



БИТУМЫ В СОСТАВЕ ВЕРХНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ СВЯЗЬ С ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

М. Ю. Зубков

Западно-Сибирский геологический центр, Тюмень, Россия

Рассмотрены различные примеры присутствия битумов в составе верхнеюрских отложений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Установлена связь их образования с гидротермальными процессами. Перечислены основные варианты причин появления пика S_1 на пирограммах различных типов пород. Установлено, что по крайней мере в высокотемпературных участках Западно-Сибирского бассейна породы баженовской свиты и ее аналогов содержат в своем составе битумы. Определено, что эти битумы относятся к классу тиобитумов. Экспериментально выяснена примерная температурная граница, при превышении которой битумы образуются в породах, содержащих органическое вещество. Рассмотрены причины, вызывающие закономерное изменение интенсивностей и само наличие или отсутствие на пирограммах различных типов пород пиков S_1 , S_2^0 и S_2 . Предложен механизм отложения битумов в породах-коллекторах верхнеюрского возраста.

Ключевые слова: верхнеюрские отложения, гидротермальные флюиды, битумы, пиролиз, капельная хроматография.

BITUMENS IN THE COMPOSITION OF THE UPPER JURASSIC DEPOSITS OF WEST SIBERIA AND THEIR CONNECTION WITH THE HYDROTHERMAL PROCESSES

M. Yu. Zubkov

Western-Siberian Geological Center, Tyumen, Russia

Various examples of bitumen in the Upper Jurassic deposits of the West-Siberian oil and gas basin are considered. The connection of their formation with hydrothermal processes occurring in the deposits under consideration has been established. The main reasons for the S_1 peak appearance on pyrograms of various rock types are listed. It has been established that at least in the high-temperature sections of the West-Siberian basin, rocks of the Bazhenov Formation and its analogues contain bitumen. It has been established that bitumens of the Upper Jurassic sediments belong to the class of thiobitumens. An approximate temperature limit has been experimentally established above which bitumens are formed in rocks containing organic matter. Reasons causing a regular change in intensities and the very presence or absence of various types of peaks S_1 , S_2^0 and S_2 on pyrograms are considered. A mechanism for the deposition of bitumen in the Upper Jurassic reservoir rocks is proposed.

Keywords: Upper Jurassic deposits, hydrothermal fluid, bitumen, pyrolysis, droplet chromatography.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-1-9-24

В настоящей публикации приняты следующие сокращения: БС – баженовская свита; ГФ – гидротермальный флюид; ГС – гетеросоединения; ОВ – органическое вещество; УВ – углеводороды; неУВ – неуглеводородные компоненты, ППП – потенциально продуктивные породы, НІ – водородный индекс.

Битумы в составе осадочного чехла Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна встречаются довольно редко, либо их просто не отличают от других типов ОВ. Наиболее широко распространены отложения БС, которые первоначально именовались битуминозными из-за высокого содержания растворимых в органических растворителях УВ и ГС. Позднее прилагательное «битуминозные» постепенно исчезло из названия, и их стали именовать по набору преобладающих компонентов в свите. Причем вместо терминов «ОВ» и «битум» начали использовать определение «кероген», под которым в настоящее время понимается ОВ, не растворимое в органических растворителях [1, 9, 10–13]. Однако, как мы увидим далее, метаморфизованные (под

воздействием гидротермальных флюидов) битумы также становятся почти не растворимыми в органических растворителях, и тогда, с формальной точки зрения, их также можно относить к керогену. Но битумы – это эпигенетические образования, поэтому, исходя из генетического принципа классификации нафтидов, их нельзя считать керогеном.

В настоящей публикации термин «кероген» вообще не употребляется, поскольку он со временем потерял свой первоначальный (*генетический*) смысл, который в него вкладывал автор этого понятия – А. Крум-Браун (1912): ОВ горючих сланцев, т. е. представленное сапропелем, в отличие от углей, состоящих из ОВ гумусового типа [1]. Иными словами, как и подавляющее большинство геологических определений, термин первоначально имел *генетический* смысл, сменившийся затем *аналитическим*. Если проводить аналогию с *генетическим* термином «битум» и *аналитическим* его вариантом «битумоид», то и кероген, как не растворимая в *органических растворителях* часть ОВ, должен



быть хлороформным, бензольным, спиртобензольным, сероуглеродным и т. д. – в зависимости от того, в каком растворителе он не растворяется. Если же вернуть этому термину его *генетический* смысл, то по аналогии с углями он должен характеризоваться определенным *мацеральным* составом, подтверждающим его морское или озерное, а не террагенное происхождение.

Термин «битум» также имеет несколько различных значений, поэтому, чтобы избежать путаницы и неверного понимания материала, договоримся, что мы подразумеваем эпигенетическое его происхождение по отношению к вмещающей породе. Если он образован из исходного ОВ в этой же породе, то это автохтонная разновидность битума, которая, как мы увидим, характерна для БС. Если же он переместился на большее или меньшее расстояние из материнских отложений, содержащих генерировавшее его ОВ, то это уже аллохтонная или параавтохтонная его разновидности соответственно. Растворимость в органических растворителях не обязательный его признак [1]. Иначе говоря, под термином «битум» мы подразумеваем здесь эпигенетический продукт, образующийся именно из исходного ОВ и не являющийся производным от нефти, как это понимается в других трактовках термина. В состав битума входят битумоиды – его компоненты, растворимые в органических растворителях. В зависимости от типа растворителя они могут быть хлороформными, бензольными, спиртобензольными и т. д.

Битумы встречаются не только в составе БС. Их присутствие отмечается и в подстилающих более древних отложениях, включая породы нижнеюрского возраста [5]. Они заполняют поровое пространство в песчаниках, резко снижая их фильтрационно-емкостные свойства. Вопрос об образовании битумов и их появлении в составе БС и поровом пространстве пород-коллекторов до сих пор открыт. Поэтому попробуем разобраться в генезисе битумов, присутствующих в составе осадочного чехла Западно-Сибирского бассейна, на примере верхнеюрских отложений.

Методы исследования и аппаратура

Изучение микрообъектов осуществлялось с помощью оптической и электронной (РЭМ) микроскопии. Присутствие в составе РЭМ микронзонда позволяло исследовать элементный состав интересующих микрообъектов. При изготовлении прозрачных петрографических шлифов из пород-коллекторов с целью исследования структуры их порового пространства использовался метод окрашивания смолой красного или голубого цвета, заполнявшей открытые пустоты между минеральными зернами.

Пиролитические исследования образцов БС и ее аналогов проводились с помощью программно-аппаратурного комплекса «Хроматэк-Кристалл

5000.2», который позволяет получить следующие параметры: S_1 , S_2 и T_{max} . Принято считать, что величина S_1 соответствует количеству газообразных и жидких УВ, содержащихся в поровом пространстве образцов и выделяющихся при их нагреве в изотермическом режиме при 300 °С в течение 3 мин. Пик S_2 , также по общепризнанному мнению, соответствует количеству УВ, выделяющихся из образцов при их дальнейшем нагреве в интервале температур 300–650 °С в результате термокрекинга оставшейся части ОВ [9–13].

После удаления карбонатов из исследуемых образцов на анализаторе АН 7529-М определялось содержание в них органического углерода ($C_{орг}$). Водородный индекс рассчитывался в соответствии с известным уравнением:

$$HI = S_2 \cdot 100 / C_{орг} \quad (1)$$

С целью оперативного анализа на предмет присутствия или, наоборот, отсутствия битумов в отложениях баженовской свиты и их качественного состава использовалась люминесцентно-битуминологическая методика или капельная хроматография, предложенная В. Н. Флоровской в 1951 г.

В соответствии с этой методикой на порошковые пробы из пипетки наносилась капля хлороформа, который растворяет битуминозные вещества. На месте капли появляется светлое пятно (голубоватое, беловатое, желтеющее, буряющее в ультрафиолетовом свете). По цвету этого пятна по упомянутой методике выделялись битумы четырех групп: 1) легкие (ЛБА); 2) маслянистый (МБА); 3) средний (СБА); 4) смолисто-асфальтовый (САБА).

Несмотря на некоторые известные недостатки описываемой методики, она была использована из-за простоты и оперативности проведения анализов. С целью исключения кинетического фактора, заключающегося в изменении цвета хлороформных вытяжек с течением времени, их фотографирование осуществлялось практически сразу после теста.

Моделирование воздействия гидротермальных флюидов различного состава на ОВ в осадочных породах осуществлялось в интервале температур 235–390 °С, мольная доля углекислоты (χ_{CO_2}) в составе флюида изменялась от 0 до 0,12; гидростатическое давление во всех экспериментах равнялось 70 МПа, для чего использовались специальные автоклавы высокого давления. Продолжительность экспериментов составляла от 5 до 19 сут [8]. В качестве образцов для экспериментов по гидротермальному моделированию использовались породы, обогащенные ОВ гумусово-сапропелевого состава, отобранные из тюменской свиты в пределах территорий, характеризующихся нормальным температурным градиентом (около 3,3 °С/100 м), а потому имевших невысокую степень катагенетического преобразования. Образцы из БС не использовались из-за того, что все они были отобраны в пределах высокотемпературных зон (с темпера-

турным градиентом около $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$), а значит, исходное ОВ, входившее в их состав, претерпело значительное катагенетическое преобразование (скорее всего, под действием высокоэнталийных гидротермальных флюидов) и потому превратилось в битум.

Результаты исследований

Чаще всего битумы встречаются в кремнистых и карбонатных, а также переходных между ними литологических разновидностях пород, входящих в состав БС, в которых под действием тектоно-гидротермальных процессов образуются вторичные коллекторы, содержащие углеводородные залежи, по этой причине названных автором потенциально продуктивными (ППП) [2–4]. В них на поверхности трещин и каверн часто присутствуют битумы с различной консистенцией, зависящей от степени их метаморфизма (рис. 1).

Кроме битумов на поверхности трещин и каверн отмечаются различные минералы, имеющие гидротермальное происхождение и представленные главным образом кристаллами кварца, причем часто нескольких генераций (рис. 2, а, б), а также многочисленные кристаллические агрегаты магнезиального кальцита, кальцито-барита (см. рис. 2, в, г) и других минералов [2–4]. Следует обратить внимание на то, что в составе битумов присутствуют ванадий и довольно много серы, поэтому их можно отнести к тиобитумам, а в ряде случаев – к классу ванадиеносных тиобитумов (см. рис. 2, в).

Как уже отмечалось, в зависимости от степени метаморфизма или, вернее, величины термического воздействия гидротермальных флюидов на исходное ОВ образующиеся из него битумы имеют различную консистенцию – от вязко-пластичной до твердо-хрупкой (рис. 3, а, б). Кроме поверхности трещин и каверн в ППП, битумы встречаются и непосредственно в самой БС в виде прослоев различной мощности и протяженности (от первых десятков микрон до десятков миллиметров) (см. рис. 3, в, г).

При очень больших увеличениях (в 10–15 тысяч раз) становится хорошо различимой специфическая микротекстура пленок битумов на поверхности кристаллов кварца, напоминающая по своему виду микротакеры (см. рис. 3, д, е). Вероятно, именно эта битумная пленка придает поверхности минералов гидрофобные свойства. Можно также предположить, что если в глинах описываемая текстура возникает вследствие испарения из них воды, то в битумных пленках – из-за потери ими легких УВ по мере остывания первоначально очень горячих нафтидо-водных флюидов, из которых они отлагались на поверхности кристаллов. Более подробно об этом будет сказано далее.

В прозрачных петрографических шлифах хорошо видно, как битумы пропитывают различные литологические типы пород, входящих в состав БС и ее аналогов, заполняя микропоры и микротрещины (рис. 4). Необходимо обратить внимание на то, что битумы лучше всего диагностируются именно в карбонатных разновидностях пород. Особо следует вы-

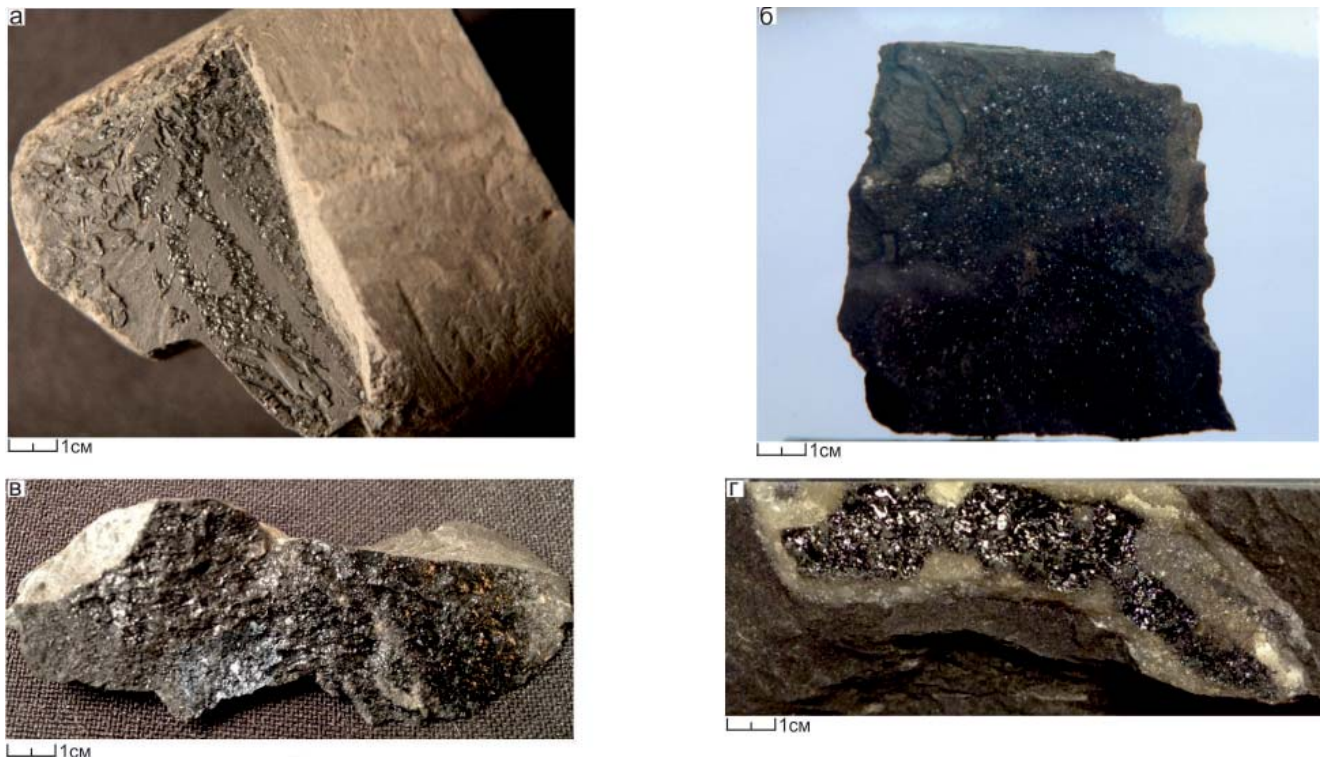


Рис. 1. Образцы, отобранные из баженовской свиты, с пленками битумов на поверхности трещин и каверн (а, б – Маслиховское месторождение; в – Пальяновская площадь; г – Приобское месторождение): а – силицит (по [2]), б – карбонатный радиолярит; в – известняк (по [2]); г – известняк

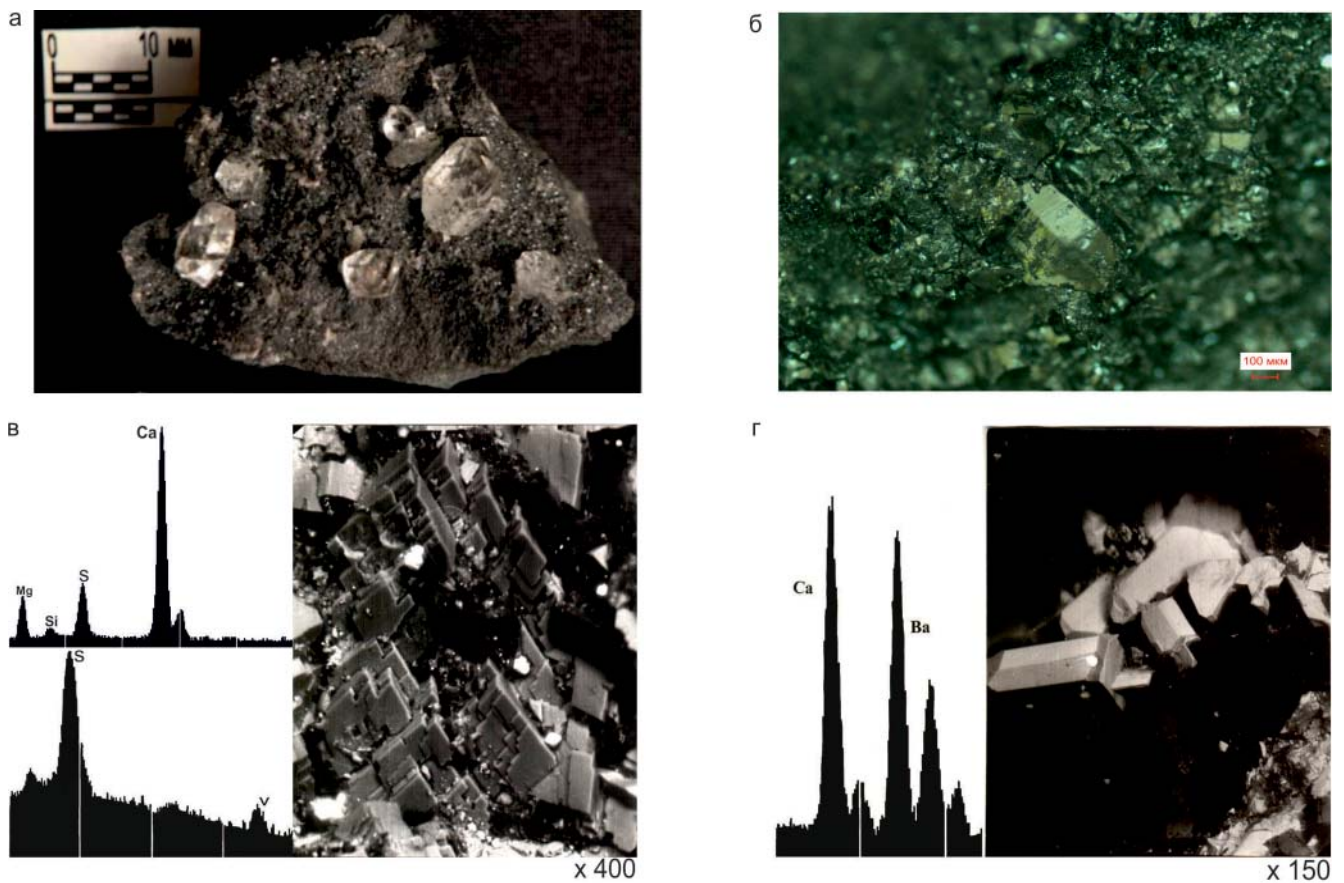


Рис. 2. Ассоциации минералов и битумов гидротермального происхождения на поверхности трещин и каверн в кремнистых и карбонатных литологических типах пород, входящих в состав баженовской свиты и ее аналогов (а – Ем-Еговская; б – Пальяновская площади; в, г – Маслиховское месторождение): а – кристаллы кварца двух генераций (ранней – микрокристаллической и поздней крупнокристаллической), покрытые пленками битумов (по [2]); б – кристаллы кварца, покрытые битумами; снимки РЭМ: в – кристаллы доломита (верхний элементный спектр), окруженные ванадиеносным тиобитумом (нижний элементный спектр); г – кристаллы барито-кальцита, в окружении тиобитума (элементный спектр рядом со снимком)

делить мелкозернистый известняк с микрокавернами, в которых отмечены агатовидные сферолиты халцедона с ритмически-зональным рисунком, обусловленным многочисленными микровключениями нафтидов. Последние, скорее всего, представляют собой эмульсию в гидротермальном растворе, из которого кристаллизовались эти сферолиты халцедона, в процессе роста захватывавшие капельки эмульсии (см. рис. 4, в). Ритмично-зональная окраска сферолитов свидетельствует о том, что их рост осуществлялся не равномерно, а пульсационно, т. е. гидротермальные флюиды, содержащие нафтидную эмульсию, поступали многократно. По числу этих эмульсионных «колец» можно примерно оценить, сколько раз флюиды проникали в рассматриваемую микрокаверну. Кроме кристаллов кварца в пустотах часто отмечаются многочисленные кристаллы эпигенетического (гидротермального) каолинита и/или диккита. Промежутки между их отдельными кристаллами также насыщены легким битумом или нафтитами нефтяного ряда (см. рис. 4, г).

Под БС в кровельной части пласта Ю₁ в пределах Грибного месторождения встречен необычный по своему составу маломощный сильно кавернозный пласт (Ю₁⁰), мощностью около 50–70 см. Он

сложен исключительно мелкокристаллическим кварцем с маломощными (до 10–15 см) прослойками углей, которые интенсивно преобразованы предположительно гидротермальными флюидами (рис. 5). Эти породы получили условное название «псевдокварцита». На фотографиях образцов, снимках РЭМ и прозрачных петрографических шлифах хорошо видно, что промежутки между кристаллами кварца часто заполнены битумом (тиобитумом по данным элементного микроанализа), имеющим почти черный цвет (см. рис. 5).

Обращает на себя внимание наличие в этих породах растительных остатков: лишь «сеточки», представленные сохранившимися клеточными оболочками. Частично эти «сеточки» оказались разорваны росшими кристаллами кварца, частично также заполнены кварцем, а открытые ячейки клеток прокрашены голубой смолой (см. рис. 5, е).

Аналогичный маломощный пласт псевдокварцитов встречен и в разрезе верхнеюрских отложений Ахтамарского месторождения. Он, как и рассмотренный, тоже сложен практически одним мелкокристаллическим кварцем, а углистые обломки часто замещены пиритом, в них отмечаются прекрасно ограненные кристаллы кварца, а также

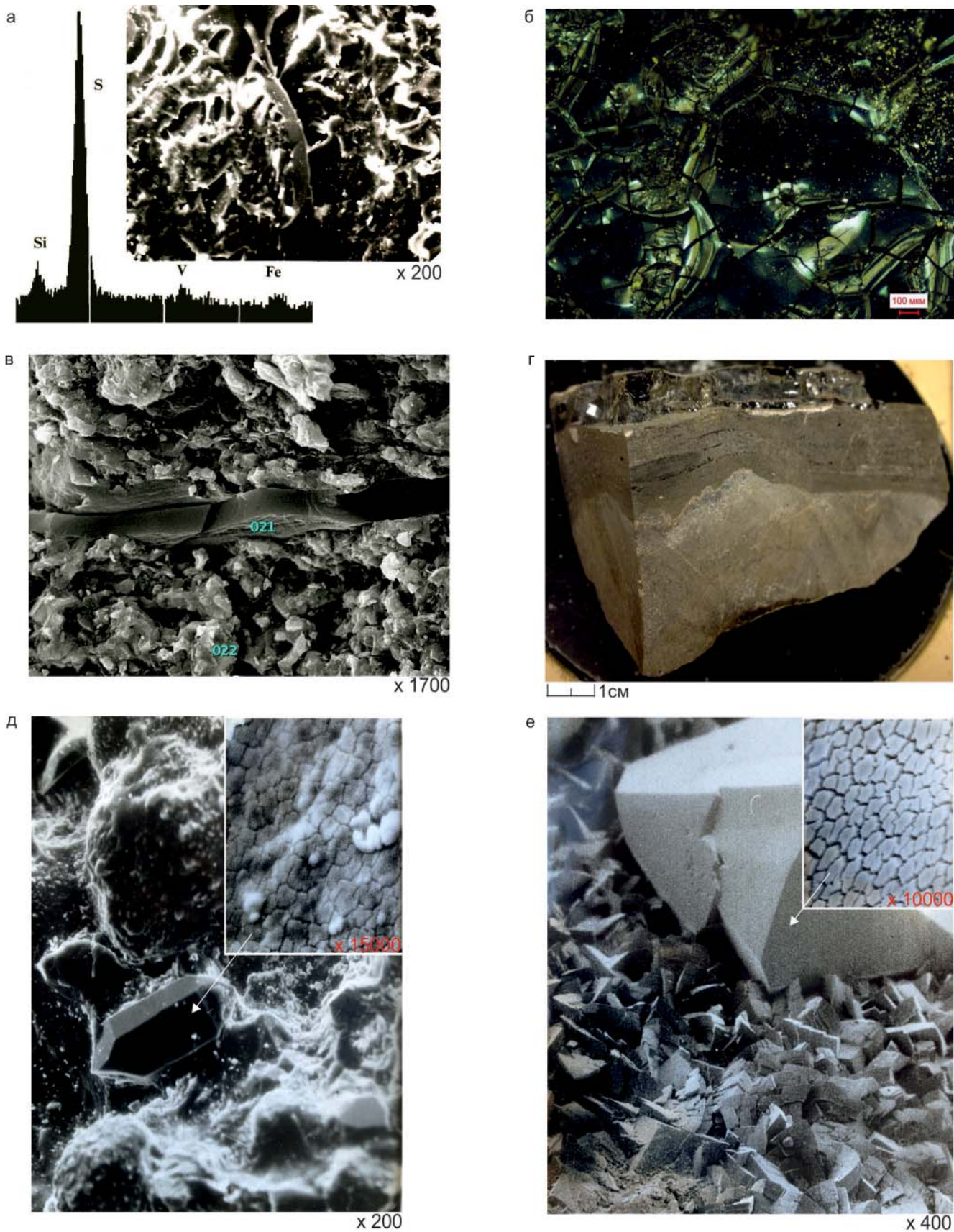


Рис. 3. Битумы в составе баженовской свиты и ее аналогов (а, д, е – Маслиховское; в – Верхнесалымское месторождения; б, г – Пальяновская площадь), имеющие различную консистенцию (а, б) и размеры (в, г), а также примеры их микроструктуры (д, е): а – снимок РЭМ с пластично-вязким ванадиеносным тиобитумом (элементный спектр рядом со снимком); б – твердо-хрупкий битум (по [6, 7]); в – микропрослойки битума толщиной около 3 мкм и длиной более 60 мкм; г – образец с битумным прожилком мощностью около 6 мм и длиной более 80 мм; д, е – кристаллы кварца, покрытые тонкими пленками битумов, микротекстура которых приведена на врезках

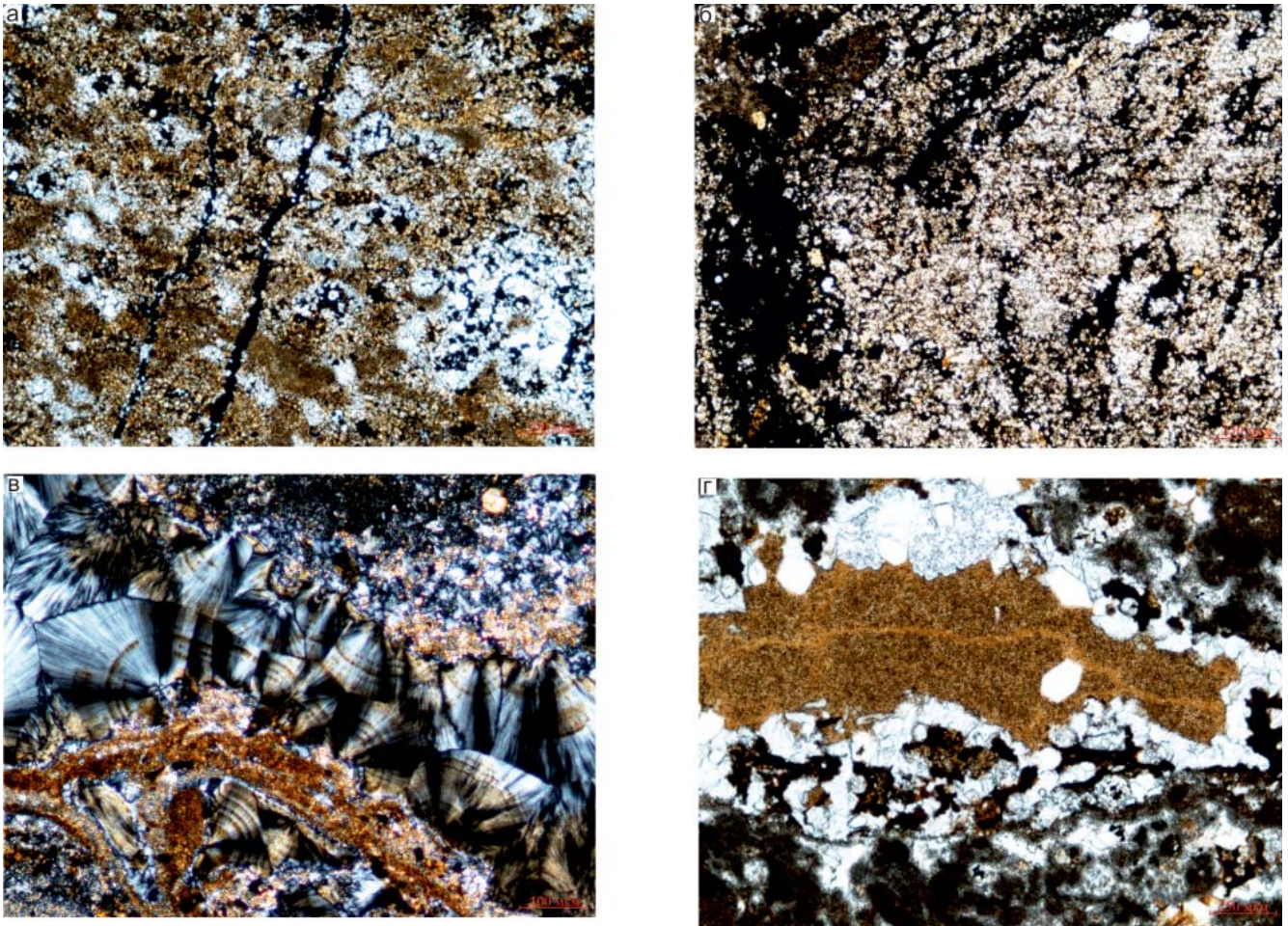


Рис. 4. Трещиновато-кавернозные и пористые разновидности карбонатных пород баженовской свиты и ее аналогов, содержащие метаморфизованные битумы (а – Каменная, б, г – Пальяновская площади, в – Маслиховское месторождение): а – карбонатный радиоларит; б – мелкозернистый известняк; в – известняк с микрокавернами, в которых присутствуют агатовидные сферолиты халцедона; г – карбонатный копролит с микрокаверной, заполненной мелкокристаллическими агрегатами гидротермальных каолинита (диккита) и кварца

пленки и сгустки битума (рис. 6, а, б). Микротекстура этих битумов комковатая, они очень богаты серой, т. е. представляют собой класс тиобитумов (см. рис. 6, в). На растительных остатках, имеющих клеточную микротекстуру, отмечаются великолепно ограненные многочисленные кристаллы кварца (см. рис. 6, г).

В прозрачных петрографических шлифах хорошо видно, что псевдокварциты сложены многочисленными мелкими кристаллами кварца, промежутки между которыми часто заполнены черным битумом, а оставшееся свободным пространство – смолой красного цвета (см. рис. 6, д). Как и на Грибном месторождении, здесь в псевдокварцитах встречаются обломки растительности, от которых сохранились лишь «сеточки» от сохранившейся клеточной микротекстуры, часто разорванной росшими кристаллами кварца (см. рис. 6, е). Основная часть пор в шлифе заполнена черным битумом. Однако в оставшиеся свободными поры проникла красная смола, благодаря чему структура порового пространства стала отчетливо видна (см. рис. 6, д, е).

Ранее уже упоминалось, что в составе пласта Ю₁⁰ присутствуют маломощные углистые прослои,

которые, как и сам пласт, подвергались воздействию гидротермальных флюидов. В результате произошла интенсивная пиритизация углей и генерация ими битумов (рис. 7, а, б). Пиритизация растительных остатков отмечается в том же пласте и в пределах Ахтамарского месторождения (см. рис. 6, б).

В поровом пространстве песчаников, слагающих пласт П₁ в Шаимском НГР, также отмечается присутствие тиобитумов, правда, в их составе серы заметно меньше, чем в ранее рассмотренных примерах (см. рис. 7, в). На увеличенном фрагменте того же снимка хорошо видна комковатая микротекстура тиобитума (см. рис. 7, г).

Пиролитические исследования битумов, присутствующих в виде самостоятельной фазы в форме маломощных прослоев или линз и собственно самих образцов БС, в которых эти битумы встречаются, показали, что их пирограммы практически одинаковы (рис. 8, а, б). Из этого можно сделать вывод, что и в поровом пространстве БС имеются те же самые битумы, что и выделившиеся из нее в свободную фазу. Обращает на себя внимание небольшая величина пика S₁ на пирограммах битумов и образцов (см. рис. 8, а, б). По существующим

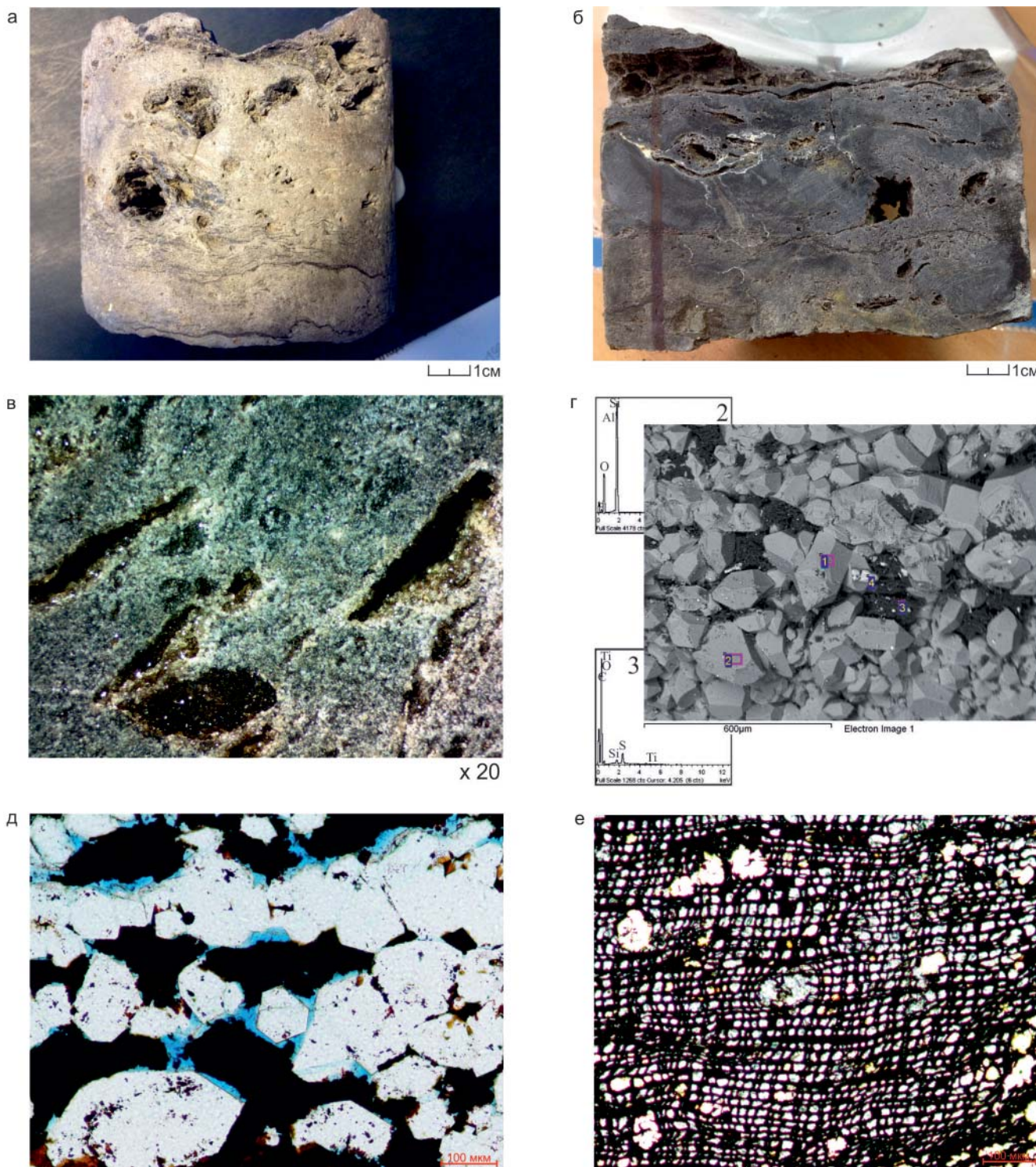


Рис. 5. Образцы псевдокварцита (а–в), снимок РЭМ (г) и прозрачные петрографические шлифы (д, е), пласт Ю₁⁰ (Грибное месторождение): а – общий вид полноразмерного образца (по [5]); б – отрезанная от него «щечка»; в – увеличенный фрагмент поверхности «щечки»; г – поверхность трещины с многочисленными прекрасно ограниченными кристаллами гидротермального кварца и битумом, заполняющим пустоты между ними (вверху элементный спектр кристалла кварца, внизу – битума); д, е – на снимках прозрачных шлифов: белое – кристаллы кварца, черное – битумы и графитизированные (?) остатки растительности с сохранившейся клеточной микротекстурой, голубое – смола

представлениям, этот пик характеризует содержание в образцах подвижных и сорбированных УВ в поровом пространстве пород [9–13].

Однако проведенные исследования ЯМР спектров битума, отобранного из тутлеймской свиты Пальяновской площади (аналог БС), показали, что

свободных (подвижных) молекул УВ в составе битума нет, так как амплитуда сигнала от него не отличается от таковой шума (см. рис. 8, в). Основываясь на этом, мы предположили, что УВ, входящие в состав пика S₁, присутствуют в битуме в форме «твердых растворов» [6, 7]. Они выделяются из битума при

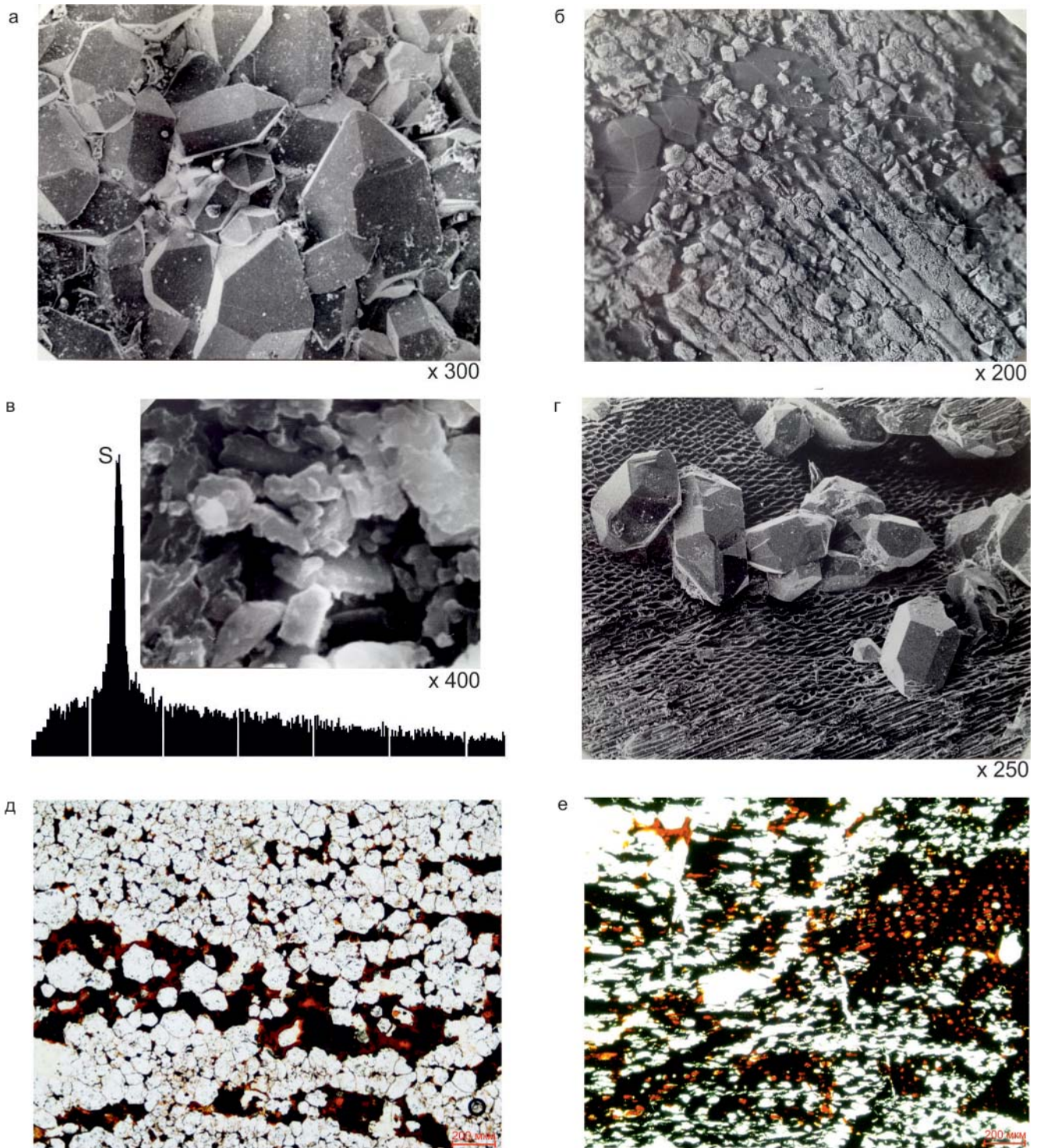


Рис. 6. Снимки РЭМ (а-г) и прозрачных петрографических шлифов (д, е) гидротермальных псевдокварцитов, пласт Ю₁⁰ (Ахтамарское месторождение): а – микрокристаллы кварца, слагающие породу; б – пиритизированный растительный детрит с кристаллами кварца и тиобитумом (темно-серое справа); в – тиобитум с комковатой микротекстурой и его элементный спектр; г – кристаллы кварца на графитизированной (?) подложке растительного детрита с сохранившейся клеточной микротекстурой (темно-серое вверху справа – тиобитум), по [5]; на снимках петрографических шлифов (д, е): белое – кристаллы кварца, черное – битум и метаморфизованный растительный детрит с сохранившейся клеточной микротекстурой, красное – смола

нагреве до температур их кипения. Поскольку температура, при которой фиксируется пик S_1 , составляет 300 °С, то все УВ, имеющие такую же температуру кипения, испаряются из битума.

Сопоставление результатов капельной хроматографии образцов и их пирогрaмм показало, что

в карбонатных образцах, содержащих аллохтонные нафтиды, они представлены преимущественно УВ, частично – масляной фракцией с примесью «легких» смол типа бензольных (рис. 9, а). О преимущественно углеводородном составе свидетельствует практически белый цвет хлороформенной вытяжки

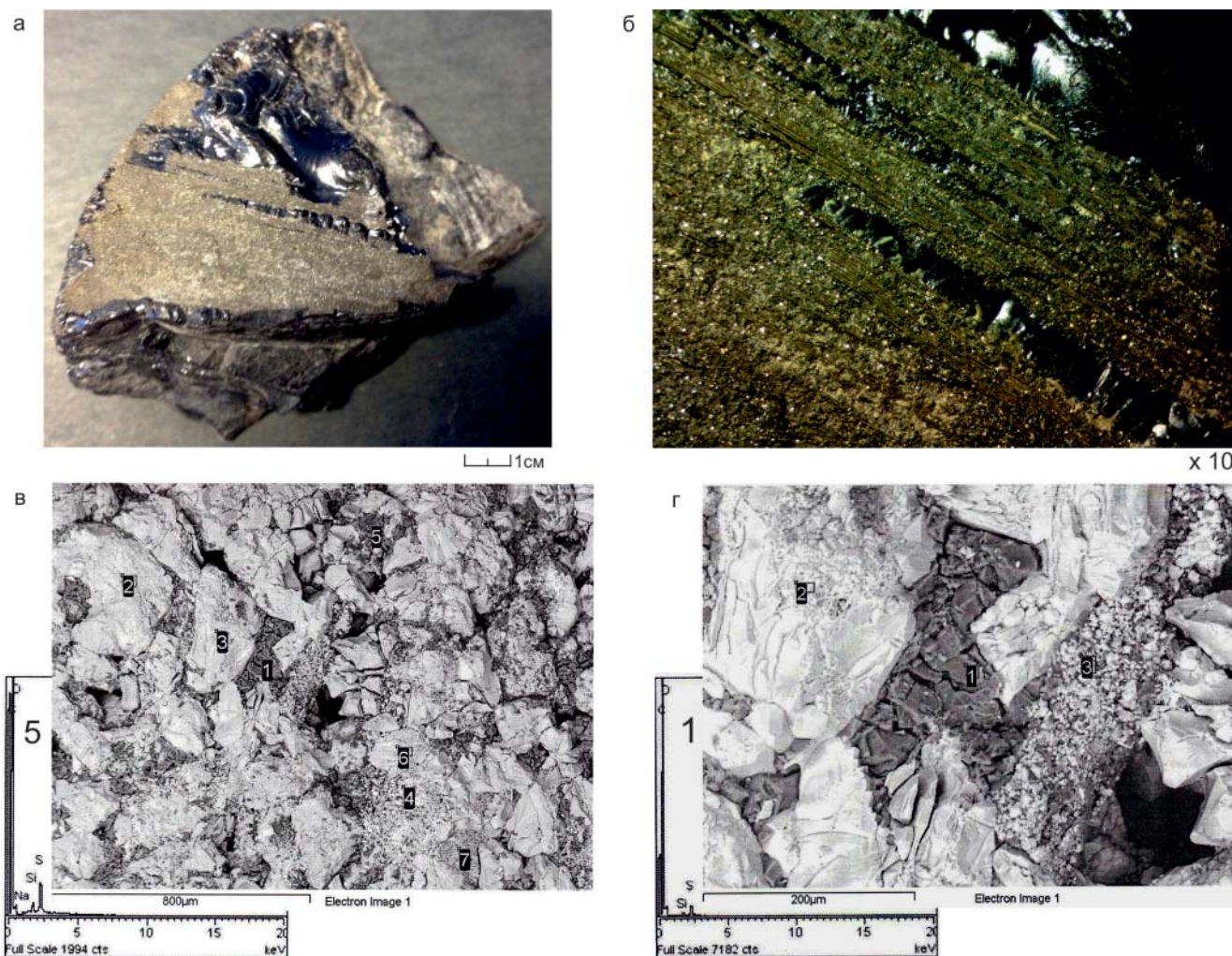


Рис. 7. Образцы с битумами, генерированными углем под воздействием гидротермальных флюидов, пласт Ю₁⁰ (Грибное месторождение) (а, б) и снимки РЭМ битуминозных песчаников, пласт П₁ (Шаимский НГР) (в, г), элементные спектры получены с участков, обозначенных на снимках цифрами

(ЛБА), полученной из рассматриваемого образца, а о небольшом содержании нафтидов в нем – очень узкое кольцо полученной капельной хроматограммы, а также низкое значение C_{opr} . Интересно, что на пираграмме этого образца основной пик – S_2^0 , которому соответствует значение $T_{max} = 317\text{ }^\circ\text{C}$, в то время как пик S_2 проявляется в виде слабо выраженного «плеча» справа от него (см. рис. 9, а).

Следующий образец, также представляющий собой кремнистый известняк, более пористый. В его поровом пространстве содержится гораздо больше аллохтонных нафтидов. Об этом свидетельствует очень широкое кольцо полученной от него капельной хроматограммы (см. рис. 9, б). Судя по цвету хлороформенной вытяжки, в ее составе также преобладают УВ, включая масляную фракцию, но, кроме того, отмечены и ГС, придающие ей серовато-коричневый цвет (см. рис. 9, б). Это подтверждается полученной пираграммой образца, на которой хорошо выражены все три пика – S_1 , S_2^0 и S_2 .

Капельная хроматограмма, полученная от сильно битуминозного глинистого силицита, заметно отличается от предыдущих. Она характеризуется

небольшой шириной кольца, имеющего светло-коричневый цвет, что свидетельствует о небольшом содержании в образце растворимых в хлороформе нафтидов, причем основная их часть представлена асфальто-смолистыми компонентами (САБА). Сам битум, которого в образце около половины, представляет собой «рестит», оставшийся после воздействия высокоэнтальпийного гидротермального флюида на образец и содержащееся в нем исходное ОВ. Вследствие этого все наиболее подвижные и легкие УВ компоненты, включая какую-то часть ГС, образовавшиеся из исходного ОВ в результате этого воздействия (аквапиролиза), эмигрировали в ближайшие породы-коллекторы (см. рис. 9, в). Метаморфизованный под действием гидротермальных флюидов битум превратился в слабо растворимую субстанцию, напоминающую нефтяной кокс или керит.

Сам битум, в котором имеется небольшая примесь микрообломков карбонатов, также характеризуется низкой концентрацией растворимых в хлороформе компонентов, что подтверждается малой шириной кольца капельной хроматограммы

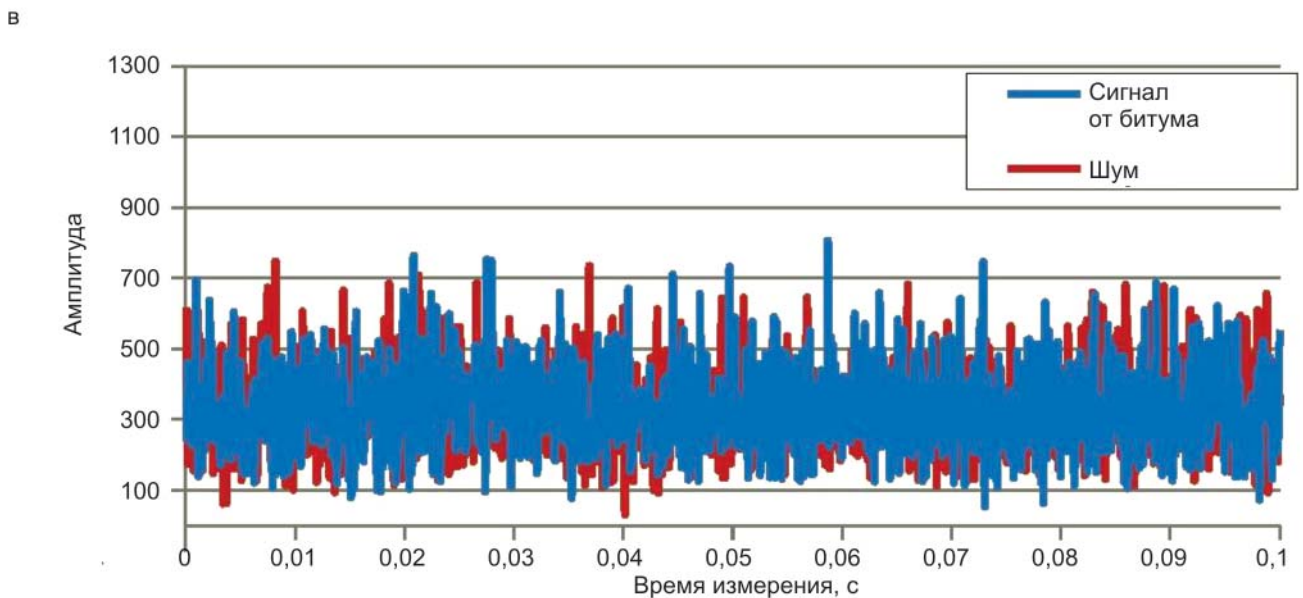
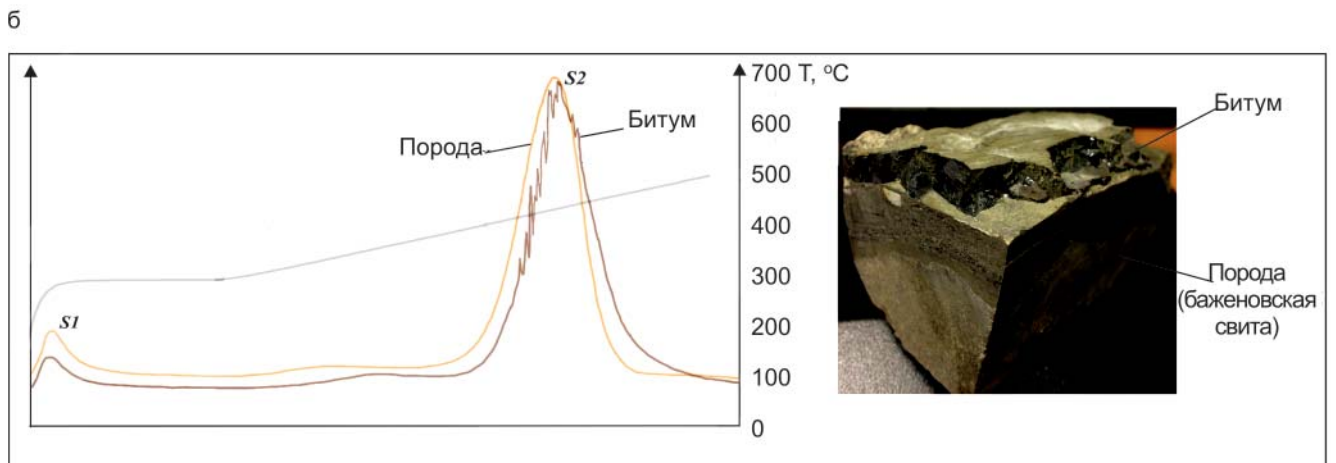
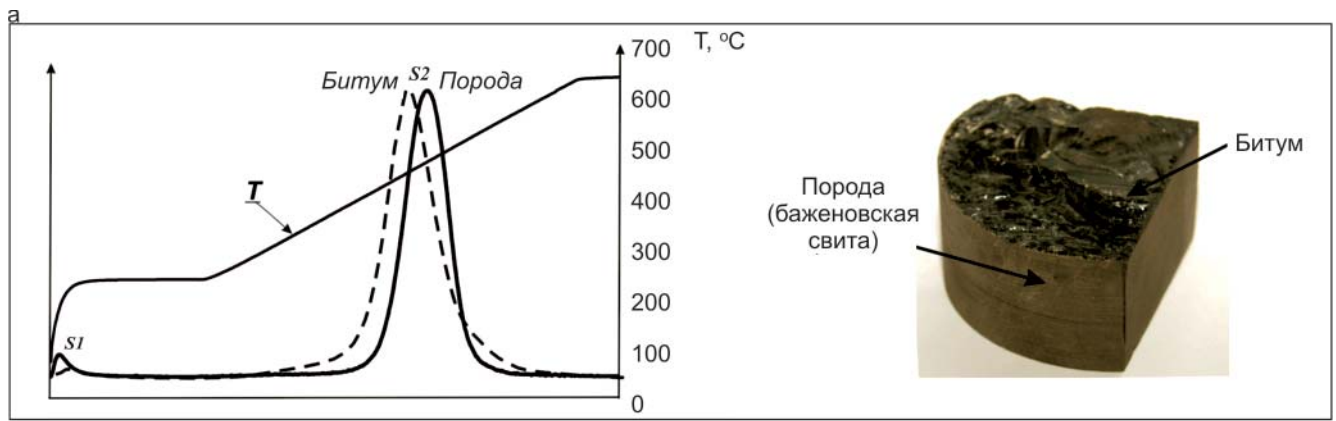


Рис. 8. Пирограммы битумов и образцов пород базеновской (а) и тутлеймской (б) свит (Пальяновская площадь): а – по данным В. Н. Меленевского, ИНГГ СО РАН; в – релаксационные кривые ЯМР сигнала от образца битума, представленного на предыдущем снимке, и шума (по [4])

(см. рис. 9, г). Судя по ее темно-бурому цвету, растворившиеся в хлороформе компоненты представлены преимущественно смолами и асфальтенами, причем последние преобладают (САБА). Так же как и в предыдущем случае, рассматриваемый битум – это, скорее всего, сильно метаморфизованный под действием гидротермальных флюидов битум, кото-

рый образовался из исходного ОБ, входящего в состав БС, в результате аквапиролиза теми же самыми гидротермальными флюидами.

Следует отметить, что по мере увеличения степени метаморфизма битумов, включая их аллохтонные разновидности, значение T_{\max} закономерно увеличивается с 317 до 450 °С (см. рис. 9).

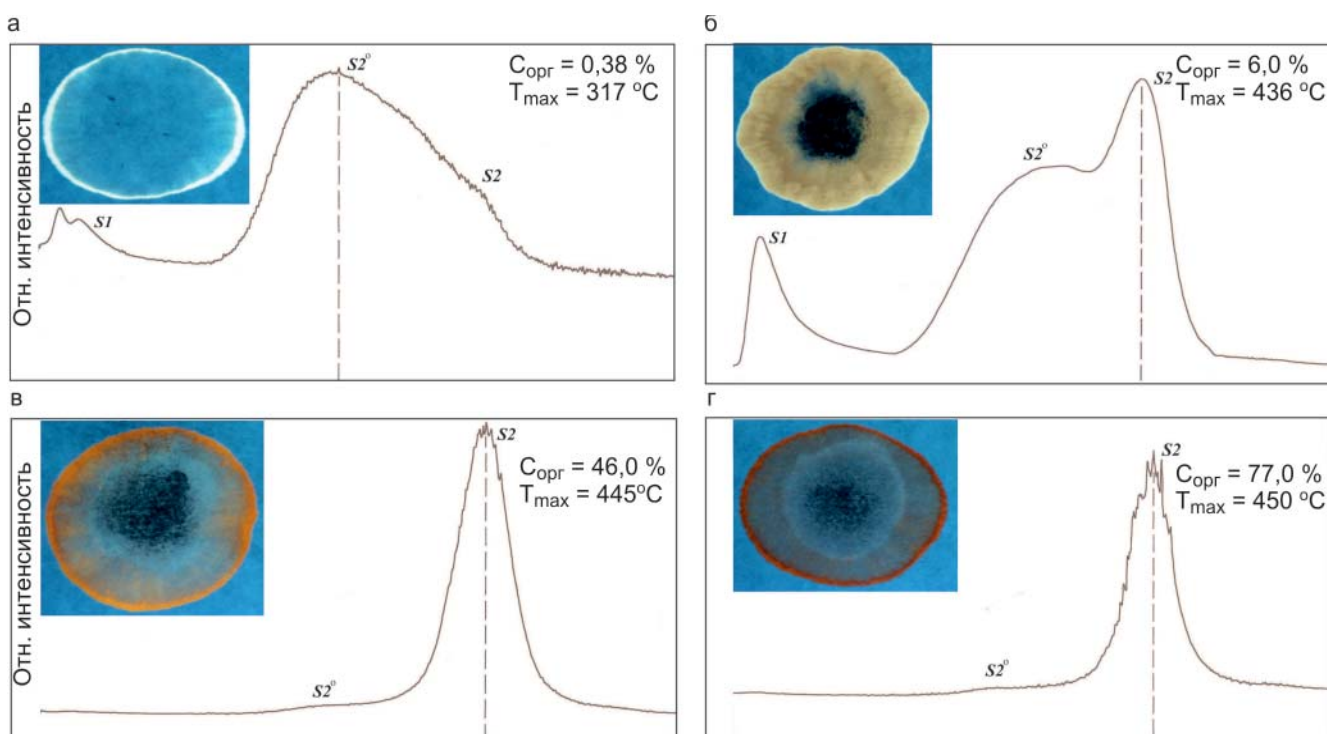


Рис. 9. Пирограммы и результаты капельной хроматографии образцов тутлеймской свиты с различным содержанием в их составе битумов (Ем-Еговская площадь): а, б – кремнистые известняки; в – глинистый силицит сильно битуминозный; г – битум с мелкодисперсными включениями глинисто-кремнистого материала

Если наше предположение относительно гидротермальных флюидов справедливо, то необходимо оценить значения палеотемператур, существовавших в геологическом прошлом в верхнеюрских отложениях. Это можно осуществить на основе результатов термобарогеохимических исследований. Однако для осадочных пород Западно-Сибирского НГБ таких исследований было крайне мало. Единичные определения палеотемператур по просьбе автора были выполнены Ю. В. Щепеткинским на мелких кристаллах желтого гидротермального кварца, которые были извлечены автором из каверн пласта KC_1 , лежащего в основании БС и вскрытого скв. 554Э на Салымском месторождении [14]. Цвет кристаллов обусловлен присутствием многочисленных микровключений нефтяной эмульсии, распавшейся при охлаждении и снижении давления на три фазы. Первая фаза представлена газом в виде пузырька, плавающего в светло-желтой нефти, являющейся второй (жидкой) фазой, а третья фаза, темно-коричневая, почти черная вязкая, – это, вероятно, битум и/или преимущественно ГС (рис. 10). При нагревании кристаллов кварца с этими микровключениями (диаметр в среднем около 0,1 мм) наблюдалась гомогенизация газа и жидкости, представленной, как уже говорилось, светло-желтой конденсатоподобной нефтью, в одну фазу в интервале температур 225–265 °С [14]. Гомогенизации или растворения в жидкой фазе темно-коричневой вязкой фазы не наблюдалось даже при нагреве до температуры 330 °С! При еще большем нагреве включения просто взрывались, что свидетельствует об очень вы-

соком давлении, возникавшем вследствие нагрева внутри этих микрокапель эмульсии.

Исходя из приведенных данных, можно заключить, что палеотемпературы, имевшие место в БС в разрезе рассматриваемой скважины, в геологическом прошлом были не ниже 225–265 °С. Максимальное их значение вполне могло превышать 330 °С, так как даже при этой достаточно высокой

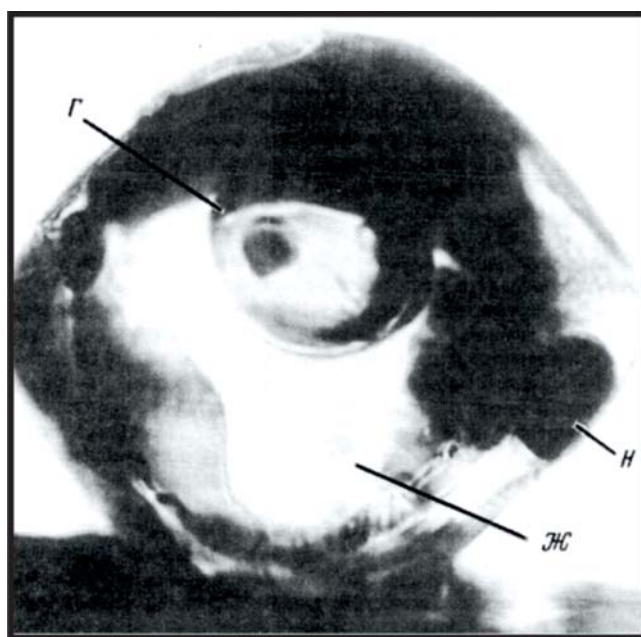


Рис. 10. Углеводородное газопо-жидкое включение в кристалле желтого кварца, пласт KC_1 , скв. 554Э, Салымское месторождение: Г – газ; Ж – желтая нефть; Н – темная нефть или битум, богатые гетеросоединениями; размер газопо-жидкого включения около 90 мкм (по [14])

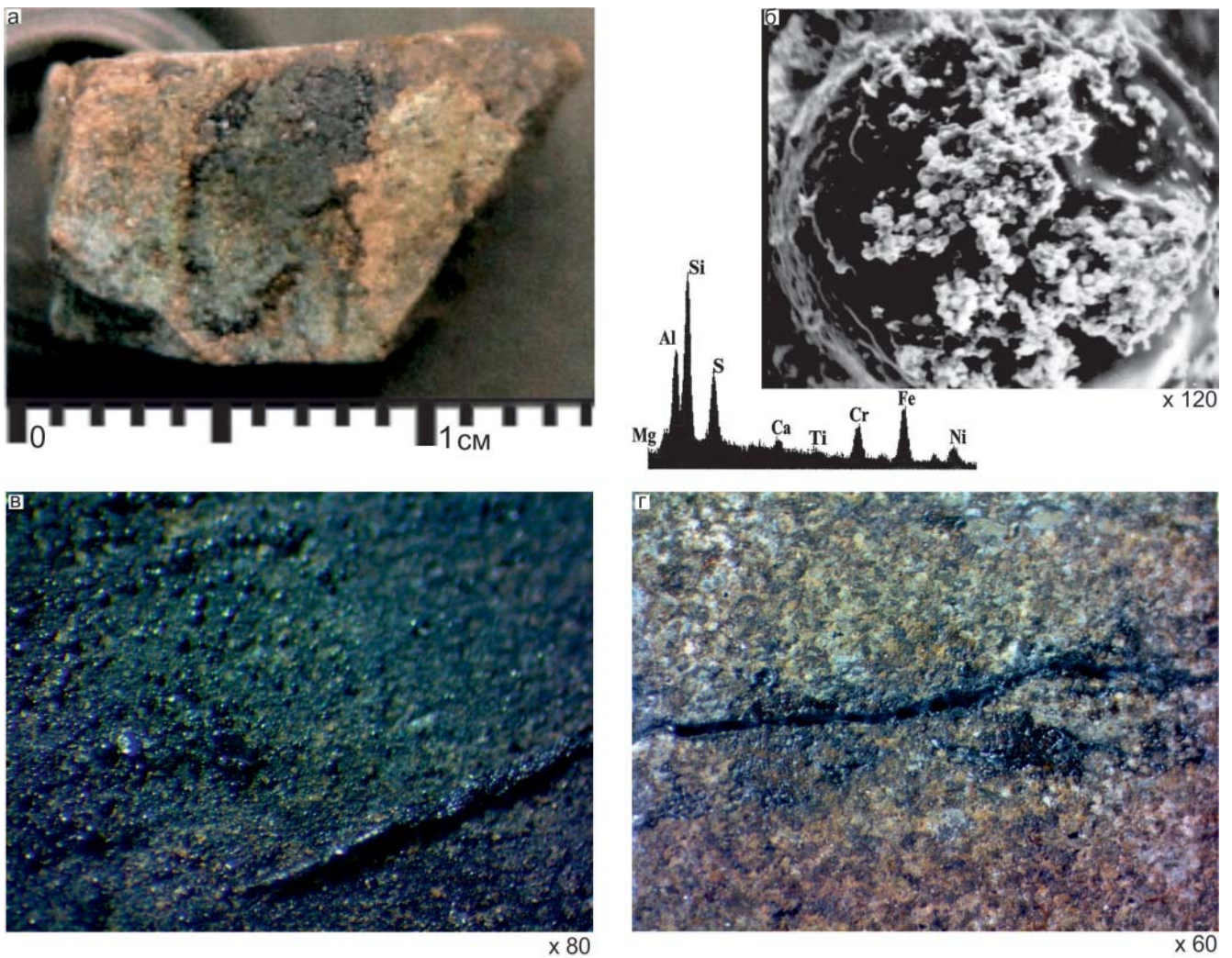


Рис. 11. Поверхность образцов после воздействия на них гидротермальных флюидов различного состава и температуры (давление гидротермального флюида во всех опытах 70 МПа): а – углисто-алевритистый аргиллит (Т 275 °С, мольная доля углекислоты (χ_{CO_2}) 0,04, длительность опыта 19 сут); б – снимок РЭМ с каплей битума и элементный спектр с площади снимка, $\times 120$; в – углисто-алевритистый аргиллит (Т 290 °С, χ_{CO_2} 0,079, длительность опыта 10 сут); г – углистый алевролит (Т 290 °С, χ_{CO_2} 0,12, длительность опыта 10 сут)

температуре полной гомогенизации включений эмульсии в кристаллах кварца все-таки не происходило.

На основе значений палеотемператур, полученных по результатам определения температур гомогенизации газовой-жидких включений, был выбран температурный интервал, в пределах которого осуществлялись эксперименты по моделированию гидротермального воздействия на породы юрского возраста, богатые ОВ. Эти образцы были отобраны из участков с нормальным геотермическим градиентом 3,3 °С/100 м, т. е., скорее всего, не подвергавшиеся гидротермальному воздействию в геологическом прошлом.

Рассмотрим результаты нескольких экспериментов по воздействию на ОВ в опытных образцах гидротермальных флюидов, имевших различную температуру и мольную долю углекислоты в своем составе.

Углисто-алевритовый аргиллит темно-серого цвета после воздействия на него гидротермаль-

ным флюидом с температурой 275 °С в течение 19 сут приобрел буровато-серый оттенок, а на его поверхности появились пленки и капли битума (рис. 11, а, б). По данным элементного анализа поверхности капли битума в его составе присутствует сера, т. е. это тиобитум. Кроме того, на рассматриваемой капле битума отмечаются мелкокристаллические агрегаты гидротермального слабо магнетизированного железистого хлорита (см. рис. 11, б).

На поверхности образца углисто-алевритистого аргиллита, который в течение 10 сут подвергался воздействию гидротермального флюида, имевшего температуру 290 °С, отмечается появление многочисленных мелких капелек битума, а также протяженных тонких его образований, возникших, скорее всего, по слоям, содержащим повышенную концентрацию ОВ или непосредственно по растительному детриту (см. рис. 11, в). Кроме того, отмечаются вязко-пластичные битумы, также образовавшиеся в результате воздействия гидротермальных флюидов на растительные остатки, на месте кото-

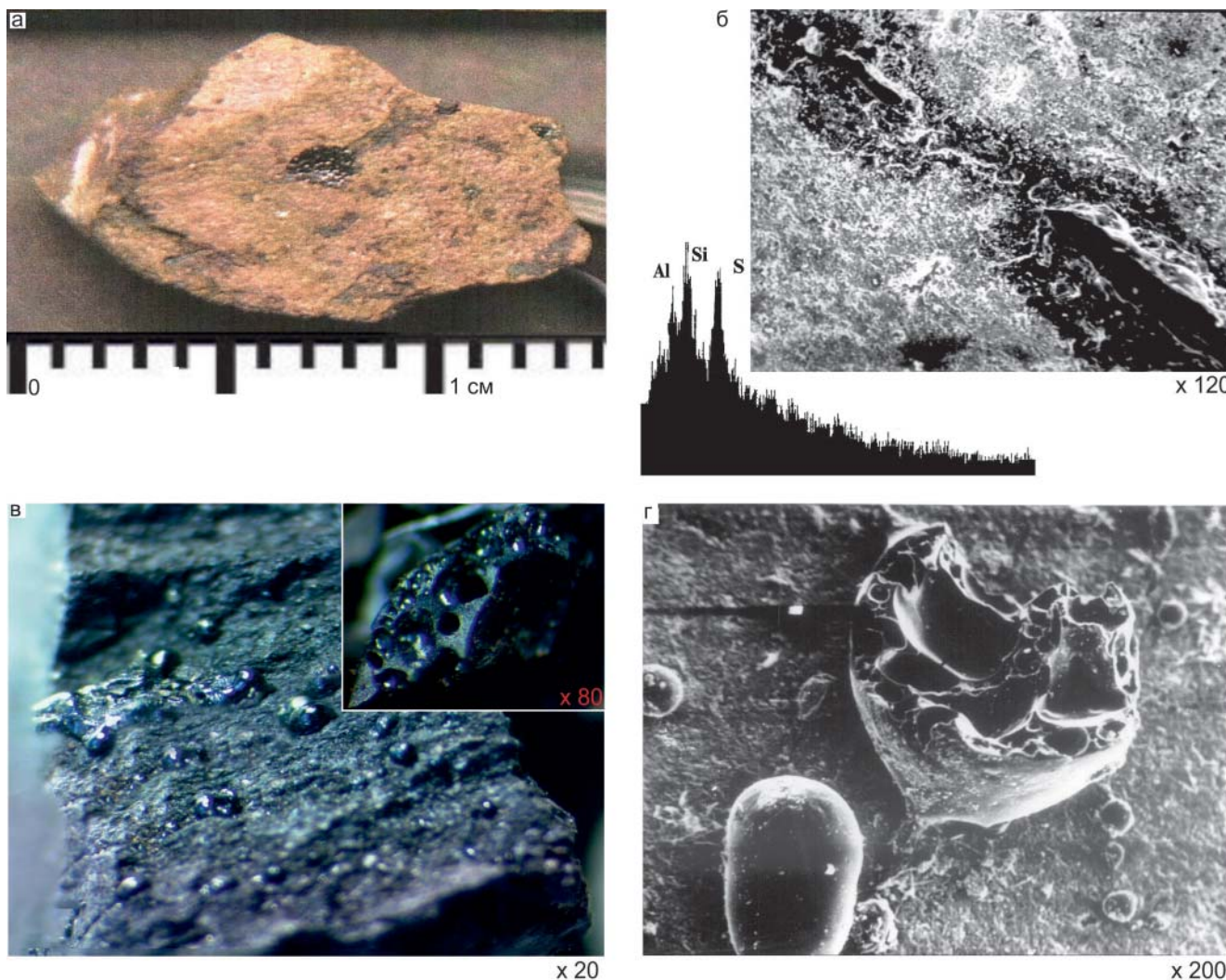


Рис. 12. Образцы и генерированные ими битумы после воздействия на них гидротермальных флюидов различного состава и температуры (давление гидротермального флюида во всех опытах равно 70 МПа): а – углисто-алевритистый аргиллит (Т 360 °С, мольная доля углекислоты (χ_{CO_2}) 0,006, длительность опыта 6 сут); б – снимок РЭМ и элементный спектр, полученный с пленки битума, находящейся на поверхности того же образца; в – углистый аргиллит (Т 390 °С, χ_{CO_2} 0, длительность опыта 10 сут), на врезке – обломок капли битума, извлеченного из осадка; г – снимок РЭМ поверхности того же образца с каплями битумов, содержащими в себе пустоты от выделившихся газообразных продуктов акваприлиза (по [8])

рых сохранились протяженные трещины-каверны (см. рис. 11, г).

Следующий образец углисто-алевритистого аргиллита, подвергшийся гидротермальному воздействию при температуре 360 °С, также изменил первоначальный темно-серый цвет на буровато-серый, а на его поверхности появились пленки вязкопластичных битумов с высоким содержанием серы (рис. 12, а, б). Как и в рассмотренном примере, на месте растительных остатков вследствие их превращения в битум образовались протяженные микропустоты (см. рис. 12, б).

На поверхности образца углистого аргиллита после воздействия на него гидротермального флюида температурой 390 °С в течение 10 суток, образовалось большое количество мелких капелек твердohрупкого битума (см. рис. 12, в, г). Обращает на себя внимание, что в этих капельках, судя по их сколам, присутствует большое количество овальных пустот,

которые, вероятнее всего, остались от газообразных продуктов, выделявшихся одновременно с их образованием. Именно благодаря газообразным включениям в битумах их объем значительно выше, чем в исходном ОБ.

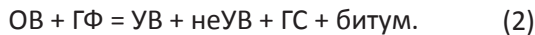
В заключение отметим, что анализ газовой фазы, присутствующей в автоклаве после гидротермальных экспериментов, по данным хроматографического анализа состоит (помимо воды) из H_2 , CO , CO_2 , N_2 , CH_4 и его гомологов, причем содержание последних сопоставимо с концентрацией метана [8].

Обсуждение полученных результатов

Исходя из того, что температурный интервал, в пределах которого по данным гидротермального моделирования в породах, богатых ОБ, наблюдается образование битумов, совпадает с таковым, в котором отмечается выделение УВ, входящих

в состав пика S_1 , можно предположить, что появление этого пика отражает или сопровождает процесс превращения исходного ОВ в битумы. Подчеркнем, что здесь речь идет о породах, не подвергавшихся воздействию высоких температур, вызванных, например, проникновением в них гидротермальных флюидов.

Используя полученные результаты гидротермального моделирования, запишем в упрощенном виде реакцию между ГФ и слабо катагенетически преобразованным ОВ в составе материнских пород:



Действительно, уже отмечалось, что процесс превращения ОВ в битумы сопровождается выделением большого количества УВ (пик S_1) и летучих неУВ, благодаря чему в образующихся битумах отмечается присутствие множества полостей, оставшихся от газовых пузырьков (см. рис. 12, в, г). В составе этих газов, как уже отмечалось, наряду с летучими неУВ присутствуют метан и его гомологи [8].

В принципе, если ГС считать компонентами битума, то в уравнении (2) их можно не выделять отдельно, а включить в его состав.

Таким образом, при пиролизе низкотемпературная (300 °С) термодеструкция исходного слабо катагенетически преобразованного ОВ сопровождается появлением на пирограмме пика S_1 и одновременной генерацией из него битума, а второй (высокотемпературный) пик S_2 свидетельствует о термкрекинге собственно самого только что образовавшегося битума.

Следует обратить внимание на то, что в описанном случае рассмотрен «генезис» пика S_1 на пирограммах именно слабо преобразованных нефтематеринских пород. Если же мы имеем дело с пирограммой образца материнской породы, например отобранного из БС, подвергавшегося высокотемпературному воздействию гидротермальных флюидов, то в нем присутствует уже битум, а вовсе не исходное ОВ. Следовательно, пик S_1 , фиксирующийся на его пирограмме, – это УВ, входящие в состав битума в форме твердых растворов, т. е. имеющие аутигенное происхождение [6, 7].

Наконец, если проводятся пиролитические исследования пород-коллекторов, входящих в состав БС, например, представленных микропористыми радиоляритами или трещинно-кавернозными карбонатами, то в состав пика S_1 входят свободные УВ аллотигенного происхождения, находящиеся в поровом пространстве указанных пород. Эти УВ эмигрировали из нефтематеринских (более богатых ОВ) разновидностей пород, входящих в состав БС, в которых они образовались. Для рассматриваемых образцов характерна высокая амплитуда пика S_1 и небольшая – пика S_2 ; кроме того, в таких образцах часто отмечается присутствие высокоамплитудного пика S_2^0 (см. рис. 9, а, б).

Таким образом, появление на пирограмме пика S_1 может быть обусловлено как минимум тремя основными причинами:

- 1) процессом превращения исходного (слабо метаморфизованного) ОВ в битумы;
- 2) испарением из битума УВ, находящихся в нем в виде твердого раствора (аутигенные УВ);
- 3) выделением «свободных» УВ (аллотигенного происхождения) из пустот пород-коллекторов, которые, например в составе БС, представлены кремнистыми, карбонатными и переходными между ними разновидностями.

Полученные данные позволяют сделать предположение, что пик S_2^0 на пирограммах свидетельствует о присутствии в анализируемых образцах преимущественно аллотонных нафтидов с высоким содержанием в их составе сравнительно тяжелых УВ (вплоть до масляной фракции), а также низкомолекулярных смол.

На пирограммах нефтематеринских пород, находящихся на любой стадии катагенеза, пик S_2 соответствует процессу термодеструкции битумов и входящих в их состав ГС, так как при нагреве образцов до температур выше 235 °С они проходят стадию битумообразования. Иными словами, входящее в их состав исходное ОВ обязательно превращается в битум различной консистенции (см. рис. 11, 12).

В результате гидротермального воздействия на нефтематеринские породы, генерируемые ими самые легкие и подвижные УВ и летучие неУВ, а также часть более тяжелых УВ и ГС вместе или в составе ГФ эмигрируют из материнских пород, в которых преимущественно остаются лишь наиболее тяжелые УВ, ГС и битум. Последний, как мы уже отмечали, может иметь различную консистенцию – от вязкопластичной до твердо-хрупкой. Это, скорее всего, зависит от мацерального состава исходного ОВ и термодинамических условий (главным образом от температуры ГФ), причем оставшиеся в материнской породе УВ и ГС могут входить в состав битума в форме твердого раствора.

Здесь следует отметить, что по данным термодинамических расчетов при температуре около 400 °С гидротермальный флюид и УВ в его составе представляют собой гомогенную фазу. Поэтому при их совместной миграции отсутствуют проблемы, связанные с различиями в относительных фазовых проницаемостях УВ и воды, что способствует их беспрепятственной совместной миграции.

Если температура ГФ и длительность его воздействия на исходное ОВ, а затем и на образовавшийся из этого ОВ битум велики, то основная часть мобильной составляющей ОВ превращается в УВ, неУВ и ГС, а битум представляет собой сильно термически преобразованный, в значительной степени графитизированный остаток типа керита, асфальтита или даже антраколита, в котором отсутствуют твердые растворы УВ и ГС. Иными словами, он становится абсолютно не растворимым в органических растворителях.



Термически преобразованные битумы, например, входят в состав БС и ее аналогов в пределах высокотемпературных зон на Салымском, Маслиховском, Ем-Еговской, Каменной, Пальяновской и других месторождениях и площадях. На пирограммах битумов, отобранных из этих высокотемпературных зон, пик S_1 имеет очень маленькую амплитуду. Пик S_2 характеризуется более высокой амплитудой, но все равно значение HI (см. формулу (1)) крайне мало – всего 80–100 мг УВ/г $C_{орг}$ и даже еще меньше. Иными словами, эти сильно термически преобразованные битумы обладают крайне низким остаточным нефтегенерационным потенциалом, а чтобы они смогли реализовать его до конца, потребуются еще более высокие температуры, чем те, которым они подвергались ранее.

Специфическая клеточная микротекстура, сохранившаяся в составе псевдокварцитов от исходных растительных обломков (см. рис. 5, е, б, г, е), могла иметь различное происхождение.

Во-первых, она могла сформироваться еще в седиментогенезе или раннем диагенезе в результате окисления (фюзенизации) или переработки основной части исходного растительного материала микроорганизмами, вследствие чего остался лишь наиболее устойчивый к окислению и/или микробиологическому разложению клеточный каркас растительных остатков.

Во-вторых, она могла возникнуть вследствие воздействия ГФ на эти растительные обломки. В результате наиболее мобильная их часть превратилась в УВ, летучие неУВ и ГС, которые были вынесены в составе ГФ в породы-коллекторы, а оставшаяся наиболее устойчивая инертная часть, представленная стенками клеток, была интенсивно метаморфизована, возможно, даже частично графитизирована и осталась на месте, сохранив свою специфическую микроклеточную текстуру (см. рис. 5, е, б, г, е).

Рассмотренное газово-жидкое включение в кварце (см. рис. 10) несет информацию не только о палеотемпературе, при которой оно было захвачено в процессе роста этого кристалла. Рассчитав площади, занимаемые тремя присутствующими в нем фазами, можно, используя принцип Кавальери, также оценить объемное содержание этих фаз во включении, а значит, и состав нафтидов в гидротермальном флюиде, мигрирующих вместе с ним. Расчеты показали, что газовая фаза составляет 15 % от объема всего включения, желтая легкая нефть – 47 %, темная фаза, предположительно представленная битумом и/или преимущественно ГС, – около 38 %. Это приблизительный состав «первичной» нефти, генерируемой ОВ, входящим в состав БС Салымского месторождения, в результате термического воздействия на него высокоэнтальпийных ГФ. Очевидно, что при снижении температуры первоначально гомогенного нафтидо-водного флюида первыми из него выделяются наиболее трудно растворимые высокомолекулярные темные фракции, представленные,

как уже говорилось, битумом и/или ГС. Вероятно, именно эти фракции и заполняют поры в породах-коллекторах рассмотренных пластов Ю₁⁰ Грибного, Ахтамарского месторождений и П₁ Приуральской НГО (см. рис. 5, в–е, 6, а–в, д–е, 7, в, г).

Выводы

1. Гидротермальные флюиды вызывают образование битумов из исходного слабо катагенетически преобразованного ОВ.

2. По крайней мере в пределах высокотемпературных зон породы, входящие в состав баженовской свиты, являются битуминозными.

3. В процессе пиролиза слабо катагенетически измененных пород ОВ, входящее в их состав, превращается в битум. Этот процесс сопровождается выделением УВ, формирующих пик S_1 .

4. Пик S_2 соответствует процессу термодеструкции образовавшегося битума и входящих в его состав ГС.

5. В породах, претерпевших высокотемпературное, например гидротермальное, воздействие, ОВ присутствует в форме битума, а на их пирограммах пик S_1 соответствует выходу из него (битума) аутигенных УВ, находящихся в его составе в форме твердого раствора.

6. Пик S_1 в породах-коллекторах соответствует выходу свободных (аллотигенных) УВ, находящихся в их поровом пространстве.

7. Пик S_2^0 соответствует выходу высокомолекулярных аллотигенных УВ, включая масляную фракцию и «легкие» смолы, т. е. обычно присутствующих в породах-коллекторах.

8. Температуры гидротермальных растворов, проникавших в верхнеюрские отложения в районе Салымского месторождения, составляли не менее 225–265 °С, а максимальные их значения вполне могли превышать 330 °С.

9. Битумы, присутствующие в поровом пространстве верхнеюрских пород-коллекторов, вероятно, отложились из первоначально гомогенного нафтидо-водного флюида в результате его остывания. Они относятся к категории тиобитумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геологический** словарь. В 2 т. Т. 1 / ред. К. Н. Паффенгольц. – М.: Недра, 1973. – 486 с.
2. **Зубков М. Ю.** Коллекторы в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири и способы их прогноза // Геология нефти и газа. – 2014. – № 5. – С. 58–72.
3. **Зубков М. Ю.** Оценка региональных и локальных перспектив нефтеносности баженовской и абалакской свит Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 3. – С. 51–67.
4. **Зубков М. Ю.** Соотношение нефтегенерационных и емкостных свойств керогена баженовской свиты (Западная Сибирь) // Петрофизика сложных

коллекторов: проблемы и перспективы 2015. – М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2015. – С. 292–306.

5. **Зубков М. Ю.** Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2017. – № 1. – С. 60–76.

6. **Зубков М. Ю., Потапов А. Г.** Спектры ЯМР пород бажено-абалакского комплекса Западной Сибири // Каротажник. – 2014. – Вып. 8 (242). – С. 3–32.

7. **Зубков М. Ю., Потапов А. Г.** «Твердые растворы» углеводородов в составе битумов баженовской свиты и экстрактов, установленные по данным ядерно-магнитного резонанса // Каротажник. – 2015. – Вып. 9 (255). – С. 3–13.

8. **Зубков М. Ю., Шведенков Г. Ю.** Экспериментальное моделирование процесса формирования вторичных коллекторов под действием гидротермальных флюидов различного состава // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО: матер. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. I. – Ханты-Мансийск, 2002. – С. 323–332.

9. **К вопросу** о типе органического вещества пород баженовской свиты / В. А. Волков, Е. В. Олейник, Е. Е. Оксенюк, Л. А. Солопахина // Вестник недропользователя. – 2016. – № 28. – С. 3–18.

10. **Лопатин Н. В., Емец Т. П.** Пиролиз в нефтегазовой геохимии. – М.: Наука, 1987. – 144 с.

11. **Методические** рекомендации по применению пиролизного метода в органической геохимии / сост. В. Н. Меленевский; науч. ред. А. Э. Конторович. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1985. – 42 с.

12. **Пиролиз** как метод изучения нефтегазогенерационного потенциала материнских пород / А. Э. Конторович, В. Н. Меленевский, А. С. Фомичев, Г. Ю. Шведенков // Геология нефти и газа. – 1986. – № 12. – С. 36–41.

13. **Тиссо Б., Вельте Д.** Образование и распространение нефти. – М.: Мир, 1981. – 502 с.

14. **Щепеткин Ю. В., Рыльков А. В.** Реконструкция энергетических преобразований природной геохимической системы порода-ОВ-вода-нефть (газ) на основе детальных исследований скоплений углеводородов // Энергия и механизм первичной миграции углеводородов / ред. С. П. Максимов, Н. А. Еременко, Н. М. Сардонников. – М.: Наука, 1988. – С. 66–72.

REFERENCES

1. *Geologicheskii slovar* [Geological Dictionary]. Moscow, Neftgaz Publ., vol. 1, 1973. 486 p. (In Russ.).

2. Zubkov M.Iu. *Kollektory v bazhenov-abalakskom komplekse Zapadnoy Sibiri i sposoby ikh prognoza* [Reservoirs in the Bazhenov-Abalaksy complex of West Siberia and methods for their prediction]. *Geologiya nefi i gaza – Oil and gas Geology*, 2014, no. 5, pp. 58–72. (In Russ.).

3. Zubkov M.Yu. [Assessment of regional and local prospects for the oil-bearing capacity of the Bazhenov and Abalak formations of West Siberia]. *Geologiya i mineralno-syr'evye resursy Sibiri – Geology and*

mineral resources of Siberia, 2016, no. 3, pp. 51–67. (In Russ.).

4. Zubkov M.Iu. [Ratio of oil generation and permeability properties of the Bazhenov Formation kerogen (West Siberia)]. *Petrofizika slozhnykh kollektorov: problemy i perspektivy 2015* [Petrophysics of complex reservoirs: problems and prospects for 2015]. Moscow, EAGE Geomodel Publ., 2015, pp. 292–306. (In Russ.).

5. Zubkov M.Iu. [Tectonohydrothermal processes in Jurassic sediments of West Siberia]. *Geologiya nefi i gaza – Oil and gas Geology*, 2017, no. 1, pp. 60–76. (In Russ.).

6. Zubkov M.Iu., Potapov A.G. [NMR spectra of rocks of the Bazhenov-Abalaksy complex of West Siberia]. *Karotazhnik*, NTV AIS Publ., 2014, issue 8 (242), pp. 3–32. (In Russ.).

7. Zubkov M.Iu., Potapov A.G. [“Solid solutions” of hydrocarbons in the composition of the bitumen of the Bazhenov formation and extracts, established according to the data of nuclear magnetic resonance]. *Karotazhnik*, NTV AIS Publ., 2015, issue 9 (255), pp. 3–13. (In Russ.).

8. Zubkov M.Iu., Shvedenkov G.Iu. [Experimental modeling of the formation of secondary reservoirs under the action of hydrothermal fluids of different composition]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO (Pyataya nauchno-prakticheskaya konferentsiya)* [Collection “Ways of Realizing the Oil and Gas Potential of the Khanty-Mansi Autonomous Area” (Fifth Scientific Practical Conference)]. Khanty-Mansiysk, 2002, vol. 1, pp. 323–332. (In Russ.).

9. Volkov V.A., Oleinik E.V., Oksenioid E.E., Solopakhina L.A. [To the question of the type of organic matter in rocks of the Bazhenov formation]. *Vestnik nedropol'zovatelya*, 2016, no. 28, pp. 3–18. (In Russ.).

10. Lopatin N.V., Emets T.P. *Piroлиз v neftegazovoy geokhimii* [Pyrolysis in oil and gas geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 144 p. (In Russ.).

11. Melenevskii V.N., Kontorovich A.E., ed. *Metodicheskiye rekomendatsii po primeneniyu piroliticheskogo metoda v organicheskoy geokhimii* [Guidelines for the use of pyrolytic method in organic geochemistry]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1985. 42 p. (In Russ.).

12. Kontorovich A.E., Melenevskii V.N., Fomichев A.S., Shvedenkov G.Yu. [Pyrolysis as a method for studying the oil and gas generation potential of source rocks]. *Geologiya nefi i gaza – Oil and gas geology*, 1986, no. 12, pp. 36–41. (In Russ.).

13. Tissot B., Welte D. *Petroleum formation and occurrence*, Berlin, Springer-Verlag, 1984. 414 p.

14. Shchepetkin Yu.V., Rylkov A.V. [Reconstruction of energy transformations of the natural geochemical rock-OM-water-oil (gas) system based on detailed studies of hydrocarbon accumulations]. *Energiya i mekhanizm pervichnoy migratsii uglevodородов* [Energy and mechanism of primary migration of hydrocarbons]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 66–72. (In Russ.).