

УДК 553.983, 553.982.23

А.Г. Калмыков¹, Е.А. Мануилова², Г.А. Калмыков³, В.С. Белохин⁴,
Н.И. Коробова⁵, О.М. Макарова⁶, Е.В. Козлова⁷, Р.А. Хамидуллин⁸,
В.А. Шишков⁹, А.Г. Иванова¹⁰

ФОСФАТСОДЕРЖАЩИЕ ПРОСЛОИ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ КАК ВОЗМОЖНЫЙ КОЛЛЕКТОР¹¹

Описан возможный тип коллекторов баженовской свиты, приуроченных к интервалам с повышенным содержанием фосфатов (разные модификации апатита). Показано, что фосфатные образования обладают высокоразвитым поровым пространством, их пористость может достигать 14%. При этом такие породы имеют повышенные геохимические характеристики нефтяных пород-коллекторов по сравнению с близлежащими в разрезе породами. В частности, значения индексов продуктивности и нефтенасыщенности превышают фоновые значения в 2 раза. Состав таких пород несколько варьирует, в минералах может присутствовать фтор, при этом в породе всегда сохраняется повышенное содержание органического вещества (>8 масс.%).

Ключевые слова: баженовская свита, фосфоритовый коллектор, нефтенасыщенная порода.

Possible reservoir type of Bazhenov formation relative to the intervals with increased content of phosphate is described in the resent work. It is shown that phosphate formations have highly connected pore space, porosity may achieve values up to 14%. These rocks also have explicit geochemical characteristics of oil reservoir rocks in comparison with other rock samples in the well. For example, the productivity index and oil saturation index for phosphates is twice higher. The composition of such species may slightly vary, fluorine may present in phosphate minerals, meanwhile rocks are always maintain high content of organic matter (more than 8 wt%).

Key words: Bazhenov formation, phosphate reservoir, oil-saturated rocks.

Введение. Баженовская свита (Западная Сибирь, Россия) вызывает повышенный интерес у исследователей и нефтедобывающих компаний, поскольку относится к нефтематеринским породам и содержит как большое количество органического вещества, находящегося преимущественно на ранних стадиях катагенетической преобразования, так и уже сформировавшиеся нефтяные запасы [Афанасьев и др., 2010]. Несмотря на то что проводятся эксперименты по разработке методов преобразования потенциала керогена в нефть и

даже достигнуты некоторые успехи, описанные, например, в работе [Бычков и др., 2015], на данный момент не существует промышленной технологии добычи нефти таким способом, применимой к баженовской свите. Поэтому нефтяные компании в первую очередь занимаются поиском коллекторов, находящихся в баженовской свите и обеспечивающих существенные притоки без дополнительного воздействия на пласт.

Баженовская свита имеет неоднородный литологический состав, для которого нет четкой

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, магистрант; *e-mail:* manuilovaekaterina139@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент, вед. науч. с.; *e-mail:* gera64@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* lordbvc@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ассистент; *e-mail:* ok-hrust@ya.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* ok-hrust@ya.ru

⁷ Сколковский институт науки и технологии, Центр добычи углеводородов, ст. науч. с.; *e-mail:* miliyakozlova@mail.ru

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* ruslan_msu@mail.ru

⁹ Институт географии РАН, мл. науч. с.; *e-mail:* shishkov@igras.ru

¹⁰ Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН, инженер; *e-mail:* ani@ns.crys.ras.ru

¹¹ Работы, связанные с определением состава и наличия нефтеносности фосфатсодержащих прослоев, выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-00010). Часть работ, связанных с исследованием одной из скважин на Краснотенском своде, выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 14.581.21.0008 от 03.10.2014 г. (уникальный идентификатор RFMEF158114X0008).

закономерности распространения по латерали [Балушкина и др., 2013]. При этом можно выделить наиболее часто встречающиеся породы, к которым в первую очередь относятся глинисто-керогеново-кремнистые, керогеново-кремнистые и карбонатно-глинисто-керогеново-кремнистые. Из-за сложного строения пористость пород баженовской свиты часто не зависит от литологического типа пород и варьирует от нескольких долей процента до 10% и более [Хамидуллин и др., 2013].

Несмотря на изменение значений пористости внутри пластов с одинаковым литологическим составом, исследования интервалов, имеющих высокую пористость и отнесенных к коллекторским интервалам, показали, что повышенная пористость может быть приурочена к силицитам и карбонатизированным силицитам [Балушкина и др., 2014; 2015]. Состав таких пород-коллекторов определяется соотношением биогенного кремнезема, кальцита и/или доломита и в меньшей степени керогена и глинистых минералов. Мощность этих пород не превышает 2 м. Источником биогенного кремнезема силицитов служили радиолярии, остатки скелетов которых хорошо диагностируются в шлифах. Радиоляриевая структура сохраняется и в карбонатизированных силицитах. Пористость таких пластов может достигать 15% [Балушкина и др., 2014].

Другой тип коллекторов нефтяных сланцев в целом и баженовской свиты в частности — пласты, содержащие сильнозрелое органическое вещество, в котором в результате катагенетического преобразования образовались поры. Наличие органической пористости относительно недавно обнаружено зарубежными исследователями [Loucks et al., 2009; Modica et al., 2012]. Позднее аналогичная пористость была обнаружена и в баженовской свите [Балушкина и др., 2015; Васильев и др., 2015]. Пористость таких образцов составляет 4–7%.

До настоящего времени считалось, что перечисленные выше два признака — основные характерные черты коллекторов баженовской свиты. В то же время М.Ю. Зубков показал, что органическое вещество баженовской свиты часто приурочено к фосфоритовым минералам [Зубков, 2015].

Рассмотрены результаты наших исследований интервалов разрезов баженовской свиты скважин Красноленинского свода, содержащих повышенное количество фосфатов (апатиты, фторапатиты) и обладающих высокими пористыми характеристиками. Работа посвящена детальному изучению обнаруженных интервалов, их состава и структуры порового пространства.

Материалы и методы исследований. Объект исследований — керновый материал пород баженовской свиты Красноленинского свода (Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн).

Определение пористости и проницаемости по газу (азот) проводилось при помощи автоматизированной системы измерения «AP-608» («Coretest Systems», США) на стандартных цилиндрических образцах (30×30 мм) и цилиндрических образцах нестандартного размера (10×30 мм). Пиролитические исследования выполнены на аппаратно-методическом комплексе HAWK («Resource Workstation», США). Измерения рентгенограмм при определении основных минеральных фаз методом рентгенофазового анализа проводили на дифрактометре «Rigaku MiniFlex600». Обработка дифрактограмм и фазовый анализ выполнены в программе HighScore Pro (PANalytical, Нидерланды). Пористую структуру образцов кернового материала исследовали с помощью растрового электронного микроскопа «JEOL 6610 LV», сопряженного с системой энергодисперсионного рентген-спектрометрического анализа «Oxford Instruments INCAxact». Для специфической подготовки образца перед микроскопированием применялась система холодно-плазменной металлизации «JEOL JFC1600», материал напыления — платина. Обработку результатов проводили при помощи программного обеспечения SEM Control User Interface, версия 7.11 («Jeol Technics LTD»).

Результаты исследований. Изучение разреза скважины на Красноленинском своде показало наличие интервала мощностью 2 м с часто повторяющимися включениями линз рыжеватого цвета, которые предположительно отнесены к фосфатным породам, приблизительно в этом интервале можно выделить несколько литологических типов, примерно одинаково обогащенных предположительно фосфатными линзами. Для более ясного представления о структуре породы ниже приведено литологическое описание одного из литотипов.

В интервале установлено горизонтально-линзовидное чередование через 1 см рыжеватых линз, темно-серовато-коричневых глинисто-кремнистых прослоев и миллиметровых пиритовых прослоев. Рыжие линзы нефтенасыщены. Видимая длина пиритовых осерненных линз достигает 8 см. Видна линза черного цвета размером 1,5×3,5 см с неровными контурами. Линза состоит из черных обломков (интракластов) дресвяно-гравийной размерности (до 3 мм) и заполнителя, представленного рыжегато-коричневым зернистым веществом, выше — желтовато-коричневые линзы с размерами 1,5×4,0; 2,0×8,0; 1,0×2,5 см с зернистой структурой. Текстура пород косолинзовидная (турбидный вид). В кровле слоя угол наклона 15°. В верхней части основная масса становится карбонатно-глинисто-кремнистой. Здесь присутствуют обломки карбонатного состава размером 0,3×0,8 см. Фото кернового материала, включая описанный материал, приведены на рис. 1.

Поскольку повышенный интерес вызывали нефтенасыщенные линзы рыжего цвета, из них

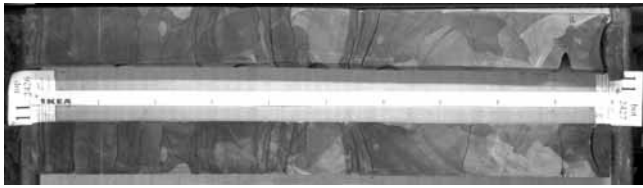


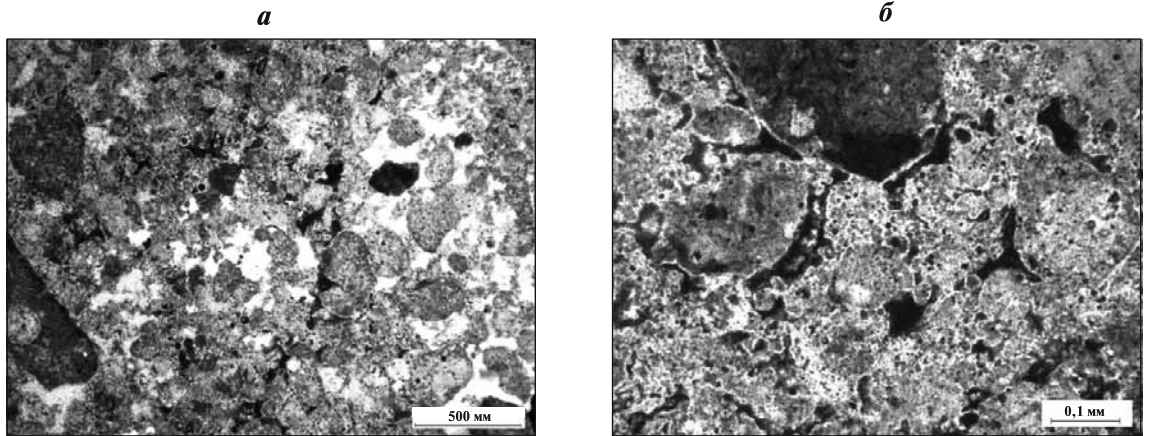
Рис. 1. Интервал ядерного материала, содержащего повышенное количество фосфатного материала. Фото В.С. Белохина

изготовлены петрографические шлифы (рис. 2). На основании анализа шлифов установлено, что линзы представлены фосфатной породой с карбонатным и кергеново-карбонатным цементом. Структура ооидно-сгустковая, размер ооидов 0,15–0,40 мм (преобладает 0,3–0,4 мм), их количество в породе составляет 80–85%. Цемент порового типа имеет кергеново-карбонатный и кергеново-кремнисто-карбонатный состав.

Породы трещиноватые, трещины открытые, по периферии трещин отмечено наличие черного остаточного битуминозного вещества. К трещинам часто приурочены вторичные пустоты и участки выщелачивания диаметром 0,5–1,0 мм. Встречаются жилы неправильной формы, выполненные кальцитом, центральные части жил содержат каверны диаметром 1,0–1,5 мм, соединенные тонкими открытыми трещинами. Нередко на периферийных частях каверн присутствует темно-коричневое остаточное битуминозное вещество. На основании изучения шлифов построена литологическая колонка исследованного интервала, представленная на рис. 3.

Для проверки предположения о фосфатном составе линз и определения точного состава пород в рассматриваемом интервале проведен рентгенофазовый анализ образцов. Его результаты показав-

Рис. 2. Шлифы пород с повышенным содержанием апатитов: *а* — общий план структуры апатита; *б* — укрупненный фрагмент. Фото О.М. Макаровой и Н.И. Коробовой



Номер пачки	Номер слоя	Мощность слоя	Шкала глубины	Литологическая колонка	Текстура	Включения	Процессы и деструкции
VI (1,64 м)	9	0,49	2426	[Diagram of lithological column for layer 9]	30°	Oil	#
	8	0,12		[Diagram of lithological column for layer 8]		Oil	
	7	0,1		[Diagram of lithological column for layer 7]	15°	Oil	
	6	0,24		[Diagram of lithological column for layer 6]		Oil	
	5	0,15		[Diagram of lithological column for layer 5]		Oil	
	4	0,11		[Diagram of lithological column for layer 4]		Oil	
	3	0,24		[Diagram of lithological column for layer 3]		Oil	
	2	0,05		[Diagram of lithological column for layer 2]		Oil	
	1	0,14		2427	[Diagram of lithological column for layer 1]		

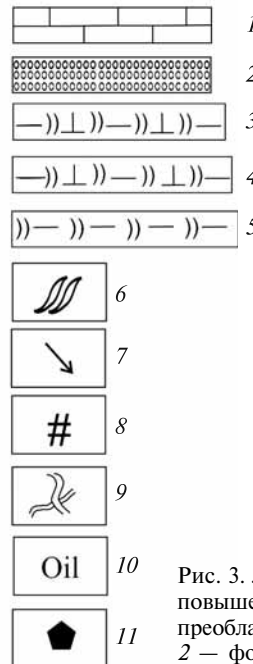
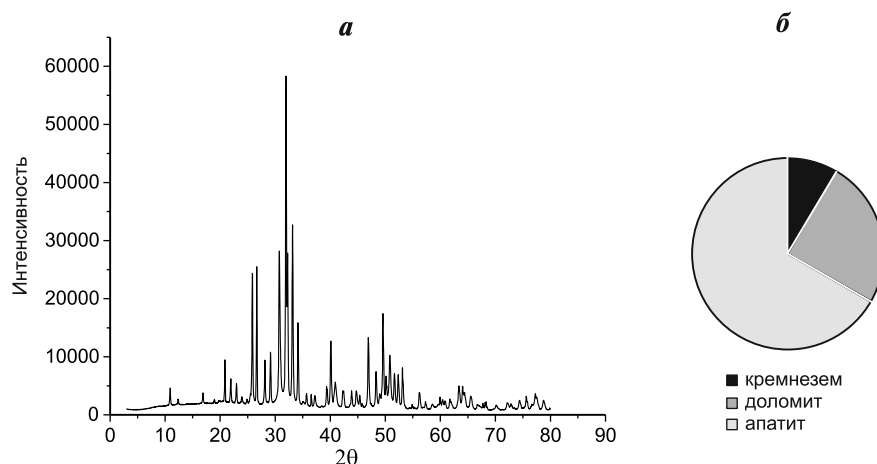


Рис. 3. Литологическая колонка интервала с повышенным содержанием фосфатов: 1–5 — преобладающие типы пород: 1 — известняки, 2 — фосфатные, 3 — глинисто-кремнисто-карбонатные, 4 — карбонатно-глинисто-кремнистые, 5 — глинисто-кремнистые; 6–7 — текстура: 6 — косолиновидная, 7 — оползания; 8 — трещины; 9 — жилы; 10–11 — включения: 10 — нефтенасыщение, 11 — обломки пород

Рис. 4. Рентгенограмма образца баженовской свиты из скважины на Красноленинском своде, содержащего рыхватые линзы (а), и круговая диаграмма состава его породы (%) (б)



ли, что в породах содержится апатит, количество которого может достигать 70 масс.%. В породах также присутствуют кремнезем и доломит, суммарное количество которых в образцах не превышает 50 масс.%. Пример рентгенограммы и круговой диаграммы состава образца с апатитовыми линзами приведен на рис. 4.

Большое количество нефтенасыщенных апатитовых линз позволило сделать предположение о высоком содержании подвижной нефти в образцах и возможных коллекторских свойствах исследуемого интервала в целом, а особенно в линзах. Исследования фильтрационно-емкостных свойств образцов цилиндрической формы размером 30×30 мм, содержащих апатитовые линзы, показали повышенные значения пористости по азоту, достигающей 7%. В то же время абсолютная проницаемость образцов с поправкой Клинкенберга оказалась достаточно низкой и не превышала 0,005 мД. Поскольку проницаемость <0,004 мД позволяет отнести породы к флюидоупорам, то в целом эти образцы можно отнести к потенциальным коллекторам, для разработки которых необходимо проведение гидроразрыва пласта (ГРП). Однако поскольку проницаемость определяется неоднородностью состава и строения всего цилиндра образца, такие низкие значения можно объяснить непроницаемой частью конкретного образца, представленной преимущественно доломитом и кремнеземом.

Для определения пористых характеристик непосредственно апатитовых линз выбран участок, из крупных линз которого выбурили цилиндрические образцы размером 10×30 мм. Для них изучены фильтрационно-емкостные свойства, которые показали, что пористость по азоту апатитовых линз может достигать 12–14%, при этом образцы имеют высокую абсолютную проницаемость.

Исследование структуры порового пространства и взаиморасположения различных минералов в образцах проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии. На рис. 5 приведены микрофотографии общего вида поверхности куска образца, содержащего большое количество апатита, и крупный план для апатита с развитым поровым пространством. В образце встречаются отдельные крупные кристаллы доломита, размер которых достигает 100 мкм, а также крупные частицы кремнезема размером 10–100 мкм, находящиеся во вмещающей породе мелкозернистого апатита. Развитая структура порового пространства, хорошо заметная на крупном плане, сформирована между кристаллами фторапатита, что подтверждает анализ элементного состава (рис. 6, табл. 1). Частицы апатита в основном мелкозернистые, размер большинства частиц составляет 0,5–1,0 мкм, однако встречаются и более крупные частицы, размер которых достигает 10 мкм. Размер пор варьирует от нескольких десятых долей микрометра до нескольких микрометров.

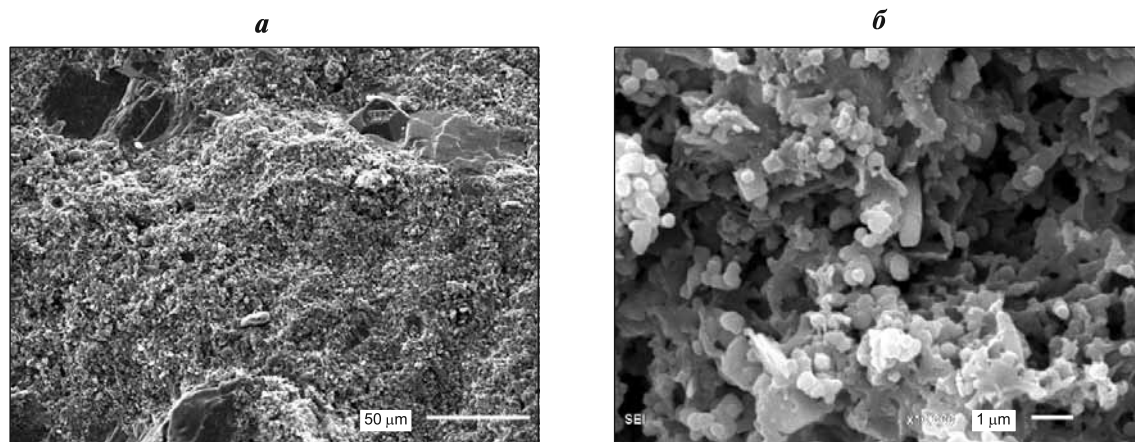


Рис. 5. Микрофотографии структуры апатитовой линзы: а — общий вид; б — крупный план центральной зоны общего вида

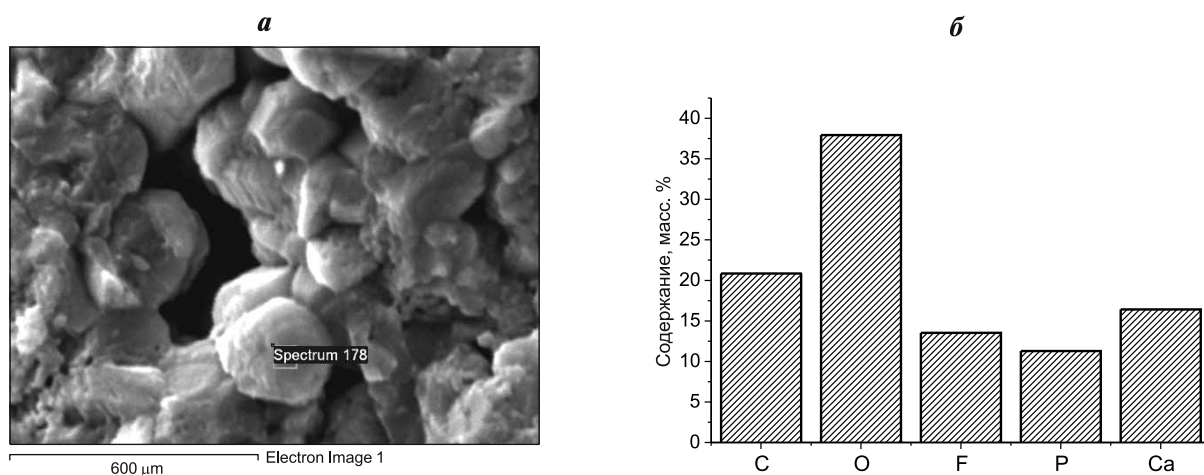


Рис. 6. Анализ элементного состава апатитовой линзы: *a* — фото участка, для которого исследовался элементный состав; *б* — гистограмма распределения элементов по массовому содержанию

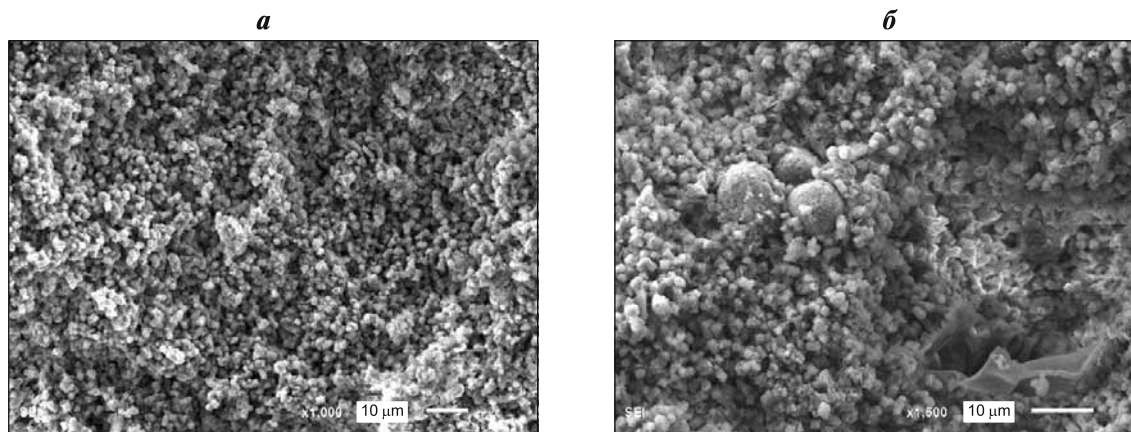


Рис. 7. Микрофотографии структуры фосфатного включения: *a* — общий вид; *б* — общий вид с включениями органического вещества

Таблица 1

Элементный состав образца, содержащего фторапатит

Элемент	Массовый %	Атомный %
C	20,84	31,03
O	37,93	42,40
F	13,53	12,73
P	11,28	6,51
Ca	16,42	7,32

В другой близлежащей скважине на Краснотенинском своде также обнаружены фосфатсодержащие породы, однако в них наблюдаются некоторые отличия. Так, анализ микрофотографий показал отсутствие доломитов в породе, но при этом в ней присутствуют кероген и фрамбониды пирита (рис. 7). Анализ элементного состава мелких частиц выявил отсутствие фтора и существенно большее содержание углерода, это свидетельствует о несколько иных условиях формирования и процессах, протекавших в рассматриваемых породах (рис. 8, табл. 2). Наличие углерода, количество которого превышает 50 ат.%, показывает высокое содержание органического

вещества. В то же время структура порового пространства рассматриваемых апатитовых участков одинакова, их пористые характеристики практически не отличаются, несмотря на различия элементного состава.

Помимо пористых характеристик нефтяные коллекторы должны содержать непосредственно нефть. Для проверки геохимических критериев, позволяющих выделить нефтенасыщенные интервалы, проведены пиролитические исследования. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты пиролиза образца, для которого ранее были представлены рентгенограмма и микрофотографии (рис. 4–6). Установлено, что образцы с повышенным содержанием фторапатита обогащены органическим веществом (ТОС 10 масс.%), параметр S1 варьирует от 5 до 8 мг УВ/г породы, а параметр S2 — 40–50 мг УВ/г породы. В соответствии с этими значениями апатитовые линзы обладают высокими значениями индексов продуктивности и нефтенасыщенности (>0,11 и >60 соответственно). Такие высокие значения индексов позволяют по геохимическим признакам отнести исследованные образцы к нефтяным коллекторам.

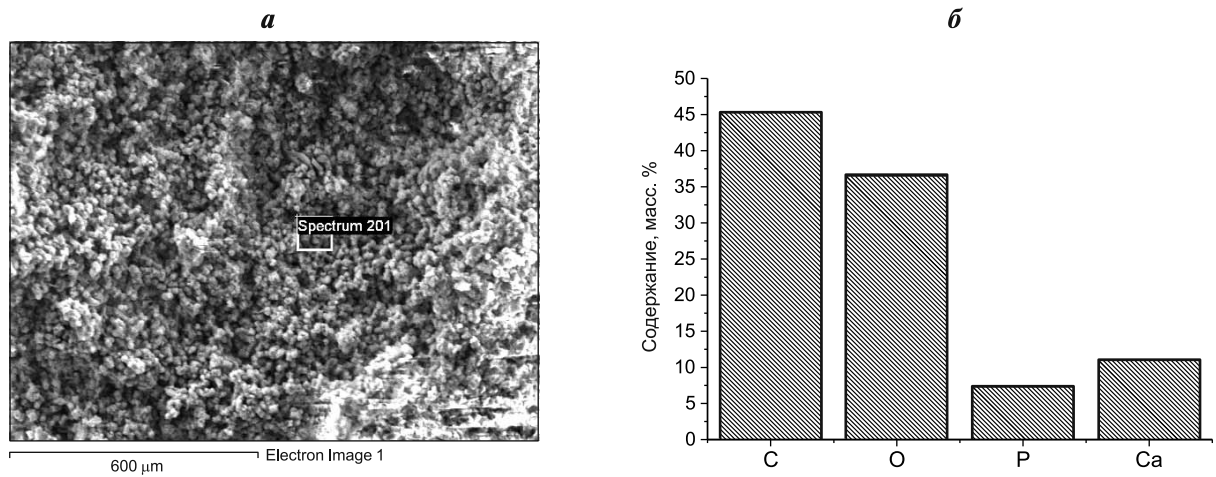


Рис. 8. Анализ элементного состава фосфатного включения: *а* — фото участка, для которого исследовался элементный состав; *б* — гистограмма распределения элементов по массовому содержанию

Таблица 2

Элементный состав образца, содержащего апатит

Элемент	Массовый %	Атомный %
C	45,29	57,49
O	36,47	34,75
P	7,30	3,59
Ca	10,95	4,17

Исследование геохимических характеристик образцов выше и ниже по разрезу показало, что образец с повышенным содержанием апатита можно выделить на основании значений индексов продуктивности и нефтенасыщенности, которые

почти в 2 раза превышают таковые для остальных образцов (рис. 9; образец с повышенным содержанием апатита находится на глубине 11,4 м, рис. 3.). По геохимическим показателям образцы с апатитовыми линзами выделяются на общем фоне породы аналогично коллекторам, приуроченным к прослоям радиоларитов, также имеющим высокие значения индексов продуктивности и нефтенасыщенности [Балушкина и др., 2015].

Закключение. Полученные нами результаты позволяют сделать вывод, что в баженовской свите встречаются интервалы, содержащие большое количество углеводородов и, вероятно, способные отдавать их даже при бурении стандартных гори-

Таблица 3

Пиролитические характеристики фосфоритового коллектора

S0	S1	S2	S3	TOC	T _{max}	HI	PI	OSI
мг УВ/г породы	мг УВ/г породы	мг УВ/г породы	мг CO ₂ /г породы	масс.%	°C	мг УВ/г TOC	S1/(S1+S2)	S1/TOC×100
1,95	6,05	47,03	0,53	9,05	440	520	0,11	66,88

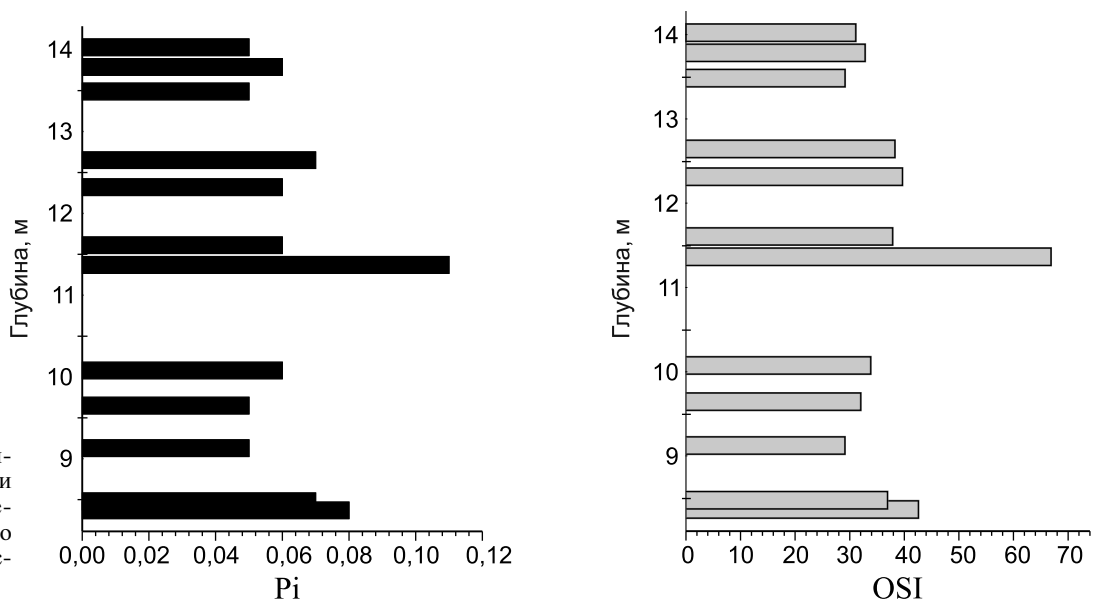


Рис. 9. Изменение индекса продуктивности (Pi) и индекса нефтенасыщенности (OSI) по разрезу скважины Краснореннинского свода

зонтальных скважин. Интервалы приурочены не только к кремнистым радиоляритовым породам и породам с керогеновой пористостью, но и к породам, содержащим большое количество апатитов в виде линз или даже отдельных прослоев. Непосредственно апатитовые линзы обладают высокими емкостными (пористость до 12–14%,

высокая проницаемость) и геохимическими характеристиками, позволяющими отнести их к коллекторам. При этом надо учитывать, что линзы могут быть включениями, поэтому проницаемость пласта может быть очень низкой, и для получения существенного притока потребуется проведение ГРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев И.С., Гаврилова Е.В., Бирун Е.М. и др. Баженовская свита. Общий обзор, нерешенные проблемы // Научн.-техн. вестн. ОАО «НК Роснефть». 2010. № 4. С. 20–25.

Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Белохин В.С. и др. Кремнистые коллекторы баженовского горизонта Средне-Назымского месторождения и структура их пустотного пространства // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 4. С. 35–43.

Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Кирюхина Т.А. и др. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти из них // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 48–60.

Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А. Структура пустотного пространства нефтенасыщенных пород баженовской и абалакской свит в центральной части Западно-Сибирского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 69–77.

Бычков А.Ю., Калмыков Г.А., Бугаев И.А. и др. Экспериментальные исследования получения углево-

дородных флюидов из пород баженовской свиты при гидротермальных условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34–39.

Васильев А.Л., Пичкур Е.Б., Михуткин А.А. и др. Исследования морфологии пустотного пространства керогена баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 28–31.

Зубков М.Ю. Особенности распределения урана в битуминозных отложениях баженовской свиты (Западная Сибирь) // Каротажник. 2015. № 5 (251). С. 3–32.

Хамидуллин Р.А., Калмыков Г.А., Корост Д.В. и др. Фильтрационно-емкостные свойства пород баженовской свиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 5. С. 57–64.

Loucks R.G., Reed R.M., Ruppel S.C., Jarvie D.M. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale // JSR. 2009. Vol. 79/12. P. 848–861.

Modica C.J., Lapierre S.G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation; example from the Mowry Shale in the Powder River basin of Wyoming // AAPG Bull. 2012. Vol. 96/1. P. 87–108.

Поступила в редакцию
06.04.2016