяются интервалы,

люминесцирующие в ультрафиолетовом свете, что указывает на наличие в них УВ (рис. 8а). Образцы, отобранные из этих интервалов, оказались представленными прослойками битуминозных радиоляритов, в которых пустотное пространство между раковинками радиолярий заполнено УВ и битумами (рис. 8б). Величина $K_p^{\text{ЯМР}}$ одного из образцов радиоляритов составила 11.4 % (рис. 8в). Причем если воспользоваться в качестве формального критерия для определения доли свободного флюида отсечкой в 33 мс, то окажется что его содержание в рассматриваемом образце составляет 1.7 %.

Образцы, отобранные из нелюминесцирующих интервалов, оказались керогеновыми силицитами, сложенными преимущественно очень мелкими обломками (пелитовой размерности) раковинок диатомей (?) и радиолярий, а также керогеном, представляющим собой микроскопические углефицированные обломки наземной и морской растительности, и аморфным гелефицированным веществом бурого цвета (рис. 8г). Этот тип пород обладает очень низкой пористостью, которая по данным интерпретации спектра поперечной релаксации одного из образцов силицитов составляет всего 2.7 % (рис. 8д). Причем, судя по очень короткому времени релаксации, флюид присутствует в очень мелких порах и активно взаимодействует с их стенками.

Следующим примером пород-коллекторов, присутствующих в составе баженовской свиты, могут служить копролиты, имеющие фосфатный или карбонатный состав (рис. 9а, 9б, 9д). Копролитовые фосфориты, как и рассмотренные выше радиоляриты, представляют собой псевдогранулярный коллектор, состоящий из многочисленных овальных комочек (копролитов), имеющих алевритовую и мелкозернистую песчаную размерность (см. рис. 9а). В порах между отдельными фосфатными комочками встречаются разнообразные эпигенетические образования, представленные многочисленными, часто буклетовидными, агрегатами каолинита, кристаллами кварца и карбонатов (см. рис. 9б). Сами комочки копролитов не являются монолитными, а сложены многочисленными очень мелкими оолитами, имеющими фосфатный состав (см. рис. 9б). Такое микроолитовое строение зерен копролитов обуславливает наличие в них многочисленных пор микроскопических размеров от 0.3 до 4 мкм (см. рис. 9б).

По результатам геохимических, включая пиролитические, исследований в копролитовых фосфоритах содержание ОВ составляет около 9 %, оно представлено гелефицированным аморфным веществом, присутствующим и в самих комочках



Условные обозначения:

β:

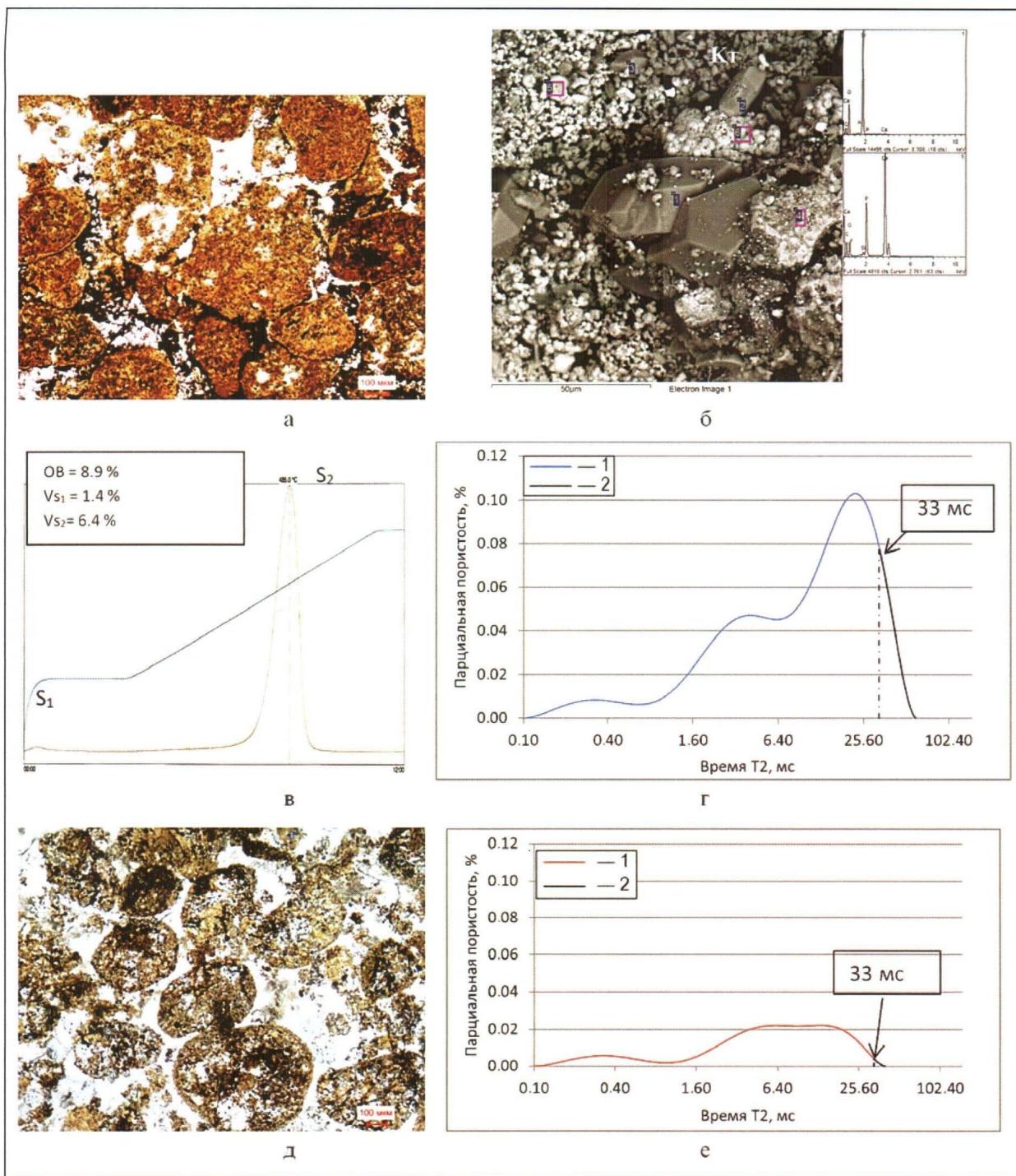
1 – $Kn_{\text{ЯМР}} = 11.4 \%$;

2 – $Kn_{\text{свободного флюида}} = 1.7 \%$;

δ:

1 – $Kn_{\text{ЯМР}} = 2.7 \%$.

Рис. 8. Фотографии полноразмерного керна из баженовской свиты с маломощными нефтенасыщенными интервалами, снятые при дневном и ультрафиолетовом свете (а), фотографии прозрачных петрографических шлифов образцов из нефтенасыщенного (люминесцирующего) интервала, представленные радиоляритами (б), и ненасыщенного УВ интервала, представленного обычными силицитами (г). Спектры ЯМР образцов из нефтенасыщенного (радиоляриты) (в) и нелюминесцирующего (силициты) (д) интервалов. Тортасинский ЛУ



Условные обозначения:

г:

1 – $Kn_{ЯМР} = 14.98\%$;

2 – $Kn_{свободного флюида} = 1.38\%$;

е:

1 – $Kn_{ЯМР} = 4.4\%$;

2 – $Kn_{свободного флюида} = 0.02\%$.

Рис. 9. Фотографии прозрачных петрографических шлифов (а, д), снимок РЭМ (б), пирограмма копролитовых фосфоритов (в), спектры ЯМР (г, е) копролитовых фосфоритов (а-г) и копролитовых карбонатов (д, е). Пальяновская площадь, отложения баженовской свиты. Рядом со снимком РЭМ приведены элементные спектры микрообъектов, Кт – каолинит

копролитов, и в межзерновом пространстве, а также УВ и битумами, заполняющими поровое пространство копролитовых фосфоритов (см. рис. 9а-в). Объемное содержание низкотемпературных УВ в исследованном образце копролита составляет порядка 1.4 %, а высокотемпературных — 6.4 %. Их суммарное содержание почти в два раза меньше значений $K_{p_{kep}}^{YMP}$, что свидетельствует о том, что основная часть флюидов, насыщавших образец и представлявших собой воду и УВ, испарилась из него в процессе его хранения. Содержание свободного флюида в рассматриваемом образце, определенное методом отсечки (33 мс), составляет всего 1.38 % (см. рис. 9г).

Копролитовые карбонаты или карбонатные копролиты из-за того, что поровое пространство между отдельными копролитовыми зернами и сами зерна заполнены эпигенетическим кальцитом, имеют низкие значения $K_{p_{kep}}^{YMP}$. У исследованного образца она составляет всего 4.4 % (см. рис. 9д, 9е). Доля свободного флюида в рассматриваемом образце, определенная методом отсечки, равна всего лишь 0.02 %.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех изученных образцах, отобранных из бажено-абалакского комплекса и находящихся в воздушно-сухом состоянии, в их поровом пространстве присутствуют УВ и вода. Причем по результатам их термодистилляции, происходившей при температуре 180 °C, основная часть выделившихся из них флюидов представлена водой, объем которой даже в битуминозных аргиллитах баженовской свиты в 1.7–4 раза больше, чем объем УВ. При этом наблюдается закономерное уменьшение содержания воды в образцах по мере роста концентрации в них ОВ и битумов, что объясняется вытеснением исходной поровой воды генерируемыми керогеном битумами и УВ.

В аргиллитах абалакской свиты, где процессы генерации УВ развиты слабо из-за низкого содержания в ней ОВ (кероген), доля воды еще больше и превышает содержание в них УВ в 5–30 и более раз.

Вероятно, основная часть воды, присутствующей в образцах, выделяется из них в процессе термодистилляции. Однако наиболее прочно связанная ее часть, содержащаяся в глинистом цементе, сохраняется в образцах даже при этих достаточно «жестких» термических условиях. В случае отсутствия в них жидких УВ на спектрах ЯМР все равно фиксируется присутствие водородсодержащего флюида, представлен-

ного водой. Исходя из этого логично допустить, что при высушивании образцов, содержащих глинистый цемент, по стандартной методике (при 105 °C) в них обязательно останется «глинистая» вода, дающая на спектре ЯМР соответствующий ей сигнал. Следовательно, при дальнейшем насыщении таких образцов керосином или водой для определения их пористости методом ЯМР мы получим завышенное по сравнению с весовым методом значение их пористости.

Другая особенность глинистого цемента, противоположная рассмотренной выше, заключается в том, что вода, которая находится в межслоевом пространстве набухающих пакетов глинистых минералов (например, рассмотренного выше глауконита), настолько прочно связана с поверхностью этих пакетов, что время ее релаксации оказывается слишком коротким, чтобы быть зафиксированным ЯМР-релаксометром. При насыщении предварительно высушенных образцов, содержащих глинистый цемент с набухающими пакетами, например, водой для определения их пористости, используя метод ЯМР, мы получим заниженные по сравнению с весовым методом значения пористости.

Таким образом, для глинистых минералов на примере глауконита можно представить модель их порового пространства следующим образом: в глауконите присутствуют два основных типа пор.

Первый тип пор можно условно назвать макропорами. Это «двумерные» щелевидные поры, расположенные между соседними чешуйками или, правильнее сказать, кристаллами глауконита, которые хорошо видны на снимке, сделанном с помощью РЭМ (см. рис. 5б). Раскрытость этих «плоских» пор, как уже отмечалось выше, составляет 0.1–0.3 мкм. Однако определение расстояний между соседними чешуйками выполнено на поверхности глауконитовых зерен, где эти чешуйки находятся в «распущенном» состоянии. Во внутренней части зерен эти чешуевидные кристаллы упакованы гораздо плотнее, и расстояние между ними может оказаться меньше 0.1 мкм. Флюиды, находящиеся в этих «плоских» порах, имеют малое, но все же фиксируемое прибором время релаксации сигнала ЯМР с максимумом пика примерно в интервале 0.2–0.3 мс.

Второй тип пор можно условно назвать микропорами. К этому типу относятся межслоевые поры или межслоевое пространство, расположенные внутри набухающих пакетов, в котором содержатся очень прочно связанные молекулы воды или УВ, поэтому они имеют чрезвычайно короткое время релаксации, из-за чего сигнал ЯМР не успевает быть зафиксированным прибором. Расстояние между слоями

в набухающих пакетах в зависимости от количества молекул межслоевых флюидов (например, воды) может изменяться приблизительно от $0.3 \cdot 10^{-3}$ (монослой) до $1.2 \cdot 10^{-3}$ мкм (четыре слоя межслоевой воды). В процессе сушки глауконита, например насыщенного водой, из межслоевого пространства набухающих пакетов постепенно слой за слоем выделяется межслоевая вода. Причем чем меньше слоев воды остается в межслоевом пространстве набухающих пакетов, тем выше требуется температура для их удаления из глауконита. Последний слой (монослой) в зависимости от типа катионов, находящихся в межслоевом пространстве, может быть удален при температуре около 200°C и даже при более высокой [3]. Таким образом, флюиды, находящиеся в микропорах глин, в отличие от их макропор, не дают спектра релаксации сигнала ЯМР, и их объем невозможно определить с помощью ЯМР-релаксометра. При сопоставлении результатов определения пористости в глинистых образцах с межслоевым типом пористости (микропористости) с помощью ЯМР и весовым методом окажется, что весовой метод даст более высокую величину пористости, чем ЯМР-релаксометр.

Определение объемного содержания УВ, присутствующих в битуминозных аргиллитах, с помощью ЯМР-релаксометра также имеет свои особенности, которые связаны с образованием так называемых «твердых растворов» с битумами. Углеводороды, присутствующие в виде таких растворов в битумах, из-за высокой их вязкости и, соответственно, очень короткого времени релаксации не фиксируются на спектрах ЯМР. Поэтому в процессе сушки таких (содержащих битум) образцов потеря их веса за счет испарения УВ никак не отражаются на спектрах ЯМР. Нельзя также исключить и возможность того, что во время сушки подвижные в начале этого процесса УВ (которые фиксировались на спектре ЯМР), потеряв наиболее легкие фракции, становятся настолько вязкими, даже битумоподобными, что время релаксации их спектра ЯМР сокращается до такой степени, что перестает фиксироваться релаксометром. В этом случае наблюдается «опережающее» уменьшение значения $\text{Кп}^{\text{ЯМР}}$ по сравнению с объемами флюидов, выделяющихся вследствие сушки образца.

Вязкие и твердые битумы по результатам пиролитических исследований содержат в своем составе как низкотемпературные, так и высокотемпературные УВ, которые, однако, не проявляются на спектрах ЯМР, что подтверждает существование упоминавшихся выше так называемых «твердых растворов» между УВ и битумами.

Рассмотренные в настоящей публикации два типа пород-коллекторов с прямыми признаками их нефтеносности отобраны из отложений баженовской свиты (см. рис. 8, 9). Они представлены псевдогранулярными разновидностями коллекторов.

Первые — это радиоляриты, в которых УВ вместе с битумами содержатся в пространстве между раковинками радиолярий, имеющих преимущественно алевритовую размерность (см. рис. 8б). Радиоляриты — достаточно прочные породы, благодаря чему в них частично сохранилась первичная (межраковинная) пористость, а также возникшая позднее в эпигенезе вторичная емкость за счет процесса нефтегенерации из присутствующего в них керогена.

Вторые — это копролиты фосфатного и/или карбонатного состава, в которых также отмечается псевдомежгранулярная, или, вернее, межкопролитовая емкость (см. рис. 9). Копролиты, имеющие фосфатный состав, лучше сохранили первичную (межкопролитовую) пористость, так как в них процессы заполнения первичной пористости вторичными эпигенетическими минералами выражены не так сильно, как в карбонатных копролитах, в которых карбонаты заместили не только сами копролиты, но и поровое пространство, находящееся между ними (см. рис. 9а, 9б, 9д).

В целом оба типа пород-коллекторов характеризуются невысокой эффективной емкостью, которая, если воспользоваться методом отсечки по времени поперечной релаксации, равным 33 мс, составляет всего от 0.02% (в карбонатных копролитах) до 1.4% в радиоляритах и 1.7% в фосфоритовых копролитах. Следовательно, изученные породы-коллекторы, находящиеся в составе баженовской свиты, обладают низкой эффективной емкостью и больших запасов УВ с ними связывать не приходится.

ВЫВОДЫ

- Основная масса различных литологических типов пород, слагающих бажено-абалакский комплекс, не является коллекторами и характеризуется очень короткими величинами времени релаксации сигналов ЯМР и низкими значениями $\text{Кп}^{\text{ЯМР}}$.

- Рассмотренные в настоящей публикации породы-коллекторы представлены псевдогранулярными разновидностями, в которых поры присутствуют либо между раковинками радиолярий (в радиоляритах), либо между комочками копролитов (фосфоритовые и карбонатные копролиты). В них по данным ЯМР присутствует эффективная емкость, заполненная «свободным» флюидом, они же характеризуются довольно высокой по сравнению с другими литологическими типами пород пористостью ($\text{Кп}^{\text{ЯМР}}$).

3. Наличие чрезвычайно узких микроскопических пор в межслоевом пространстве набухающих пакетов глинистых минералов, а также «твёрдых растворов» УВ в битумах ограничивает возможность определения содержания флюидов в этом типе пор глинистых минералов и «твёрдых растворах» с использованием метода ЯМР.

4. Вследствие процессов разуплотнения, а также взаимодействия с водой тонкослоистых

глинистых образцов, отобранных из бажено-абалакского комплекса, в них произошло образование многочисленных микротрешин (заложенных еще в процессе их неравномерного уплотнения и под действием последующих тектонических напряжений в пластовых условиях). Они в состоянии, насыщенном водой или керосином, на спектрах ЯМР дали дополнительные пики с максимальными значениями времен поперечной релаксации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод С. М. Многомерные ЯМР-исследования разрезов скважин // Каротажник. 2008. № 7. С. 84–123.
2. Аксельрод С. М. Современные тенденции развития ядерно-магнитных методов в петрофизике и геофизических исследованиях в скважинах // Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследований нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. Тверь, 27–29 июня 2011 г. М., 2011. С. 28–42.
3. Гольдберг В.М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 162 с.
4. Джрафоров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерно-магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. М.: Химия, 2002. 437с.
5. Зубков М.Ю., Потапов А. Г. Результаты изучения ЯМР спектров водонасыщенных моделей из шариков различного диаметра // Геофизические, геохимические и петрофизические исследования и геологическое моделирование при поиске, разведке и контроле эксплуатации нефтегазовых месторождений: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. Бугульма, 1–4 октября 2013 г. М., 2013. С. 237–245.
6. Скрылев С.А., Чуйко А. И., Зубков М. Ю. Опыт и проблемы применения геофизических методов при изучении залежей нефти в абалакской свите Красноленинского месторождения // Каротажник. 1997. № 41. С. 49–58.
7. Топорков В.Г., Денисенко А. С. Практическое применение данных ЯМР для оценки свойств структуры пород продуктивных нефтегазоносных залежей // Каротажник. 2008. № 177. С. 162–188.
8. Топорков В.Г., Денисенко А. С., Мурцовкин В. А. Этапы развития экспериментальных исследований нефтегазовых коллекторов методом ЯМР 1990–2010 годов // Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследований нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. Тверь, 27–29 июня 2011 г. М., 2011. С. 82–99.
9. Coates G.R., Xiao L., Prammer M.G. NMR Logging Principles and Applications. Houston: Hullibarton Energy Services, 1999. 335 p.