

Граптолитовые сланцы нижнего силура Тунгусской синеклизы и их нефтегазоматеринские свойства (Восточная Сибирь)

Наиболее обогащенными органическим веществом в разрезе силурийских отложений являются углеродистые мергели (граптолитовые сланцы) основания лландоверийского отдела (S_1ln^{1-2}), выступающие одним из значительных нефтегазоматеринских горизонтов в палеозойском разрезе северо-запада Сибирской платформы. Граптолитовые фации развиты вдоль всего западного обрамления Тунгусской синеклизы и фрагментарно на восточном ее борту. Охарактеризованы геохимические параметры органического вещества граптолитовых сланцев – пиролиза, керогена и синбитумоидов в рамках градаций катагенеза MK_1 – AK_3 . Региональный катагенез охватывает подстадию мезокатагенеза MK_1 – MK_{4-5} и возрастает по направлению с юга и юго-востока на северо-запад Тунгусской синеклизы. Более высокие градации вызваны воздействием базитовых интрузий. Доказано, что особенность зоогенного органического вещества граптолитовых сланцев – сравнительно пониженное содержание в керогене водорода и повышенное углерода и азота. Зоогенный тип органического вещества с граптолитовой основой характеризуется более быстрым созреванием по сравнению с другими типами сапропелевого органического вещества, потому что максимум генерации хлороформного битумоида приходится на начало градации MK_1 . Динамика флюидогенерации в катагенезе носит сокращенный характер. Главная фаза нефтеобразования охватывает градации PK_{2-3} – MK_1 (палеоглубины 1,4–2,4 км).

Ключевые слова: силурийская система, граптолитовые сланцы, катагенез, углепетрография, пиролиз, кероген, битумоиды, Тунгусская синеклиза, Сибирская платформа.

A. A. RYASNOY (VSEGEI)

Lower Silurian graptolitic shales of the Tunguska Syncline and its oil and gas source properties (East Siberia)

In the Silurian succession, the Lower Llandovery (S_1ln^{1-2}) carbonaceous marls (graptolitic shales), which are one of the major oil and gas source horizons in the Paleozoic of the northwest Siberian platform, are the most enriched in organic matter. Graptolite facies are widespread along the entire western framing of the Tunguska Syncline and fragmentarily on its eastern slope. Geochemical parameters of the graptolitic shales organic matter have been described: parameters of pyrolysis, kerogen, and syntonoids within the catagenesis gradations from MK_1 to AK_3 . Regional catagenesis covers the mesocatagenesis substage from MK_1 to MK_{4-5} and increases from the south and southeast to the northwest of the Tunguska Syncline. Higher gradations are caused by basic intrusions. It has been proven that the zoogenic organic matter of the graptolitic shales is featured by relatively low hydrogen content and increased carbon and nitrogen contents in kerogen. The zoogenic type of organic matter with graptolite base material is characterized by a faster maturation as compared to other types of sapropel organic matter, because the maximum generation of chloroform bitumen falls on the MK_1 gradation. The dynamics of fluid generation during the catagenesis is reduced. The main phase of oil formation covers the PK_{2-3} – MK_1 gradations (paleodepths are 1,4 to 2,4 km).

Keywords: Silurian system, graptolitic shales, catagenesis, coal petrography, pyrolysis, kerogen, bitumoids, Tunguska Syncline, Siberian platform.

Для цитирования: Рясной А. А. Граптолитовые сланцы нижнего силура Тунгусской синеклизы и их нефтегазоматеринские свойства (Восточная Сибирь) // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 88. – С. 99–116. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_88_99-116

Введение. Исследуемая территория приурочена к Тунгусской синеклизе – крупнейшей надпорядковой структуре Сибирской платформы, в строении которой установлен наиболее полный стратиграфический диапазон отложений – от рифейской эонотемы до триасовой системы включительно. Источниками углеводородов в разрезе синеклизы выступали нефтегазоматеринские толщи трех основных стратиграфиче-

ских уровней: альгосапропелиты верхнего рифея (нижнетунгусская свита), нижнего-среднего кембрия (куонамская и шумнинская свиты) и альгозоосапропелиты нижнего силура (чамбинская и мойероканская свиты) [8].

Особенность нижнесилурийских отложений – присутствие в основании разреза, отнесенного к лландоверийскому отделу (S_1ln^{1-2}), мойероканскому горизонту, пачки мергелей углеродистых

(граптолитовых сланцев), которые сменяются известняками органогенно-обломочными с богатым фаунистическим комплексом. Граптолитовые сланцы по обилию содержащегося в них органического вещества (до 16 % $C_{орг}$ на породу) занимают особое положение в разрезе палеозоя северо-запада Сибирской платформы. Распределение органического углерода по площади подчиняется

в них своеобразной закономерности: от Приенисейской зоны вглубь синеклизы содержание органического вещества (ОВ) в породах существенно уменьшается [4; 8] (рис. 1).

В пределах развития граптолитовых фаций средние концентрации $C_{орг}$ – 0,2–5 %. Наиболее высоких значений (3–5 %) средние концентрации органического углерода достигают на

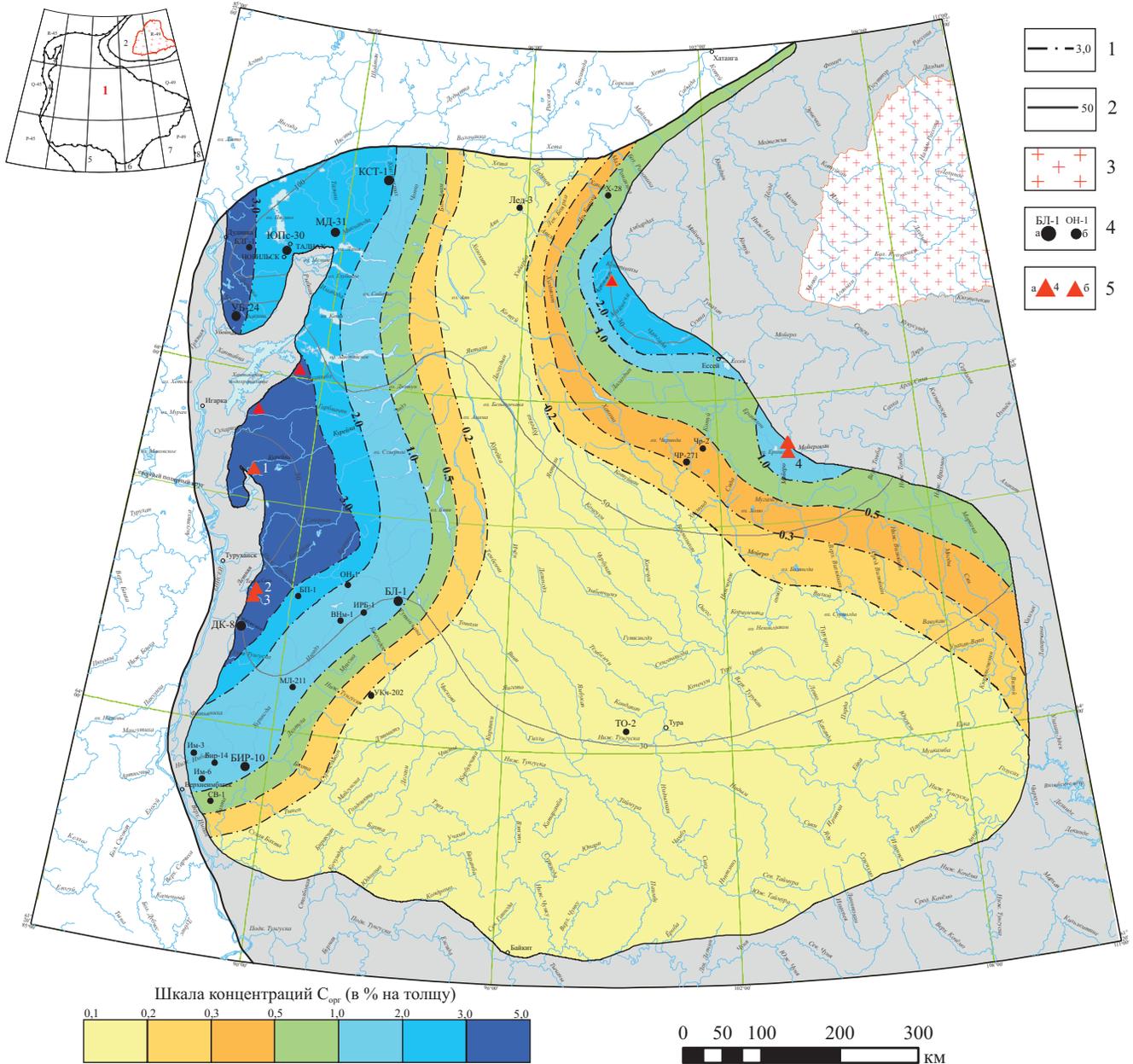


Рис. 1. Карта распределения органического углерода в граптолитовых сланцах. Масштаб 1 : 5 000 000 (по Т. К. Баженовой, с изм. и доп. автора)

1 – линии равных концентраций (изокарбы) $C_{орг}$ (в % на толщу); 2 – линии равных мощностей нефтегазоматеринского горизонта, м; 3 – выходы кристаллического фундамента; 4 – глубокие и колонковые скважины (а – исследуемые в статье; б – изучаемые при построении карты): КСТ-1 – Кыстыктахская 1, МД-31 – Микчангдинская 31, ЮПС-30 – Южно-Пясинская 30, УБ-24 – Убойная 24, ДК-8 – Дьявольская 8, БЛ-1 – Бильчанская 1, БИР-10 – Бираминская 10; 5 – обнажения (а – исследуемые в статье; б – используемые при построении карты): 1 – р. Курейка, 2 – р. Тенна-Сесь, 3 – р. Летняя, 4 – р. Мойеро.

Тектонические структуры на вклейке: 1 – Тунгусская синеклиза; 2 – Анабарская антекклиза; 3 – Хантайско-Рыбнинский мегавал; 4 – Курейско-Бакланихинский мегавал; 5 – Байкитская антекклиза; 6 – Катангская седловина; 7 – Непско-Ботубинская антекклиза; 8 – Нюйско-Джербинская впадина

Фокинско-Убойнинской площади (Норильский район), в Игарском и Туруханском районах. По направлению с запада на восток по мере увеличения карбонатности пород уменьшаются величины средних концентраций органического углерода до 1–2 %. Граница проходит чуть восточнее скважин Бильчанская 1 и Бираминская 10 (рис. 1).

По направлению к центральным частям Тунгусской синеклизы происходит замещение черных и темно-серых аргиллитов и мергелей с граптолитами зелеными мергелями и серыми комковатыми известняками и, соответственно, резкое падение концентраций $C_{\text{орг}}$ до 0,1–0,2 %.

На восточном борту Тунгусской синеклизы в скважинах Чириндинской площади, бассейне р. Мойеро и верховьях р. Оленёк вновь появляются граптолитовые фации, обогащенные ОВ до 2–7 %, но лишь в основании мойероканского горизонта (3–5 м мощностью), откуда в западном направлении концентрации $C_{\text{орг}}$ вновь понижаются до 0,1–0,2 %. Примерно на широте р. Подкаменная Тунгуска граптолитовые сланцы отсутствуют полностью. Мощность граптолитовых сланцев изменяется от 20–30 до 100 м. Увеличение мощности граптолитовой толщи происходит в северном направлении от Верхнеимбатского к Норильскому району вместе с возрастанием общей мощности силурийских отложений более чем в два раза – от 300 до 647 м. На р. Мойеро их мощность составляет ~500 м.

Работы, посвященные граптолитовым сланцам нижнего силура северо-запада Сибирской платформы в аспекте перспектив нефтегазоносности изучаемого региона, не публиковались 30 лет. Литолого-геохимические исследования силурийских отложений Тунгусской синеклизы были организованы Л. Г. Марковой (СНИИГГиМС) и выполнялись в период с 1968 по 1981 г. Органическая геохимия силурийских отложений была рассмотрена преимущественно на основе результатов экстракции и люминесцентно-битуминологических анализов, а также единичных углехимических анализов концентратов керогена. С наибольшей детальностью граптолитовые сланцы изучены в Норильском районе [4; 5].

Задача настоящего исследования – определение взаимосвязи геохимических параметров керогена, битумоидов и данных пиролитического метода с содержанием углерода в породах и катагенетической эволюцией ОВ граптолитовых сланцев и оценка их нефтегазоматеринских свойств.

Литологическая характеристика. Углеродистые породы залегают на размытой поверхности пород среднего или верхнего ордовика (чертовской, баксанский или долборский горизонты). В стратиграфическом отношении они относятся к мойероканскому горизонту; на западе синеклизы (Норильский, Игарский и Туруханский районы) – к чамбинской и на востоке (район среднего течения р. Мойеро) – мойероканской свитам.

На западе синеклизы, где в том числе расположен опорный разрез лландоверийского отдела (р. Горбиачин), исследуемые отложения подразделяются на две литологически отличные пачки: нижнюю глинистого и верхнюю карбонатно-глинистого составов, в стратиграфическом отношении отвечающих соответственно нижней и верхней подсвите чамбинской свиты (рис. 2).

Нижняя пачка (мощностью 10–35 м) представлена аргиллитами известковыми черными до сажистых в нижней части и серыми в верхней, тонкослоистыми и мергелями, обогащенными тонкодисперсным ОВ. Породы содержат многочисленные остатки граптолитов. В основании пачки залегает прослой известняка черного, битуминозного, тонкокристаллического мощностью до 1,5 м, выделяющегося в качестве электрокаротажного репера. **Верхняя пачка** (мощностью 30–100 м) сложена мергелями серыми, тонкослоистыми, с отпечатками и остатками граптолитов и слепками наутилоидей. Выше по разрезу остатков граптолитов становится все меньше, и постепенно они почти полностью исчезают. По всему разрезу присутствуют прослои серых глинистых пелитоморфных известняков. Общая мощность пород, содержащих многочисленные остатки граптолитов, достигает 92–100 м (северо-запад Тунгусской синеклизы, Норильский район). Содержание органического углерода колеблется в широких пределах, достигая концентраций горючесланцевых толщ и уменьшаясь снизу вверх по разрезу от 16,31 до 1,47 % в известковистых аргиллитах нижней и от 1 до 0,68 % в мергелях верхней пачек.

На восточном борту Тунгусской синеклизы в бассейне р. Мойеро и верховьях р. Оленёк в основании мойероканской свиты представлена только пачка базальных аргиллитов мощностью 4–5 м с концентрацией ОВ до 2–7 %. В остальной преобладающей по мощности части разреза доминируют серые известняки в разной степени глинистые, в которых содержание $C_{\text{орг}}$ резко падает до 0,21–0,01 %.

Материал и методы исследования. В основу статьи были положены результаты аналитических исследований содержания органического углерода – 46 образцов, геохимических параметров керогена и битумоидов – 20 образцов, пиролиза методом Rock-Eval – 17 образцов и материалы углепетрографического исследования – 10 шлифов. Образцы отобраны равномерно по разрезу наиболее обогащенной органическим углеродом пачки I из скважин и обнажений, указанных на рис. 1, породы в составе которой представлены (по классификации С. Г. Вишнякова) аргиллитами известковыми и мергелями углеродистыми с содержанием нерастворимого остатка (н. о.) от 30,1 до 88 %, а также из пачки II, сложенной мергелями и известняками глинистыми с содержанием н. о. от 17,6 до 26,6 %.

Значительная часть исходных значений концентраций $C_{\text{орг}}$, битумоидов и элементного

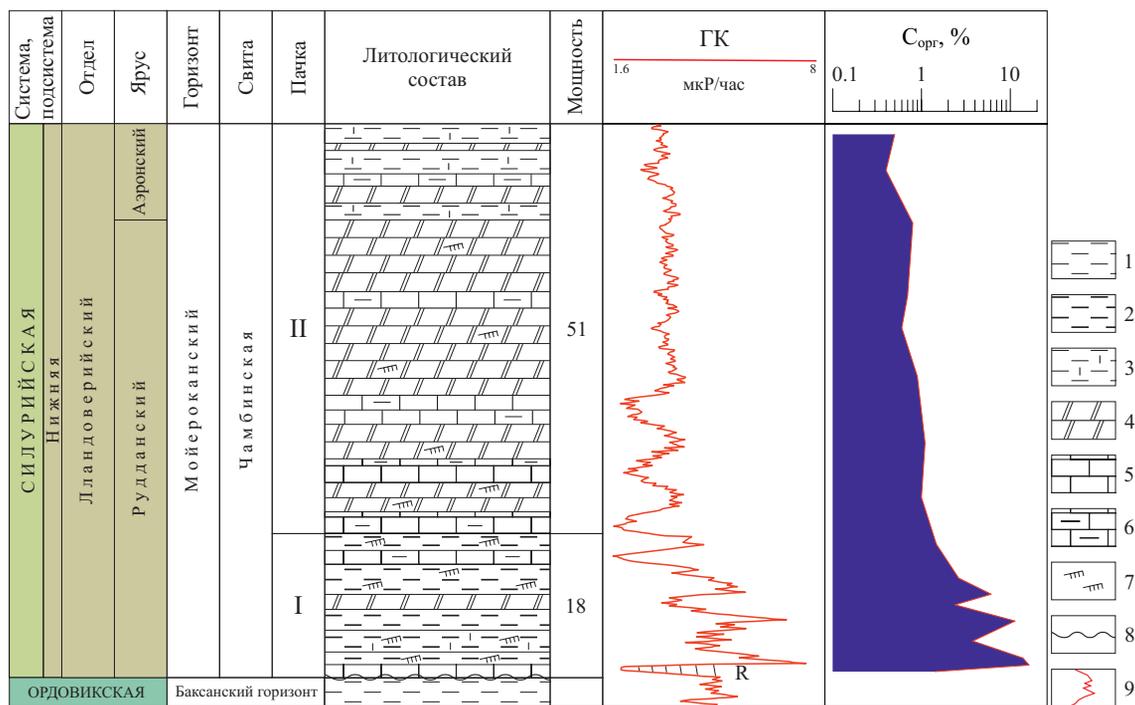


Рис. 2. Литологический разрез мойероканского горизонта западного обрамления Тунгусской синеклизы. Масштаб 1 : 1 000

1 – аргиллиты углеродистые; 2 – аргиллиты известковистые; 3 – мергели; 4 – известняки; 5 – известняки; 6 – известняки глинистые; 7 – граптолиты; 8 – поверхность стратиграфического несогласия; 9 – кривая гамма-каротажа (мкР/ч); R – каротажный репер

состава керогена по западному обрамлению синеклизы была предоставлена Т. К. Баженовой. Коллекция образцов мергелей углеродистых на территории восточной части синеклизы (среднее течение долины р. Мойеро) собрана в ходе полевого сезона 2018 г. в рамках работ по созданию комплекта Государственной геологической карты масштаба 1 : 1 000 000 листа Q-48 (Эконда). Впервые для осадочных пород территории листа выполнены пиролиз образцов и интерпретация пиролитических параметров с целью оценки нефтематеринского потенциала граптолитовых сланцев. Также получены данные по геохимическим параметрам битумоида и элементному составу керогена. В северной части синеклизы мергели углеродистые исследованы автором по скв. Кыгыктахская 1П. Им же выполнена интерпретация аналитического материала.

Для изучения вещественно-петрографического состава и степени катагенеза ОВ были выполнены измерения показателя отражения продукта разложения граптолитов – коллохитинита. Измерения произведены автором в углепетрографической лаборатории ВСЕГЕИ на приборе МСФ-30У (АО «ЛОМО») под руководством Г. М. Волковой. Обработка данных осуществлялась в программе *Spectra C Vsegei*, разработанной в АО «ЛОМО». Отражательная способность микрокомпонентов ОВ измерялась в иммерсионной жидкости на ровных площадках. Полученные значения были пересчитаны в показатели отражения витринита по формуле, выведенной в работе [12], что

позволило использовать оптические показатели ОВ граптолитов для изучения катагенетической эволюции органического вещества и заключающих его пород.

Оптические показатели микрокомпонентов ОВ, пересчитанные в показатель отражения витринита, были сопоставлены с пиролитическими параметрами и элементным составом керогена и выявлено сходство градаций катагенеза, что свидетельствует о применимости формулы для исследования изучаемого объекта.

Пиролитический анализ, битуминология, выделение и анализ концентратов керогена выполнены в Испытательной лаборатории АО «СНИИГГиМС».

Пиролиз проводился на полуавтоматическом SR-Анализаторе (Analyzer Humble Instruments & Services, Inc., U.S.A.), масса навески – 50 мг, фракция – 0,25 мм, время анализа – 35 минут. Методика основана на том, что исследуемая порода, содержащая ОВ, нагревается при программируемой скорости нагрева в токе инертного газа. При этом в интервале до 300 °С из породы возгоняются свободные или слабосвязанные УВ, образуя на выходе из прибора интегральный пик, обозначаемый S₁. Параметр S₁ – это выделившиеся из материнского керогена, но оставшиеся в породе жидкие УВ (битумоиды). В интервале 300–600 °С образуются углеводороды в основном за счет деструкции керогена, обозначаемые пиком S₂. Параметр S₂ – это не выделившиеся из керогена потенциальные жидкие и газообразные

углеводороды. Пик представляет собой суммарный нефтяной и газовый потенциал ОВ (породы). Сумма S_1 и S_2 характеризует нефтегазоматеринский потенциал породы, сохранившийся к данной градации катагенеза, на которой находится ОВ изучаемой породы (мг УВ/г породы). Фиксируемая температура T_{\max} (°С) отвечает максимуму скорости выделения УВ в пике S_2 , т. е. температура максимального выхода углеводородов в процессе крекинга керогена. Параметр T_{\max} характеризует степень зрелости ОВ, увеличиваясь с глубиной погружения отложений. Расчетные параметры: PI ($PI = S_1/(S_1+S_2)$) – индекс продуктивности, определяющий степень выработанности керогена; HI ($HI = S_2/C_{\text{орг}} \times 100\%$) – водородный индекс, характеризующий нереализованный углеводородный потенциал ОВ (мг УВ/г $C_{\text{орг}}$). Отметим, что материнские породы с различным фациально-генетическим типом ОВ отличаются поградационными значениями HI при реализации нефтегазоматеринского потенциала.

Определение хлороформного битумоида по образцам долины р. Мойеро было выполнено с помощью двух этапов экстракции. Первый (холодная экстракция) – из недробленных обломков породы (экстракция отстаиванием). Второй (горячая экстракция) – из материала порошков фракции 0,25 мм, полученных из проэкстрагированной недробленной породы (экстракция центрифугированием). Концентрат керогена выделялся из предварительно дебитуминизированной хлороформом породы (раздробленной до 0,25 мм) способом кислотного обогащения (HCl , HF). Выделенный концентрат экстрагировался хлороформом для дополнительной дебитуминизации и удаления элементарной серы. Определялись параметры влажности (W), зольности (A), серы пиритной ($S_{\text{пир}}$), углерода ($C_{\text{нов}}$), водорода ($H_{\text{нов}}$), азота ($N_{\text{нов}}$), серы ($S_{\text{нов}}$), кислорода ($O_{\text{нов}}$) (по разности) и выход летучих веществ ($V_{\text{нов}}$).

Результаты и их обсуждение. Углепетрографические исследования. Исходным материалом для формирования сингенетичного ОВ исследуемых образцов послужили граптолиты – морские зоопланктонные организмы с хитиновым наружным скелетом. Фоссилизированное ОВ граптолитовых сланцев в целом представлено черным и буровато-коричневым веществом, определяемым углепетрографически как коллохитинит и хитинит. В нем преобладают фрагменты, обладающие прямоугольно-вытянутой, штриховатой формой, диагностируемые главным образом в отраженном свете.

Отражательная способность микрокомпонентов ОВ определена из образцов нижней подсвиты чамбинской свиты ($S_1^1c^1$) из скважин Кыстыктахская 1П и Микчангдинская 31 (Норильский район) и нижней подсвиты мойероканской свиты ($S_1^1mr^1$) опорного разреза долины р. Мойеро.

В Норильском районе граптолитовые сланцы, охарактеризованные преимущественно по материалам бурения, достигают наибольшей

мощности равной 100 м. В скв. Микчангдинская 31 их вскрытая мощность составляет 40,4 м (при максимальном значении в близлежащих скважинах ~70 м). Согласно углепетрографическим исследованиям, преобладающее значение в образцах из скважины имеют фоссилизированные фрагменты граптолитов (рис. 3, а, б). Однако отмечаются также проблематичные цисты зеленых водорослей, которые характеризуются изометричной формой и меньшей величиной отражательной способности.

Значения отражательной способности микрокомпонентов ОВ граптолитов составляют (%): $R^{\circ\text{min}}$ – 1,07, $R^{\circ\text{max}}$ – 1,41, $R^{\circ n}$ – 1,19, в пересчете на витринит ($R^{\circ vt}$) – 1,1 %, что соответствует концу градации MK_3 (Ж) и отвечает региональному катагенезу для данной территории.

В скв. Кыстыктахская 1П в мергелях углеродистых фрагменты граптолитов представлены в значительном количестве (рис. 3, в, г), о чем свидетельствуют повышенные концентрации органического углерода в породах, достигающие максимальных значений, характерных для северо-западной окраины платформы и изменяющихся от 1,42 до 16,31 % (в среднем составляя 2–3 %) (см. рис. 1). Содержание $C_{\text{орг}}$ уменьшается снизу вверх по разрезу. Величина отражательной способности коллохитинита составляет (%): $R^{\circ\text{min}}$ – 1,76, $R^{\circ\text{max}}$ – 2,09, $R^{\circ n}$ – 2,03, в пересчете на витринит ($R^{\circ vt}$) – 1,69 %. Данные значения отвечают градации позднего мезокатагенеза MK_5 (ОС).

На противоположном (восточном) борту синеклизы стратиграфическим аналогом чамбинской свиты является мойероканская свита, которая охарактеризована в ряде обнажений среднего течения р. Мойеро, а именно в междуречье Мойерокан и Бугарикта, по правым бортам долин рек Мойерокан и Мойеро, в 4,5 км выше устья р. Бугарикта – обн. П-7894, П-7879 и П-7893 по [7].

Содержание $C_{\text{орг}}$ в образцах, отнесенных к мойероканской свите разреза р. Мойеро, изменяется от 0,06 до 7,27 %, стремительно уменьшаясь вверх по разрезу по мере увеличения карбонатности пород от доманикоидов и доманикитов основания нижней подсвиты ($S_1^1mr^1$) мощностью до 5 м, где концентрации органического углерода максимальны и равны 1,42–7,27 %, к сменяющим их известнякам органогенным и органогенно-обломочным с богатым фаунистическим комплексом. На р. Мойеро к нефтегазоматеринским толщам можно отнести не только граптолитовые сланцы мощностью до 5 м, но и вышележащие слабообогатенные глинисто-карбонатные породы с концентрациями $C_{\text{орг}}$ до 0,21 % [8]. Общая мощность нижнемойероканской подсвиты равна 55 м. Среднее содержание органического углерода составляет 1,5–1,7 % (см. рис. 1).

Катагенетическая преобразованность ОВ в породах среднего течения р. Мойеро изменяется от MK_1 до AK_{1-2} при региональном катагенезе MK_1 .

Органическое вещество (коллохитинит) в мергеле углеродистом (н. о. на породу – 47,2

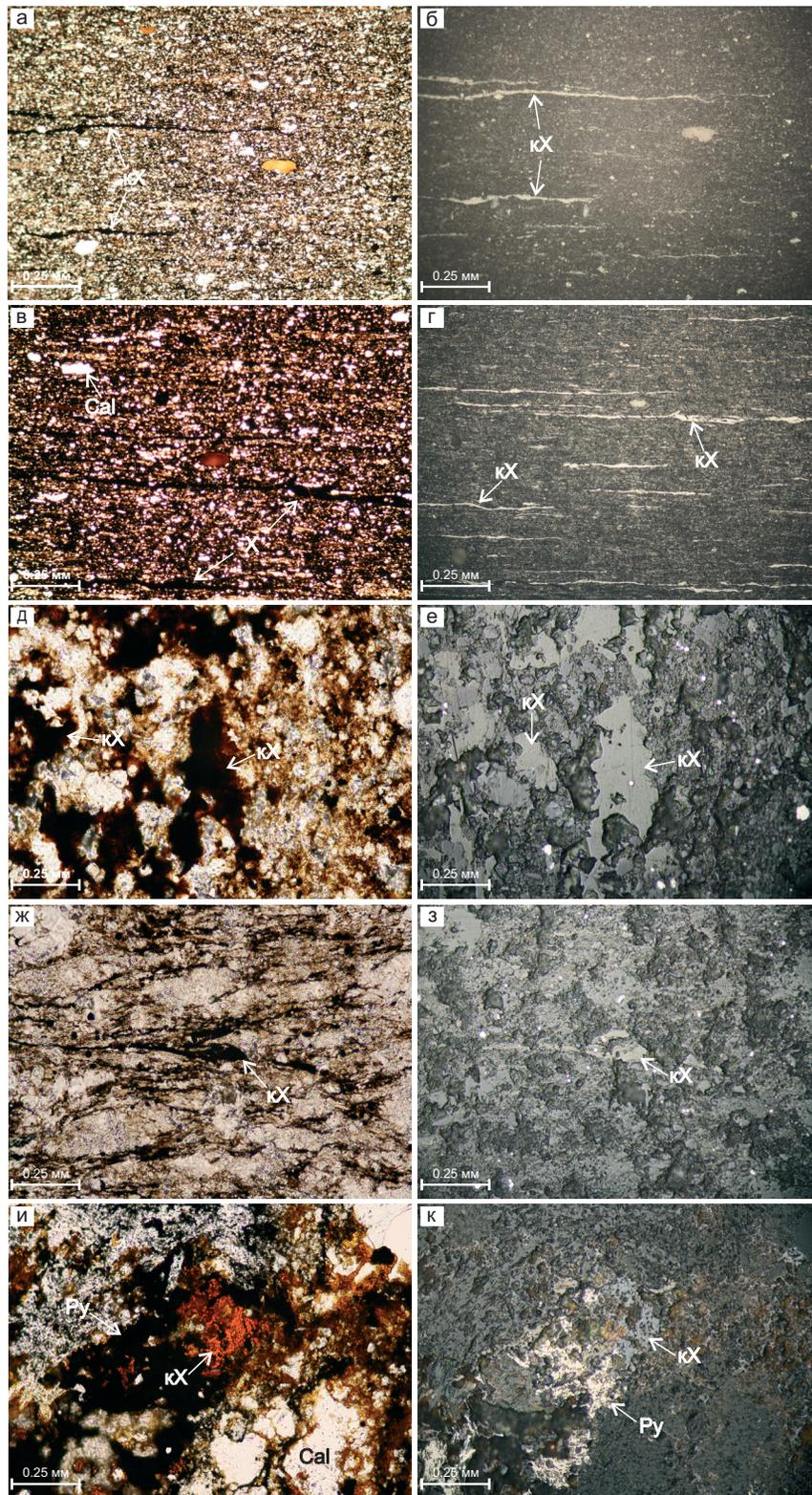


Рис. 3. Вещественно-петрографический состав и показатели отражения микрокомпонентов ОБ

а, б – фрагменты граптолитов (коллохитинит) вытянутой штриховатой формы, R^0 – 1,1 %, MK_3 (ув. $\times 20$; *а* – проходящий, *б* – отраженный свет); *в, г* – фрагменты коллохитинита (граптолитов), ориентированные параллельно слоистости, R^0 – 1,69 %, MK_5 ; *д, е* – коллохитинит с примесью коллоальгинита (?) в виде однородных включений с четкими границами, в отраженном свете бесструктурный, местами минерализованный, R^0 – 0,51 %, MK_1 ; *ж, з* – коллохитинит коричневатого-бурого цвета, характеризуется послойным распределением и равномерно обогащает породу, R^0 – 0,90 %, MK_2 ; *и, к* – коллохитинит в виде неправильной формы образований, частично пиритизированных с сохранением участков, просвечивающих коричневым цветом, R^0 – 2,01 %, AK_{1-2} . Обозначения: кХ – коллохитинит; Py – пирит; Cal – кальцит

и $C_{орг} = 7,27\%$), преобразованное до градации начала $МК_1$ (Д), представлено однородными включениями с четкими границами размером до 0,24 мм, агрегаты – до нескольких миллиметров, коричневато-бурого цвета, частично измененными до черного цвета (рис. 3, д, е). В отраженном свете ОВ – серое, зачастую бесструктурное, местами минерализованное (с шагреновой поверхностью). Значения отражательной способности невысокие (%): $R^{0min} = 0,41$, $R^{0max} = 0,48$, $R^n = 0,43$, в пересчете на витринит (R^{0vt}) – 0,51 %.

Региональный катагенез ОВ не исчерпывает всех его постдиагенетических изменений. В локальных участках разрезов, в зонах экзоконтактов долеритовых интрузий ОВ пород подверглось контактовому метаморфизму. О высоком температурном воздействии на породы свидетельствует степень измененности ОВ, которое наиболее чувствительно к температурным колебаниям среды вмещающих пород.

В мергеле углеродистом (н. о. на породу – 30,1 и $C_{орг} = 3,79\%$), преобразованном до градации $МК_2$ под действием секущей дайки мощностью 40 м, ОВ от коричневатого-бурого до преимущественно черного цвета характеризуется послойным распределением и равномерно обогащает породу (рис. 3, ж, з). В образце, отобранном на расстоянии 60 м от контакта с секущим интрузивным телом, значения отражательной способности коллохитинита составляют (%): $R^{0min} = 0,72$, $R^{0max} = 1,01$, $R^n = 0,85$, в пересчете на $R^{0vt} = 0,78–0,90\%$, что соответствует стадии среднего мезокатагенеза $МК_2$ (Г).

Измененное до апокатагенеза под действием интрузии ОВ в мергеле углеродистом (н. о. на породу – 33,8 и $C_{орг} = 1,42\%$) представлено крупными ксеноморфными пиритизированными образованиями с сохранением участков, просвечивающих коричневым цветом (рис. 3, и, к). Отражательная способность микрокомпонентов ОВ (коллохитинита) характеризуется высокими значениями (%): $R^{0min} = 2,06$, $R^{0max} = 2,53$, $R^n = 2,35$, в пересчете на R^{0vt} составляет 2,01 %, что соответствует градациям раннего-среднего апокатагенеза (Т и ПА).

Согласно электронно-микронзондовому анализу, в составе ОВ ярко выделяется присутствие серы (3,15–5,88 %), железа (0,62–3,17 %) и хлора (0,35–1,12 %). Пирит представлен большей частью продуктом его окисления – ссомольником $Fe^{+2}SO_4 \times H_2O$ (водный сульфат железа), для которого характерны таблитчатые агрегаты кристаллов с сохранением реликтовых участков пирита.

Термальное воздействие траппов на углеродистые мергели нижней подбиты мойероканской свиты обусловило, с одной стороны, ускорение созревания ОВ (от градации $МК_1$ к $МК_2$), а с другой, – сильный метаморфизм ОВ в узких приконтактовых зонах (подстадия АК).

Катагенетические границы главной зоны нефтеобразования (ГЗН) или нефтяного окна соответствуют значениям $R^0 = 0,5–0,90\%$ и на

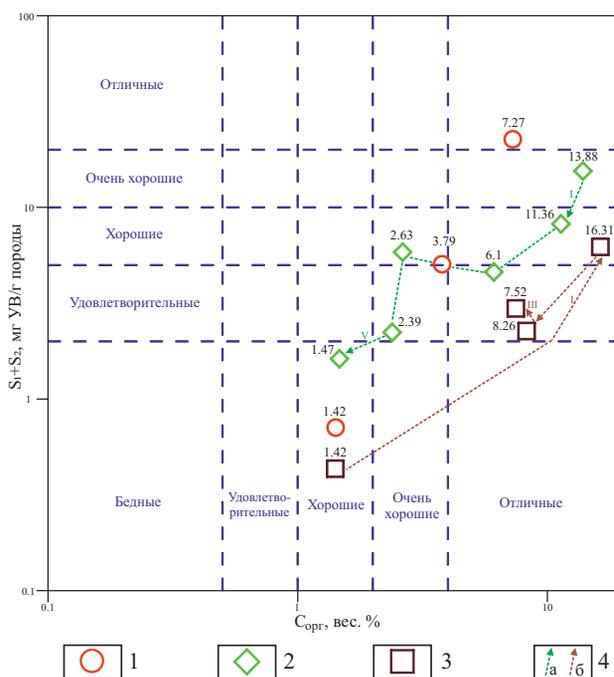


Рис. 4. Классификационная диаграмма, демонстрирующая генетический потенциал граптолитовых сланцев

1 – р. Мойеро; 2 – р. Курейка; 3 – скв. Кыстыктахская 1П; 4 – изменение параметров снизу вверх по разрезу в пределах аргиллитовой пачки I (а – р. Курейка, б – скв. Кыстыктахская 1П). Цифры – концентрации $C_{орг}$

территории Сибирской платформы отвечают градациям $МК_1–МК_2^2/МК_3$. Отложения долины р. Мойеро (восток синеклизы) приурочены к самой верхней границе ГЗН ($R^0 0,51\%$). В скважинах Микчангинская 31 ($R^0 1,1\%$) и Кыстыктахская 1П ($R^0 1,69\%$) (северо-запад синеклизы) граптолитовые сланцы находятся за пределами нефтяного окна.

Пиролитические исследования. Пиролитиз выполнен из образцов долины р. Мойеро и скв. Кыстыктахская 1П, по которым определена величина отражательной способности, а также дополнительно из образцов р. Курейка (см. рис. 1). Пиролитические параметры регулируются количеством ОВ в породе и степенью его катагенетической преобразованности.

В образцах р. Мойеро из базальной аргиллитовой пачки ($C_{орг} 1,42–7,27\%$) для градации катагенеза, соответствующей началу $МК_1$ ($C_{орг} 7,27\%$), реализованный нефтематеринский потенциал ОВ (S_1), т. е. содержание в породе уже выделившихся из керогена жидких УВ нефтяного ряда (битумоидов), составляет 2,43 мг УВ/г породы. Высокое значение пика $S_2 = 20,23$ мг УВ/г породы, существенно (почти в девять раз) превышающее пик S_1 , а также сумма параметров S_1 и $S_2 = 22,46$ мг УВ/г породы (рис. 4) отвечают высокому суммарному количеству потенциальных углеводородов, которые могут образоваться при полной реализации нефтематеринского потенциала, содержащегося в породе ОВ. Нереализованный углеводородный потенциал ОВ (НП) достигает 278 мг УВ/г $C_{орг}$. $T_{max} 437\text{ }^\circ\text{C}$ отражает невысокую

зрелость ОВ и соответствует начальной стадии раннего мезокатагенеза и зоне прогрессивного развития процессов нефтеобразования. Значение индекса продуктивности (PI) – 0,11 характеризует низкую степень выработанности керогена, что отвечает началу главной фазы нефтеобразования (ГФН).

Для градации катагенеза МК₂ остаточный нефтегазоматеринский потенциал ОВ (S₂) отличается заметно более низким значением в сравнении с градацией МК₁, (3,55 против 20,23 мг УВ/г породы) в результате более низкого в сравнении с образцом, преобразованным до градации МК₁, содержания C_{орг} (3,79 против 7,27 %) и более высокой его катагенетической зрелости. Пик S₂ (3,55 мг УВ/г породы) чуть более чем в два раза превышает пик S₁ (1,50 мг УВ/г породы). Уменьшение значения пика S₁ объясняется расходом битумоида в процессе эмиграции с ростом катагенеза. Нефтегазоматеринский потенциал породы, сохранившийся к данной градации катагенеза (S₁+S₂) – 5,05 мг УВ/г породы, что соответствует материнской породе с удовлетворительным генетическим потенциалом (рис. 4). Значение водородного индекса для градации катагенеза МК₂ – 94 мг УВ/г C_{орг}, что обусловлено ростом зрелости ОВ, увеличением карбонизации керогена и уменьшением в его составе содержания водорода. Индекс продуктивности, служащий относительной мерой катагенеза в этом образце, соответственно выше и равен 0,30.

Для градации катагенеза АК_{1–2} значение пика S₂ в соответствии с содержанием C_{орг} (1,42 %), катагенетической зрелостью ОВ и высокой реализацией нефтематеринского потенциала отмечается весьма низким значением (0,43 мг УВ/г породы), несущественно превышающим пик S₁ (0,28 мг УВ/г породы), сумма S₁ и S₂ минимальна и равна 0,71 мг УВ/г породы (рис. 4). Значение водородного индекса в образце, преобразованном до градации АК_{1–2}, очень низкое (HI 30 мг УВ/г C_{орг}), что характеризует почти полностью реализованный углеводородный потенциал ОВ. Индекс продуктивности, напротив, обладает наиболее высоким значением – 0,4 и отражает высокую выработанность керогена.

Геохимические показатели ОВ, определенные пиролизическим методом по образцам р. Курейка (МК₂), характеризуют нефтематеринские породы в пределах аргиллитовой пачки I с содержанием C_{орг} 1,44–13,88 %, которое уменьшается снизу вверх по разрезу. Доля исходного генетического потенциала (S₁), реализованного в УВ, достигает 3,11 мг УВ/г породы, а количество потенциальных УВ, способных генерироваться содержащимся в породе ОВ (S₂), – 12,59 мг УВ/г породы. Стадия зрелости породы, согласно величине Tmax, замеренной в вершине пика S₂, составляет 440 °С и отвечает главной зоне нефтеобразования. Величина индекса продуктивности изменяется от 0,16 до 0,36. Однако нереализованный углеводородный потенциал ОВ для градации МК₂ довольно невысокий, не выше 110 мг УВ/г C_{орг}, что,

вероятно, является отражением раннего созревания зоогенного ОВ с граптолитовой основой и прекращения им генерации битумоида в начале раннего мезокатагенеза. Снизу вверх по разрезу по мере удаления от подошвы пачки, согласно падению концентрации C_{орг} в 9,5 раз, величина S₁ снижается в пять раз – от 3,11 до 0,59 мг УВ/г породы, S₂ в 12 раз – от 12,59 до 1,04 мг УВ/г породы, S₁+S₂ уменьшается от 15,7 до 1,63 мг УВ/г породы (рис. 4). HI неравномерно колеблется от 110 до 59 мг УВ/г C_{орг}. При снижении содержания нерастворимого остатка (глинистой примеси) в 1,1 раза (88–80 %) концентрация C_{орг} падает в 9,5 раз (13,88–1,47 %).

В образцах из скв. Кыстыктахская 1П (C_{орг} 1,42–16,31 % в пределах пачки I) значения пика S₂ являются невысокими – 2,1–5,9 мг УВ/г породы и свидетельствуют о низком суммарном количестве потенциальных жидких и газообразных УВ, способных генерироваться содержащимся в породе ОВ вследствие высокой реализации его нефтегазоматеринского потенциала. Количество остаточного битумоида в породе (S₁) – 0,15–0,32 мг УВ/г породы. Tmax 572–594 °С характеризует ОВ граптолитовых сланцев как сверхзрелое, отвечающее подстадии АК. Однако в связи с большим содержанием органического углерода значения параметра S₂ и его отношения к параметру S₁ заметно выше в сравнении с образцом долины р. Мойеро (C_{орг} 1,42 %) при идентичной градации катагенеза. Нереализованный углеводородный потенциал ОВ колеблется в пределах 20–36 мг УВ/г C_{орг}. Отмечена обратная связь параметров Tmax и HI: по мере возрастания катагенеза, что проявлено в увеличении Tmax, потенциал ОВ реализуется и остаточная его доля соответственно снижается. В пределах первой пачки глинистые известняки из реперного уровня выделяются минимальными значениями всех параметров: C_{орг} – 1,42 %, S₁ – 0,15 и S₂ – 0,28 мг УВ/г породы, HI – 20 мг УВ/г C_{орг}, которые резко увеличиваются при переходе к базальному горизонту аргиллитовой пачки: C_{орг} возрастает в 11,5 раз – до 16,31 %, S₁ в два раза – до 0,31 и S₂ в 21 раз – до 5,9 мг УВ/г породы, HI в 1,8 раза – до 36 мг УВ/г C_{орг} (рис. 4).

В пределах аргиллитовой пачки величина C_{орг} изменяется снизу вверх по разрезу от 16,31 до 7,52 % (в 2,2 раза), величина S₁ снижается незначительно от 0,32 до 0,27 мг УВ/г породы, S₂ падает в два раза от 5,9 до 2,7 мг УВ/г породы, S₁+S₂ от 6,22 до 2,25 мг УВ/г породы (рис. 4). HI уменьшается на одну единицу – до 35 мг УВ/г C_{орг}. Величина C_{орг} снижается на величину разницы в содержании нерастворимого остатка (82,8 против 38 %).

Согласно термической зрелости (в отношении способности нефтегазогенерации), ОВ относится к стадиям ранней зрелости в районе р. Мойеро (Tmax 437 °С), достигло пика нефтегенерации на территории р. Курейка (Tmax 440 °С) и является сверхзрелым на территории скв. Кыстыктахская 1П (Tmax 594 °С).

Катагенетические изменения нерастворимой части ОВ и битумоидов. Катагенез ОВ граптолитовых сланцев также рассматривается на основании изменения его химического состава — параметров дебитуминизированной нерастворимой части ОВ (НОВ) и синбитумоидов. В граптолитовых сланцах состав керогена и степень битуминизации ОВ изменяются в процессе катагенеза местами относительно закономерно, так как некоторые катагенетические изменения затушевываются неоднородностями биоценологического состава ОВ.

Как было рассмотрено выше, в граптолитовых сланцах нижнего силура в составе фоссилизированного ОВ существенная роль принадлежит остаткам граптолитов. Относительная доля граптолитов определяется содержанием $C_{орг}$, которое тем выше, чем больше зоогенной компоненты в составе ОВ. На основе результатов углепетрографических исследований выявлено, что в граптолитовых сланцах также отмечаются остатки планктонных зеленых водорослей.

Согласно данным А. М. Обута [6], в граптолитовых сланцах Средней Азии среди органического материала вместе с остатками граптолитов и продуктов их размножения встречается масса органического детрита. Этот детрит является в основном остатками разложения микропланктона, которым могли питаться граптолиты. Об участии в биоценозе планктонных водорослей свидетельствуют многочисленные находки псевдопланктонных граптолитов, которые существовали, прикрепляясь к планктонным организмам.

Таким образом, в ОВ граптолитовых сланцев определенная доля принадлежит и фитопланктону, о чем свидетельствуют, как будет показано ниже, обратные соотношения содержания углерода в породах и водорода в керогене и колебания битумоидной составляющей.

Нерастворимая часть ОВ в граптолитовой толще является автохтонной, т. е. сингенетичной вмещающей породе, поэтому главный показатель катагенеза ОВ — элементный состав и выход летучих компонентов керогена.

Содержание хлороформного битумоида А (ХБА) в породе и степень битуминизации ОВ ($\beta^{ХБА}$) также используются для оценки катагенеза ОВ. Колебания значений $\beta^{ХБА}$, в особенности в раннем и среднем мезокатагенезе, существенно зависят не только от катагенеза, но по большей части от концентрации ОВ. В этой связи закономерное или, напротив, закономерно распределение степени битуминизации ОВ (β) по отношению к концентрации ОВ (содержанию $C_{орг}$) при подстадиях прото- и мезокатагенеза ОВ может свидетельствовать о генетическом типе битумоидов, т. е. их автохтонности, параавтохтонности или аллохтонности. Важность генетической диагностики битумоидов заключается не столько в уточнении степени зрелости ОВ пород, сколько в первую очередь в определении нефтематеринских свойств вмещающих пород и выявления параавтохтонного битумоида, генетически

связанного с перераспределением битумоидных компонентов ОВ внутри материнской толщи или вторичного битумоидного фона, свидетельствующего о присутствующих следах миграционного потока [3].

В этом отношении надежные результаты дает метод огив-субогив [3; 8]: выстраивается ранжированный ряд концентраций $C_{орг}$, а над ним — в тех же образцах — геохимические параметры керогена и/или битуминологические параметры ОВ—ХБА и β . Например, при закономерном размещении суммы параметров $C_{орг}$ —ХБА— β битумоид можно считать сингенетичным. Для оценки изменения абсолютных и относительных значений концентраций битумоидов, т. е. ХБА и $\beta^{ХБА}$, а также элементного состава НОВ от катагенетической эволюции ОВ, метод огив-субогив был модифицирован и дополнен ранжированным рядом градаций катагенеза, в основу которого положена палеоглубина погружения отложений.

Катагенетические изменения керогена. Геохимические параметры керогена определяются биоценологическим составом фоссилизированного ОВ и степенью его катагенетической зрелости [11].

Прежде чем охарактеризовать катагенетические изменения параметров ОВ граптолитовых сланцев, следует определить место образцов их керогена в классификационном спектре. Тип керогена — I, II или III — определяется по диаграмме Ван Кревелена, определяющей соотношение атомных отношений Н/С и О/С в керогене. На рис. 5 показана диаграмма Ван Кревелена для нерастворимого ОВ граптолитовых сланцев. По положению фигуративных точек кероген попадает преимущественно в поле II и частично III типов, что обусловлено разной степенью

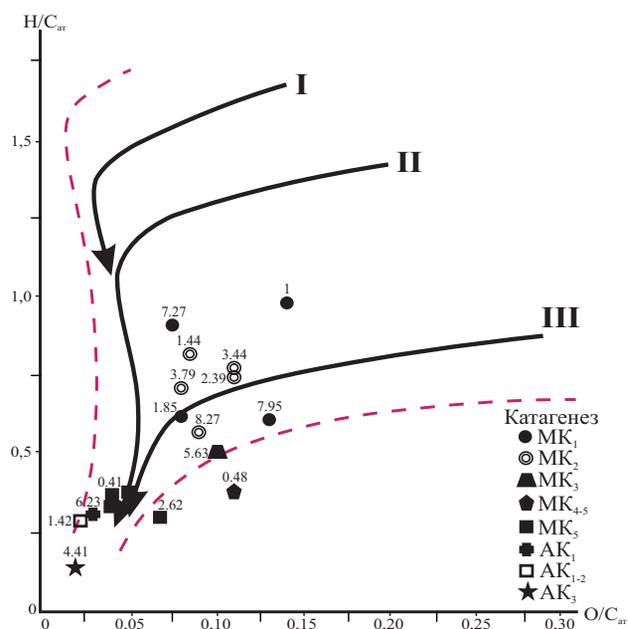


Рис. 5. Диаграмма Ван Кревелена, отражающая тип керогена ОВ граптолитовых сланцев

Цифры — концентрации $C_{орг}$

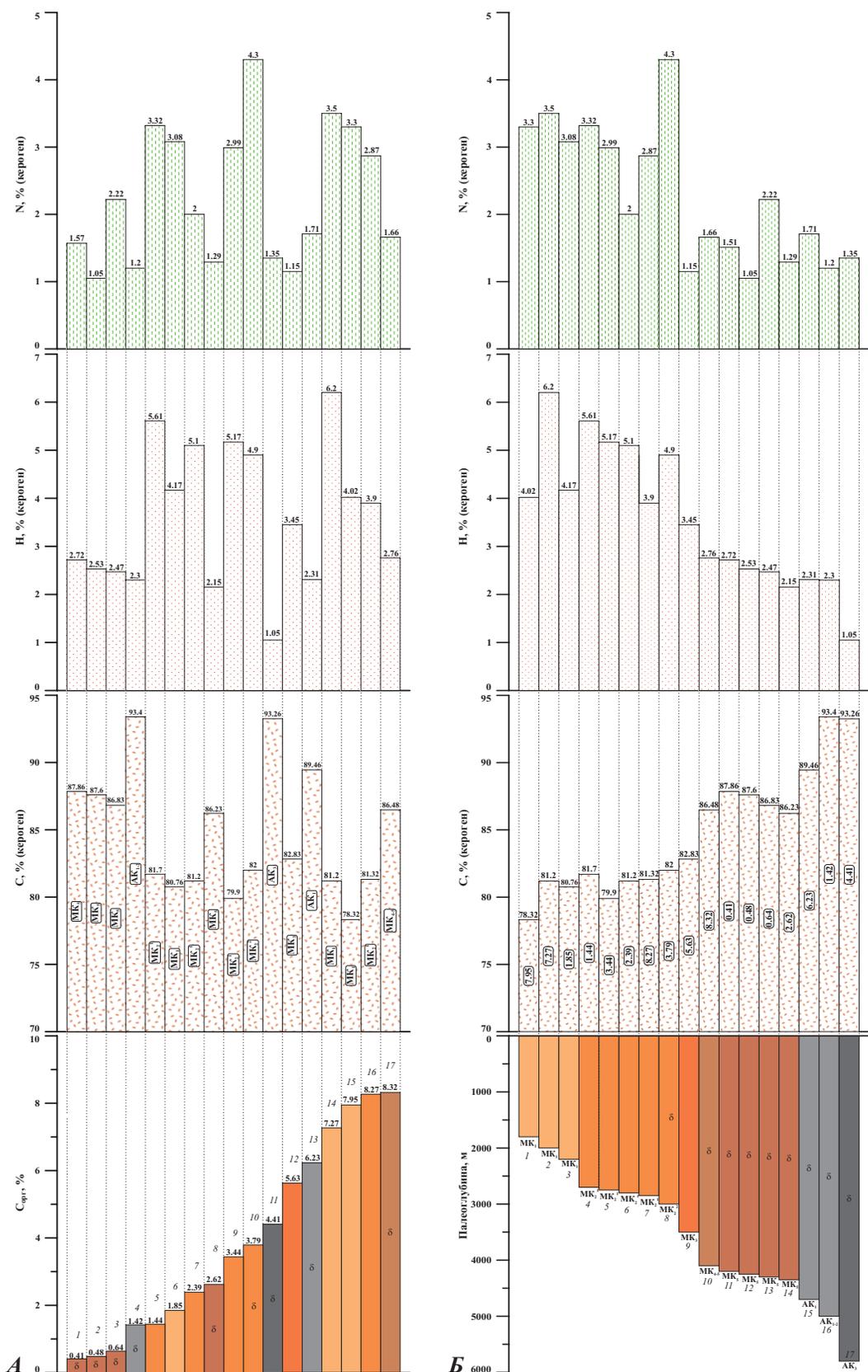


Рис. 6. Зависимость геохимических параметров керогена от содержания углерода в породах (А) и катагенетической эволюции ОБ (Б)

А – обр. 1–3, 8, 13 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 4, 10, 14 – долина р. Мойеро; обр. 5, 9, 16 – р. Курейка; обр. 6 и 15 – р. Летняя и Тенна-Сесь; обр. 7 – скв. Бираминская 10; обр. 11 – скв. Бильчанская 1; обр. 12 – скв. Южно-Пясиная 30; обр. 17 – скв. 24 (р. Убойная).
 Б – обр. 1 и 3 – р. Тенна-Сесь и Летняя; обр. 2, 8, 16 – долина р. Мойеро; обр. 4, 5, 7 – р. Курейка; обр. 6 – скв. Бираминская 10; обр. 9 – скв. Южно-Пясиная 30; обр. 10 – скв. 24 (р. Убойная); обр. 11–15 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 17 – скв. Бильчанская 1; δ – воздействие интрузий

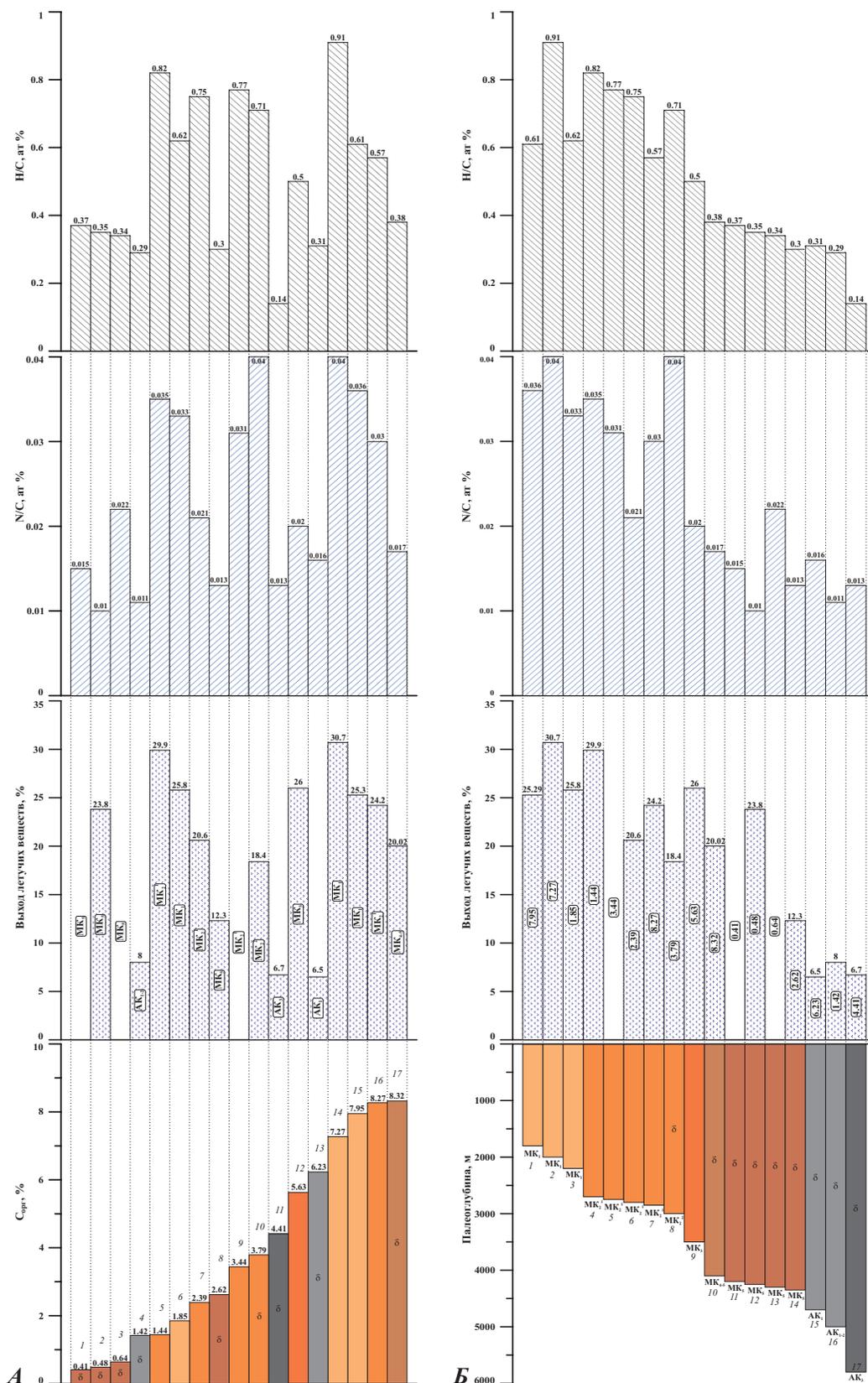


Рис. 7. Связь параметров НОВ (выхода летучих продуктов и атомных отношений) с содержанием S_{орг} в породах (А) и катагенетической эволюцией ОБ (Б)

А – обр. 1–3, 8, 13 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 4, 10, 14 – долина р. Мойеро; обр. 5, 9, 16 – р. Курейка; обр. 12 – скв. Южно-Пясинская 30; обр. 17 – скв. 24 (р. Убойная).
 Б – обр. 1 и 3 – р. Тенна-Сесь и Летняя; обр. 2, 8, 16 – долина р. Мойеро; обр. 4, 5, 7 – р. Курейка; обр. 6 – скв. Бираминская 10; обр. 9 – скв. Южно-Пясинская 30; обр. 10 – скв. 24 (р. Убойная); обр. 11–15 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 17 – скв. Бильчанская 1; δ – воздействие интрузий

катагенетической преобразованности ОВ. Отношение $H/C_{ат}$ изменяется в диапазоне 0,14–0,98, $O/C_{ат}$ – 0,02–0,14. Атомные отношения увеличиваются с понижением градации катагенеза от AK_3 (0,14 и 0,02) до MK_1 (0,98 и 0,14). Отношение $H/C_{ат}$ в керогене отвечает нижнему пределу II типа (~1) при оптимальном для данного типа керогена значении отношения $O/C_{ат}$ (0,14). Отчетливо проявлено изменение элементного состава керогена в катагенезе, выраженное уменьшением атомных отношений H/C и O/C с ростом катагенетической преобразованности ОВ. В рамках градаций MK_1 и в особенности MK_2 обнаруживается смещение фигуративных точек по параметру $H/C_{ат}$ в поле III типа среди образцов, наиболее обогащенных $C_{орг}$ и, соответственно, имеющих наибольшую долю зоогенной компоненты в составе ОВ.

Если обратиться к элементному составу керогена граптолитовых сланцев, то на этапе MK_1 – MK_2 фиксируется относительная стабилизация углерода в НОВ при медленном снижении водорода, что находит объяснение в деструкции ОВ и массовой генерации жидких углеводородов (рис. 6).

Геохимические параметры керогена ОВ граптолитовых сланцев, преобразованных до градации MK_1 (региональный катагенез), изучены в нескольких образцах, представленных мергелями углеродистыми и аргиллитом известковистым и отобранных в разрезах среднего течения р. Мойеро (восточный борт Тунгусской синеклизы) и в разрезах рек Летняя и Тенна-Сесь (приток р. Летняя) (западный борт синеклизы).

Породы, преобразованные до градации MK_1 (палеоглубины 1800–2000 м) при колебаниях $C_{орг}$ 1,85–7,95 %, характеризуются содержанием углерода ($C_{нов}$) 78,32–81,2 %. Водород ($H_{нов}$) и выход летучих продуктов ($V_{нов}$) достигают максимального значения из всей выборки образцов – 6,2 и 30,7 % при минимальных значениях 4,02 и 25,29 % соответственно. Величина $N_{нов}$ изменяется от 3,08 до 3,5 % и увеличивается с ростом содержания ОВ в породах (рис. 5; обр. 1–3). Величины атомных отношений составляют $H/C_{ат}$ 0,61–0,91, $N/C_{ат}$ 0,033–0,04 (рис. 7; обр. 1–3).

Граптолитовые сланцы, преобразованные под действием регионального катагенеза до градации MK_2 (палеоглубины 2600–2800 м), отобраны в обнажении на р. Курейка (рис. 6, 7; обр. 4, 5, 7). Исключение составляют мергели углеродистые скв. Бираминская 10 (обр. 6) и разреза р. Мойеро (обр. 8), ОВ в составе которых преобразовано до градаций MK_2^1 и MK_2^2 (~3000 м) под действием интрузий.

В пределах градации MK_2 проявилась тенденция к некоторому увеличению $C_{нов}$ от 79,9 до 82 % и заметному снижению $H_{нов}$ от 5,61 до 3,9 % по крайним значениям (рис. 6). На фоне катагенетических изменений колебания значений углерода и водорода в керогене обусловлены колебаниями доли граптолитовой составляющей в составе ОВ.

В аргиллитах известковых р. Курейка, преобразованных до градации MK_2^1 , доля граптолитов в ОВ возрастает с увеличением $C_{орг}$ в породах. Содержание C в НОВ при этом увеличивается, составляя 79,9 % (при $C_{орг}$ 3,44 %; обр. 5) и 81,32 % (при $C_{орг}$ 8,27 %; обр. 7), а концентрация H в НОВ снижается 5,17–3,9 % соответственно (рис. 5). Атомные отношения $H/C_{ат}$ – 0,77 ($C_{орг}$ 3,44 %) и 0,57 ($C_{орг}$ 8,27 %) (рис. 7).

С возрастанием граптолитовой составляющей увеличивается и содержание азота в керогене, что связано с животным происхождением и хитиновым составом остатков граптолитов. Максимальное значение $N_{нов}$ 4,3 % из всей выборки образцов характерно для мергеля углеродистого р. Мойеро, преобразованного до градации MK_2^2 (рис. 6; обр. 8). При этом выход летучих веществ характеризуется самой низкой величиной в рамках градации MK_2 , составляя 18,4 % (рис. 7; обр. 8), при максимальном значении – 29,9 % (рис. 7; обр. 4), что может свидетельствовать об уменьшении выхода летучих веществ, в том числе за счет увеличения доли граптолитовой составляющей в ОВ.

В нерастворимой части ОВ на градации MK_3 в скв. Южно-Пясинская 30 (палеоглубина ~3500 м) отмечается изменение значений основных параметров в сравнении с MK_2 (рис. 6): величина $C_{нов}$ возрастает от ~81 (MK_2) до ~83 % (MK_3); содержание $H_{нов}$, напротив, снижается от 3,9 (MK_2^1 ; обр. 7) до 3,45 % (MK_3 ; обр. 9). Согласно балансовым расчетам, в альгозоогенном ОВ граптолитовых сланцев на градации катагенеза MK_3 выделяется второй пик генерации углеводородных газов (УВГ), естественно, со значительной потерей водорода в ОВ [3]. С этого этапа на поведение геохимических параметров керогена доминирующее влияние оказывает степень катагенетической зрелости ОВ, в отличие от неоднородности исходного материала.

Нерастворимая часть ОВ на конечных стадиях мезокатагенеза и особенно в апокатагенезе (палеоглубины от 4400 м и более) предстает уже сильно истощенной. Происходит дальнейшее снижение концентрации водорода и азота в ОВ (рис. 6; обр. 10–17). Концентрация $H_{нов}$ падает от 2,76 (MK_{4-5} ; обр. 10) до 1,05 % (AK_3 ; обр. 17). Концентрация азота обнаруживает общую тенденцию к снижению и колеблется в основном в пределах 1–1,7 % (рис. 6). Об удалении азота свидетельствует снижение атомных отношений $N/C_{ат}$ в процессе катагенеза (рис. 7). Углерод в ОВ возрастает до 86,48 % (MK_{4-5}), а в преобразованных до подстадии апокатагенеза под действием интрузий разностях граптолитового ОВ концентрация углерода достигает 89,5–93,4 % (рис. 6; обр. 15–17). На этом этапе тонкие различия в биоценоотическом составе ОВ уже полностью стираются. В этой связи в образцах, преобразованных до градаций MK_5 – AK_3 , не наблюдается зависимости геохимических параметров керогена от содержания углерода в породах, и определяющую роль в колебании

параметров НОВ играет разница в катагенетической преобразованности ОВ. Например, в граптолитовых сланцах из скв. 24 (р. Убойная) (при $C_{орг}$ 8,32 %; обр. 10) градация катагенеза — МК₄₋₅, из скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска) (при $C_{орг}$ 0,41 %; обр. 11) МК₅, концентрации $H_{нов}$ — 2,76 и 2,72 % соответственно (рис. 6). Преобладание углерода в НОВ в конце мезокатагенеза и апокатагенезе выражается в низких отношениях $H/C_{ат}$, которые стремительно уменьшаются с увеличением степени катагенетической зрелости ОВ от 0,38 (МК₄₋₅) до 0,14 % (АК₃) (рис. 7).

Выход летучих веществ ($V_{нов}$) является своеобразным показателем генерации УВ. Как было отмечено выше, в начале мезокатагенеза ОВ граптолитовых сланцев содержало до 30,7 % летучих веществ; в конце мезокатагенеза их концентрация снизилась до 12,3 %; в апокатагенезе содержание $V_{нов}$ 6,5–8 % (рис. 7).

Катагенетические изменения битумоидов. Особенности состава НОВ описываемых образцов находят свое отражение в количестве и качестве битумоидной части ОВ. Геохимические характеристики битумоидов обладают большим диапазоном значений, что связано с их подвижностью и зависимостью не только от типа и концентрации ОВ, его катагенетической превращенности, но и от процессов миграции. Содержания хлороформного битумоида в исследуемых образцах граптолитовых сланцев колеблются в пределах от тысячных (0,003 %) до десятых (0,788 %) долей процента на породу, что объясняется колебаниями значений $C_{орг}$, долей граптолитовой составляющей и главным образом катагенетическими изменениями ОВ.

В изучаемых образцах граптолитовых сланцев максимальных значений концентрация синбитумоидов достигает на градации МК₁, т. е. в начале ГФН, когда процессы новообразования битумоидов превосходят их эмиграцию. В аргиллите известковом разреза р. Тенна-Сесь концентрация синбитумоида достигает 0,433 %, степень битуминизации — 5,45 % при содержании $C_{орг}$ 7,95 %. Доля в ОВ хлороформного битумоида соответствует количеству сингенетичных битумоидов в доманикитах раннего мезокатагенеза (рис. 8; обр. 1).

В образце мергеля углеродистого из обнажения р. Мойеро (МК₁) при практически аналогичном содержании $C_{орг}$ 7,27 % концентрация ХБА почти в два раза больше и составляет 0,788 %. Разница в степени битуминизации (β) также превосходит в два раза — 10,84 против 5,45 % (рис. 8; обр. 2). Выполненный расчет доли синбитумоида показал, что в битумоиде из мергеля углеродистого истинная концентрация ХБА равна 0,4 %, $\beta^{ХБА}$ составляет 5,5 %. Совокупность данных свидетельствует о присутствии параавтохтонного битумоида, т. е. битумоида, сингенетичного в целом нефтегазоматеринской толще, но не изучаемому образцу породы, или о вторичном битумоиде (смесь син- и эпибитумоидов). Эпибитумоиды образу-

ются при первичной миграции из более древних нефтегазоматеринских горизонтов наиболее восстановленных компонентов ОВ.

В образце мергеля, отобранном в обнажении р. Летняя, при содержании $C_{орг}$ 1,85 % абсолютное значение концентрации ХБА составляет 0,25 % и является самым низким среди образцов градации МК₁ (рис. 8; обр. 3). Очевидно, что концентрация синбитумоида определяется содержанием ОВ. Однако значение β при содержании $C_{орг}$ 1,85 % повышенное и составляет 13,51 %, что свидетельствует о присутствии в этом образце перераспределенного внутри граптолитовой толщи параавтохтонного битумоида. Обогащенность пород $C_{орг}$ достаточна для перераспределения битумоида внутри толщи. Пересчитанная концентрация синбитумоида составила 0,13 %, которой соответствует величина β — 7 %.

Колебания абсолютных значений концентраций синбитумоидов в образцах р. Курейка (градация МК₂) — 0,05–0,27 %. В двух образцах — мергеле углеродистом ($C_{орг}$ 3,44 %) и аргиллите известковом ($C_{орг}$ 8,27 %) — абсолютные значения ХБА составляют 0,27 и 0,18 % и не пропорциональны содержанию в породах ОВ. Величина β отличается более чем в три раза — 7,85 против 2,2 % (рис. 8; обр. 5 и 7). В этой связи разница абсолютных значений ХБА и содержания ОВ объясняется, во-первых, присутствием в мергеле углеродистом параавтохтонного битумоида (вычисленная концентрация синбитумоида — 0,21 %, β — 6 %), во-вторых, различной долей граптолитовой составляющей в ОВ, о чем свидетельствует содержание Н в НОВ (5,17 против 3,9 %) (рис. 6). С уменьшением значений $C_{орг}$ и увеличением $H_{нов}$ убывает доля граптолитовой составляющей и, вероятно, растет доля фитопланктонной компоненты в ОВ, что способствует увеличению битумоидообразования в граптолитовом ОВ.

Мергели углеродистые, отобранные в разрезах р. Мойеро и в скв. Бираминская 10, выделяются среди образцов градации МК₂ максимальными концентрациями ХБА, равными 0,665 и 0,386 % соответственно. Значения β максимальные из всей выборки образцов — 17,55 и 16,15 % при содержаниях $C_{орг}$ 3,79 и 2,39 % (рис. 8; обр. 6 и 8), что является свидетельством наличия параавтохтонного битумоида. Рассчитанные концентрации синбитумоида составляют (%): ХБА — 0,27, β — 7 (при $C_{орг}$ 3,79) и ХБА — 0,17, β — 7 (при $C_{орг}$ 2,39).

Прямая зависимость в цепочке параметров $C_{орг}$ —ХБА— $\beta^{ХБА}$ характерна для глинистого известняка р. Курейка, в котором при содержании $C_{орг}$ 1,44 % концентрация ХБА составляет 0,05 %, величина β — 3,5 %.

Разброс значений для хлороформного битумоида между образцами определяется, во-первых, разницей в содержании ОВ в обогащенных породах, которая детерминируется среди граптолитовых сланцев примесью фитопланктонной компоненты, являющейся основной битумоидогенерирующей составляющей среди всех фациально-генетических типов сапропелевого ОВ, и,

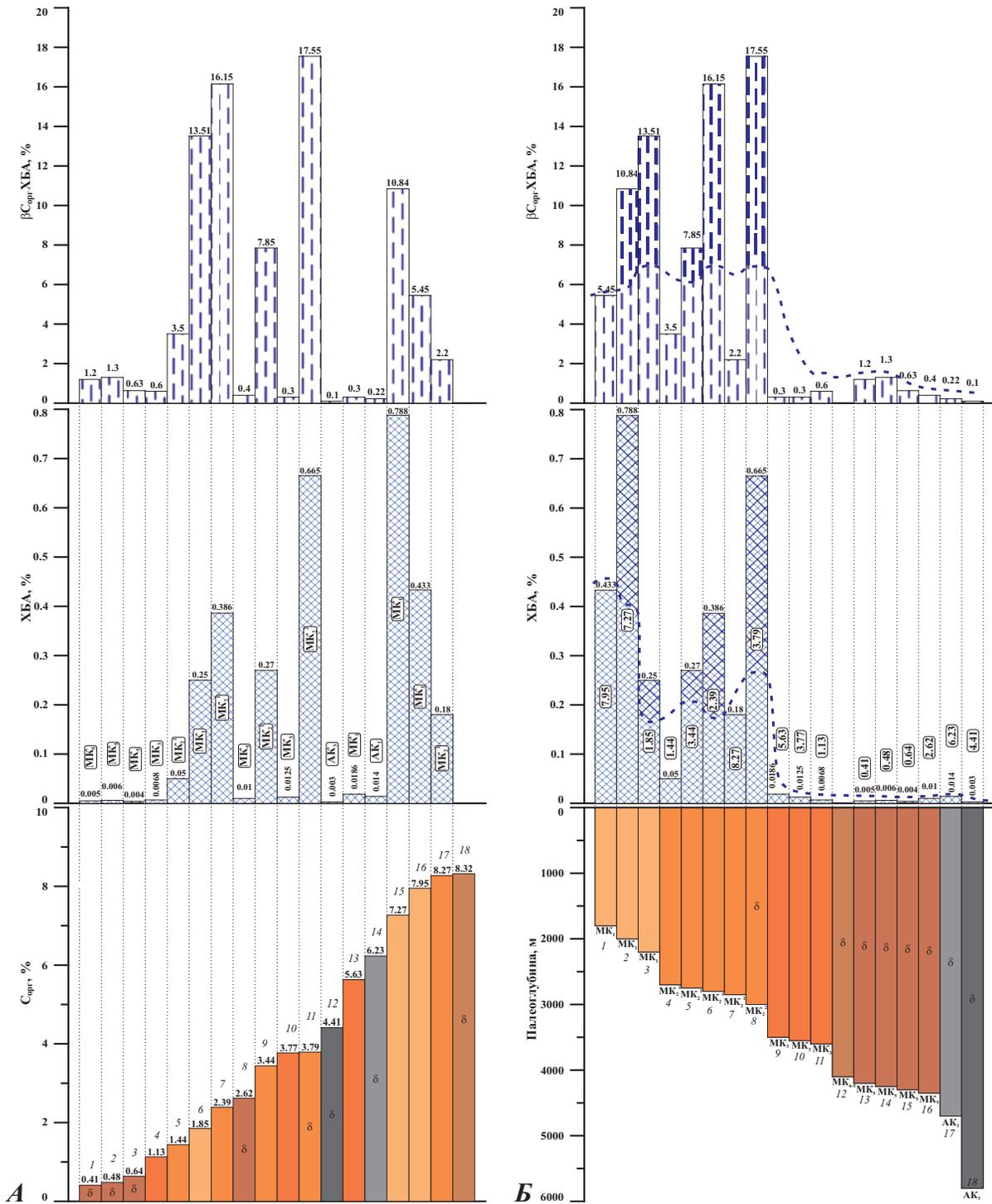


Рис. 8. Связь битуминологических параметров с содержанием углерода в породах (А) и катагенетической эволюцией ОБ (Б)

А – обр. 1–3, 8, 14 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 4, 10, 13 – скв. Южно-Пясинская 30; обр. 11, 15 – долина р. Мойеро; обр. 5, 9, 17 – р. Курейка; обр. 6 и 16 – р. Летняя и Тенна-Сесь; обр. 7 – скв. Бираминская 10; обр. 12 – скв. Бильчанская 1; обр. 18 – скв. 24 (р. Убойная).
 Б – обр. 1 и 3 – р. Тенна-Сесь и Летняя; обр. 2, 8, 16 – долина р. Мойеро; обр. 4, 5, 7 – р. Курейка; обр. 6 – скв. Бираминская 10; обр. 9–11 – скв. Южно-Пясинская 30; обр. 12 – скв. 24 (р. Убойная); обр. 13–17 – скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска); обр. 18 – скв. Бильчанская 1; δ – воздействие интрузий.
 Пунктирная линия отвечает истинной концентрации синбитумоида

во-вторых, эмиграцией битумоида из материнских пород.

На графике изменения значений $\beta^{ХБА}$ важно отметить, что у граптолитовых сланцев от МК₁ к МК₂ фактические значения степени битуминизации с учетом эмиграции и расхода вещества, разницы в значениях $C_{орг}$, а также за исключением разностей, содержащих параавтохтонные битумоды, практически не увеличились, т. е. новообразования (генерации) и прироста синбитумоидов по большей части не происходит. При этом абсолютные значения ХБА не возросли, но напротив, заметно уменьшились, а именно от 0,433 до 0,18 %, что связано с возрастанием катагенеза, так как эмиграция в этом случае увеличивается (рис. 8).

Из анализа абсолютных значений хлороформного битумоида и его доли в ОВ (β), следует, что в собственно граптолитовом ОВ генерация ХБА заканчивается в начале градации МК₁ (максимальная палеоглубина 1800 м), т. е. битумоидообразование в граптолитовом ОВ происходит на этапе ПК₁–МК₁. Начиная с градации катагенеза МК₂¹, в граптолитовых сланцах происходит падение концентраций хлороформного битумоида вследствие снижения количества генерировавшихся нефтяных УВ. Степень битуминизации возрастает сверху вниз от ПК к МК₁, а на МК₂¹ начинает снижаться и на МК₃ падает до десятых долей процента. Тем самым в граптолитовых сланцах процессы новообразования, т. е. генерации жидких УВ и восстановления синбитумоидов, превалируют над процессами их эмиграции в интервале от протокатагенеза до раннего мезокатагенеза (МК₁), а на последующих грациях действуют только эмиграционные процессы.

Динамика флюидогенерации в катагенезе в граптолитовом ОВ носит сокращенный характер. Генерация ХБА, начавшись благодаря раннему созреванию ОВ еще на подстадии ПК (палеоглубина 1 км), заканчивается в начале МК₁, максимум которой приходится на верхнюю (раннюю) часть МК₁ (~1,6–1,8 км), а генерация легких углеводородов (C₇–C₁₄) в граптолитовом ОВ прекращается на градации МК₃/МК₄ (3800 м) с максимальным приростом также в конце градации ПК₃ – начале градации МК₁ [1; 3]. Из этого следует, что генерация жидких углеводородов из материнского керогена в граптолитовом ОВ достигает абсолютного максимума в самом начале ГФН, т. е. в начале градации МК₁ (палеотемпературы 80–90 °С). Главная фаза нефтеобразования в данном случае охватывает градации ПК₂₋₃–МК₁, т. е. при сокращенном типе зональности катагенеза главную зону нефтеобразования, когда идет основное генерационное приращение битумоидов, можно выделить в интервале палеоглубин ~1,4–2,4 км. Эмиграция ХБА и легких углеводородов (ЛУВ) в граптолитовом ОВ прекращается на МК₃ (~4,2 км). Генерация углеводородных газов (УВГ) практически растянута по всей шкале катагенеза, при этом около 2/3 углеводородов генерируется в раннем

и среднем мезокатагенезе (МК₁ – начало МК₃). Первый и основной максимум приходится на конец градации МК₁ (МК₁/МК₂). Небольшой пик генерации УВГ проявляется на градации МК₃.

Таким образом, концентрация и восстановление генерирующегося битумоида в граптолитовом ОВ достигает максимума в зоне погружения материнских отложений на глубину до 1,8–2 (?) км. С ростом глубины погружения все большее распространение получают остаточные разности битумоидов благодаря возрастающей интенсивности эмиграции УВ.

Для сравнения, доманиковое ОВ (подкласс альгозоосапропелиты с тентакулитовой основой), обладая, как и граптолитовое ОВ, определенной хитиновой составляющей (тентакулиты), обнаруживает несколько иную динамику флюидогенерации в катагенезе. Например, генерация ХБА заканчивается к концу МК₃, а генерация легких УВ еще продолжается в АК₂. ГФН охватывает градации МК₁, МК₂ и начало МК₃. При полном катагенетическом цикле доманиковое ОВ образует нефти в 2,5 раза больше, чем горючих газов (соотношение нефть/газ – 2,51) [9; 3]. Однако кероген доманиковой формации также может генерировать УВ на более ранних грациях катагенеза, так как максимум генерации ХБА приходится на конец градации МК₁. Как отмечает А. В. Ступакова с соавторами [10], уже на градации ПК/МК₁ в кремнисто-карбонатных породах доманиковой формации содержание автохтонного хлороформного битумоида достигает 7 %. Наконец, в подклассе альгосапропелитов, в составе ОВ которых доминируют фоссилизированные сине-зеленые водоросли, максимум генерации ХБА смещается еще на одну градацию и приходится на уровень конца МК₂¹ – начала МК₂². Таким образом, увеличение зоогенной компоненты в составе ОВ (граптолиты или тентакулиты) приводит к более раннему созреванию ОВ, когда генерация жидких УВ достигает максимума на этапе не выше начала МК₁ или МК₂¹.

В граптолитовом ОВ, начиная с градации катагенеза МК₂ вплоть до МК₅, происходит только эмиграция битумоида, поэтому его содержание в породе на градации МК₃ резко убывает, а в составе битумоидов преобладают остаточные разности (рис. 8; обр. 9–11). В образцах из скв. Южно-Пясинская 30 при региональном катагенезе МК₃ абсолютные значения остаточного синбитумоида не превышают первых сотых долей процента, достигая максимального значения 0,0186 % [4]. В образцах из настоящей скважины обнаруживается тренд уменьшения абсолютных значений концентраций синбитумоидов и содержания ОВ ($C_{орг}$). При изменении содержания $C_{орг}$ от 5,63 до 1,13 % концентрация синбитумоидов уменьшается от 0,0186 до 0,0068 %. Степень битуминизации, напротив, увеличивается вдвое – от 0,3 до 0,6 %. Однако существенная разница в значениях содержаний $C_{орг}$ и концентраций синбитумоидов объясняется тем, что с ростом катагенеза в процессе

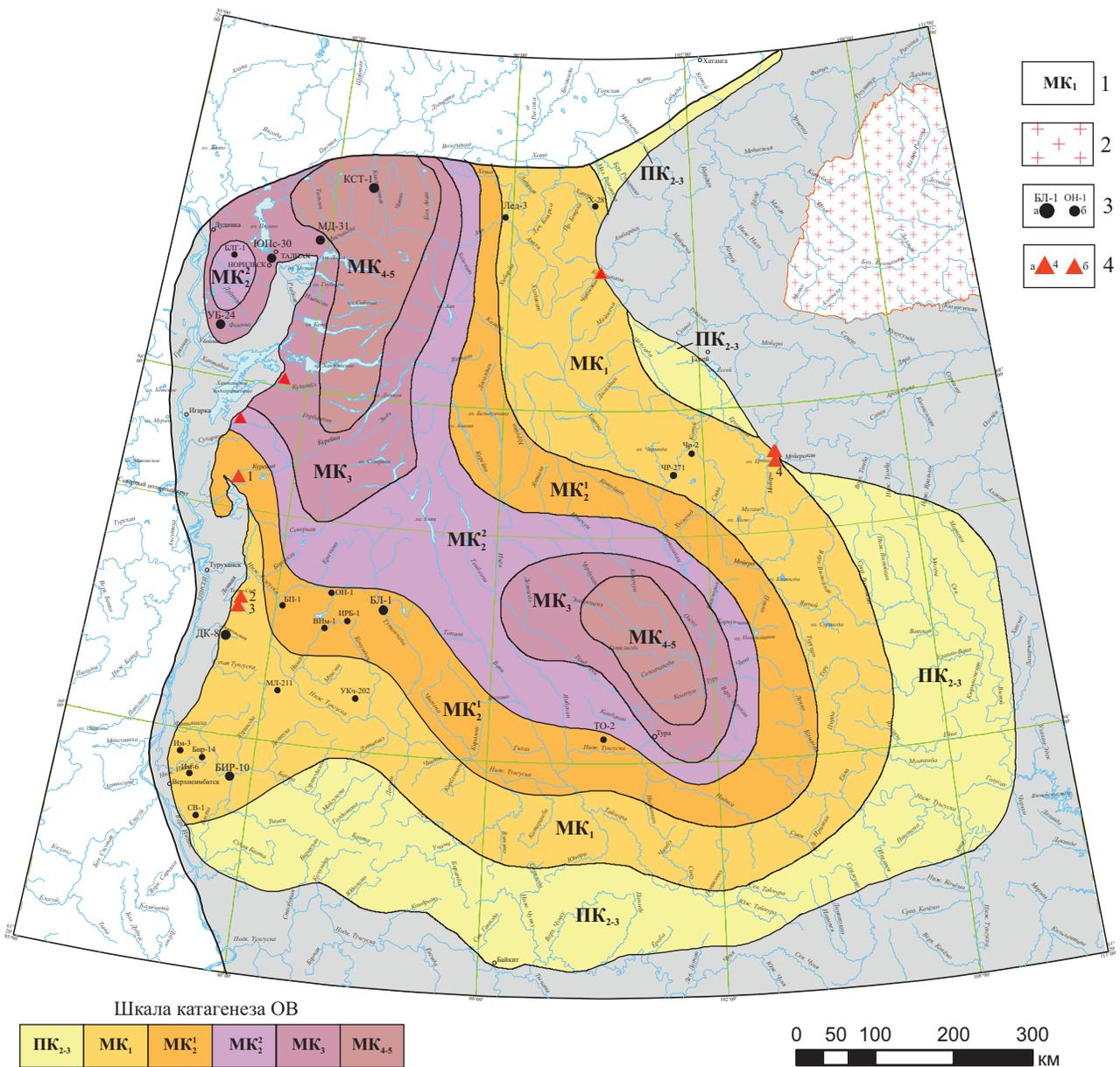


Рис. 9. Карта катагенеза ОБ в подошве мойероканского горизонта. Масштаб 1 : 5 000 000 (по Т. К. Баженовой, с изм. и доп. автора)

1 – градация катагенеза; 2 – выходы кристаллического фундамента; 3, 4 – исследуемые скважины (3) и обнажения (4) (расшифровку см. на рис. 1)

эмиграции битумоид «расходится» значительно быстрее в сравнении с расходом ОБ.

В образцах из скв. Дьявольская 8 (р. Сухая Тунгуска), преобразованных под воздействием интрузивного тела до градации МК₅, в ближайшем к интрузии образце до МК₅–АК₁ при региональном катагенезе МК₁ значимыми в содержании остаточного битумоида становятся только тысячные доли процента (0,004–0,005 %) при субдоманикоидных концентрациях остаточного рассеянного ОБ и в единичных образцах – сотые доли процента (0,01–0,014 %) при доманикоидной и доманикитной концентрации С_{орг} (рис. 8; обр. 13–17). На градации МК₅ заканчивается эмиграция битумоида в граптолитовом ОБ. В образцах скв. Дьявольская 8 при изменении значений

С_{орг} от 6,23 до 0,41 %, уменьшающихся вверх по разрезу, сотые доли процента в значениях ХБА характерны для двух образцов с максимальными содержаниями С_{орг} – 2,62 и 6,23 % (рис. 8).

В подстадии апокатагенеза концентрация синбитумоидов в породах – при любой концентрации С_{орг} – не выше n × 0,00n %. В образце мергеля углеродистого из скв. Бильчанская 1, преобразованном под действием интрузии до градации позднего апокатагенеза, концентрация синбитумоида и степень битуминизации – самые минимальные из всей выборки. Их значения равны 0,003 и 0,1 % соответственно (рис. 8; обр. 18).

В рамках одинаковых градаций катагенеза степень битуминизации ОБ находится в обратной связи с содержанием С_{орг}. Закономерность

В. А. Успенского – Н. Б. Вассоевича об увеличении степени битуминизации ОВ по мере уменьшения его концентрации в большинстве образцов выдерживается (рис. 8). Связь концентраций $C_{орг}$ с составом исходного материала фоссилизированного ОВ – одна из причин проявления настоящей закономерности. Исключения составляют граптолитовые сланцы, отобранные на р. Летняя (МК₁; обр. 3), Мойеро (МК₁; обр. 2 и МК₂¹; обр. 8), Курейка (МК₂¹; обр. 5) и в скв. Бираминская 10 (МК₂¹; обр. 6), в которых наблюдаются результаты перераспределения битумоидной составляющей ОВ внутри материнской толщи с образованием параавтохтонного битумоида или присутствие смешанного битумоида.

В граптолитовых сланцах генерационно-эмиграционное соотношение нефть/газ (ХБА + ЛУВ/УВГ) является самым низким среди прочих типов сапропелитов и численно равно 1,5, т. е. на конец катагенеза граптолитовое ОВ образует нефти в 1,5 раза больше, чем горючих газов. Эта величина сопоставима с таковой в разностях со смешанным ОВ, в составе которого преобладает сапропелевая часть.

Карта катагенеза ОВ в подошве нижнего силура. Метаморфизм ОВ в основании силурийских отложений возрастает по направлению с юга и юго-востока на северо-запад (Норильский и Игарский районы), достигая наиболее высоких градаций МК₃–МК₄₋₅ (рис. 9). Южнее в пределах Туруханского района (включая бассейн рек Курейка и Северная) ОВ находится на градации МК₂. На восточном борту синеклизы ОВ в основании силура достигает градации МК₁, тогда как в крайней юго-восточной части и в бассейне р. Подкаменная Тунгуска преобладает градация ПК₂₋₃; в пределах зоны протокатагенеза граптолитовые фации отсутствуют.

Заключение. Исходным материалом для формирования ОВ исследуемых образцов послужили граптолиты – морские зоопланктонные организмы с хитиновым наружным скелетом. Чем больше в составе ОВ остатков граптолитов, тем выше в породах содержание $C_{орг}$. В этом же направлении происходит уменьшение содержания Н в НОВ и всех пиролитических параметров. Нефтематеринский потенциал органического вещества определяется содержанием в нем водорода. Особенностью зоогенного ОВ граптолитовых сланцев, по сравнению с фитопланктонным типом ОВ, является пониженное содержание в керогене водорода, повышенное углерода и азота. Следовательно доминирование граптолитовой составляющей снижает потенциальные нефтеобразующие свойства ОВ.

При увеличении доли граптолитовой составляющей происходит уменьшение значения $\beta^{ХБА}$. Одна из причин проявления закономерности В. А. Успенского – Н. Б. Вассоевича – разница биоценологических типов ОВ. Количество битумоидов возрастает с уменьшением массы ОВ.

Однако большие размеры и масса зоопланктона с относительно пониженной липидностью увеличивают массу ОВ ($C_{орг}$), снижая генерированную долю битумоида. У граптолитовых сланцев максимум генерации хлороформного битумоида приходится на начало градации МК₁ (ПК₃/МК₁), в подклассе оксисорбосапропелитов и альгозоосапропелитов с тентакулитовой основой – на начало МК₂¹ (МК₁/МК₂¹), тогда как в истинных альгосапропелитах – на конец МК₂¹ (МК₂¹/МК₂²), что свидетельствует о существенно более быстром созревании в катагенезе зоогенного типа ОВ с граптолитовой основой. В исходном ОВ граптолитовых сланцев определенная доля принадлежит альгопланктону, составляющему важную битумоидогенерирующую часть, что определяет их как подкласс альгозоосапропелитов. Чем больше доля фитопланктона в био- и танатоценозах, тем выше нефтематеринский потенциал фоссилизированного ОВ граптолитовых сланцев, т. к. планктонные водоросли обладают наибольшими концентрациями липидно-липоидных компонентов, являющихся основным источником углеводородов ОВ ископаемых осадков [2]. Кроме того, в связи с тем, что для альгосапропелитов максимум генерации битумоидов приходится на середину градации МК₂, примесь фитопланктонной компоненты может быть причиной смещения максимума генерации ХБА в граптолитовом ОВ ниже градации МК₁.

В ряде образцов, в особенности разреза р. Мойеро, общий битуминозный фон повышен, это дает основание предположить, что толща граптолитовых сланцев испытала влияние подтока углеводородных флюидов, единственным и главным источником которых могли выступать углеродистые отложения куонамской свиты ($C_{1-2}kn$). Окончательно вторичная природа битумоида может быть установлена при интерпретации индивидуального состава углеводородов и его генетической корреляции с данными других образцов.

Автор выражает благодарность А. И. Ларичеву, оказавшему поддержку в проведении исследований, Т. К. Баженовой за предоставленный исходный материал и ценные консультации, Г. М. Волковой, Ю. И. Боровихиной и Л. И. Исаковой за помощь в выполнении углепетрографических и аналитических исследований.

1. Баженова Т. К., Шиманский В. К. Исследование онтогенеза углеводородных систем как основа раздельного прогноза нефте- и газоносности осадочных бассейнов [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – Т. 2. – URL: <http://www.ngtp.ru/rub/1/008.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).

2. Баженова Т. К., Шапиро А. И. Алифатические углеводороды синбитумоидов как показатель фациально-генетического типа органического вещества [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – Т. 3. – № 3. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/28_2008.pdf (дата обращения: 10.07.2021).

3. Баженова Т. К. Основы региональной органической геохимии. — М.: ГЕОС, 2020. — 120 с.
 4. Маркова Л. Г., Баженова Т. К., Матухина В. Г. Основные черты геохимии органического вещества в граптолитовых сланцах Норильского района // Геология и геофизика. — 1969. — № 3. — С. 67–75.
 5. Маркова Л. Г. О составе битумоидов ордовикско-силурийских отложений Тунгусской синеклизы // Новые данные по геологии и нефтегазоносности Сибирской платформы. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1973. — С. 96–98. (Тр. СНИИГГиМС; Вып. 167).
 6. Обут А. М. Граптолитовые сланцы силура и связанные с ними нефтепроявления в Средней Азии // Геология и геохимия. — Л., Гостоптехиздат, 1975. — № I (VII). — С. 228–235.
 7. Опорный разрез реки Мойеро силура Сибирской платформы / Ю. И. Тесаков, Н. Н. Предтеченский, А. Я. Бергер [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1985. — 174 с.
 8. Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности / под ред. К. К. Макарова, Т. К. Баженовой. — Л.: Недра, 1981. — 211 с.
 9. Органическая геохимия Тимано-Печорского бассейна / Т. К. Баженова, В. Ф. Васильева, Л. И. Климова [и др.]. — СПб.: ВНИГРИ, 2008. — 164 с.
 10. Ступакова А. В. Поисковые критерии нефти и газа в доманиковых отложениях Волго-Уральского бассейна / А. В. Ступакова, Н. П. Фадеева, Г. А. Калмыков, А. Х. Богомоллов, Т. А. Кирюхина, Н. И. Коробова, Т. А. Шарданова, А. А. Суслова, Р. С. Сауткин, Е. Н. Полудеткина, Е. В. Козлова, Д. В. Митронов, Ф. В. Коркоц // Георесурсы. — 2015. — № 2 (61). — С. 77–86.
 11. Суханов А. А., Баженова Т. К., Котельникова Е. Н. Структурные характеристики углеродного компонента керогена сапропелитов: зависимость от биоэкологического типа исходного органического вещества и степени его катагенеза [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2009. — Т. 4. — № 4. — URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/40_2009.pdf (дата обращения: 25.08.2021).
 12. Henrik I. Petersen, Niels H. Schovsbo, Arne T. Nielsen. Reflectance measurements of zooclasts and solid bitumen in Lower Paleozoic shales, southern Scandinavia: Correlation to vitrinite reflectance // International Journal of Coal Geology. — 2013. — № 114. — Pp. 1–18.
-
1. Bazhenova T. K., Shimanskiy V. K. Issledovanie ontogeneza uglevodorodnykh sistem kak osnova razdel'nogo prognoza nefte- i gazonosnosti osadochnykh basseynov [Study of the ontogenesis of hydrocarbon systems as the basis for a separate forecast of oil and gas content of sedimentary basins]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, vol. 2, available at: <http://www.ngtp.ru/rub/1/008.pdf> (accessed 20 June 2021). (In Russian).
 2. Bazhenova T. K., Shapiro A. I. Aliphatic hydrocarbons of synbitumoids as an index of a facial-genetic type of organic matter. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2008, vol. 3, no. 3, available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/28_2008.pdf (accessed: 10 July 2021). (In Russian).
 3. Bazhenova T. K. Osnovy regional'noy organicheskoy geokhimii [Fundamentals of regional organic geochemistry]. Moscow, 2020, 120 p.
 4. Markova L. G., Bazhenova T. K., Matukhina V. G. Osnovnye cherty geokhimii organicheskogo veshchestva v graptolitovykh slantsakh Noril'skogo rayona [The main features of the geochemistry of organic matter in the graptolite shales of the Norilsk region]. *Geologiya i geofizika*, 1969, no. 3, pp. 67–75. (In Russian).
 5. Markova L. G. O sostave bitumoidov ordoviksko-siluriyskikh otlozheniy Tungusskoy sineklizy [On the composition of bitumoids of the Ordovician-Silurian deposits of the Tunguska syncline]. *Novye dannye po geologii i neftegazonosnosti Sibirskoy platformy*. Novosibirsk, 1973, pp. 96–98. (In Russian).
 6. Obut A. M. Graptolitovye slantsy silura i svyazannye s nimi nefteproyavleniya v Sredney Azii [Silurian graptolite shales and related oil occurrences in Central Asia]. *Geologiya i geokhimiya*. Leningrad, Gostoptekhizdat, 1975, no. I (VII), pp. 228–235. (In Russian).
 7. Tesakov Yu. I., Predtechenskiy N. N., Berger A. Ya. et al. Opornyy razrez reki Moyero silura Sibirskoy platform [Standard section of the Moyero River of the Silurian of the Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 174 p.
 8. Makarov K. K., Bazhenova T. K. (eds.). Organicheskaya geokhimiya paleozoya i dopaleozoya Sibirskoy platformy i prognoz neftegazonosnosti [Organic geochemistry of the Paleozoic and Pre-Paleozoic of the Siberian platform and the forecast of their petroleum potential]. Leningrad, Nedra, 1981, 211 p.
 9. Bazhenova T. K., Vasil'eva V. F., Klimova L. I. et al. Organicheskaya geokhimiya Timano-Pechorskogo basseyna [Organic geochemistry of the Timan-Pechora basin]. St. Petersburg, 2008, 164 p.
 10. Stupakova A. V., Fadeeva N. P., Kalmykov G. A., Bogomolov A. Kh., Kiryukhina T. A., Korobova N. I., Shardanova T. A., Suslova A. A., Sautkin R. S., Poludetkina E. N., Kozlova E. V., Mitronov D. V., Korkots F. V. Criteria for oil and gas search in domanic deposits of the Volga-Ural basin. *Georesursy*, 2015, no. 2 (61), pp. 77–86. (In Russian).
 11. Sukhanov A. A., Bazhenova T. K., Kotelnikova E. N. Structural characteristics of a carbonic component of sapropelite kerogen: dependence on the biocoenosis type of original organic matter and the degree of its catagenesis. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2009, vol. 4, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/40_2009.pdf (accessed 25 August 2021). (In Russian).
 12. Henrik I. Petersen, Niels H. Schovsbo, Arne T. Nielsen. Reflectance measurements of zooclasts and solid bitumen in Lower Paleozoic shales, southern Scandinavia: Correlation to vitrinite reflectance. *International Journal of Coal Geology*, 2013, no. 114, pp. 1–18.

Рясной Андрей Андреевич — инженер, аспирант, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <Andrey_Ryasnoy@vsegei.ru>

Ryasnoy Andrey Andreevitch — Engineer, Post-graduate Student, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <Andrey_Ryasnoy@vsegei.ru>