

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА

УДК 550.4:552.578(571.5-18)

ОРГАНИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ СИНСКОЙ СВИТЫ НИЖНЕГО КЕМБРИЯ
(северный склон Алданской антеклизы)

Т.М. Парфенова^{1,2}, И.В. Коровников^{1,2}, В.Г. Эдер¹, В.Н. Меленевский¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Изучено органическое вещество (ОВ) синской свиты нижнего кембрия юго-востока Сибирской платформы. Коллекция пород разделена на группы по содержанию органического углерода ($C_{\text{орг}}$), битумоида, серы и литологическим характеристикам. Исследовано содержание и распределение насыщенных биомаркеров. В битумоидах обнаружены ланостаны C_{30} , норланостаны C_{29} , 28,30-бисноргопаны, 2 α - и 3 β -метилгопаны. Установлена связь между содержанием $C_{\text{орг}}$ и распределением гопанов, гопановых коэффициентов и 2 α -метилгопанового индекса. Дана оценка условий седиментации, диагенеза, катагенеза ОВ и генерационного потенциала пород. Рекомендовано использовать ланостаны, 28,30-бисноргопаны, метилгопаны в качестве биомаркеров нефтепроизводящих пород синской свиты для определения источника нефтей на северном склоне Алданской антеклизы Сибирской платформы.

Органическая геохимия, битумоиды, биомаркеры, нефтепроизводящие породы, нижний кембрий, Сибирская платформа.

ORGANIC GEOCHEMISTRY OF THE LOWER CAMBRIAN SINYAYA FORMATION
(northern slope of the Aldan antecline)

T.M. Parfenova, I.V. Korovnikov, V.G. Eder, and V.N. Melenevskii

We investigated organic matter (OM) of the Lower Cambrian Sinyaya Formation in the southeast of the Siberian Platform. The studied collection of rocks was divided into groups according to the contents of organic carbon, bitumens, and sulfur and lithologic characteristics. The content and distribution of saturated biomarkers were examined. Lanostanes C_{30} , norlanostanes C_{29} , 28,30-bisnorhopanes, and 2 α - and 3 β -methylhopanes have been identified in the bitumens. Relationships between the content of organic carbon and the distribution of hopanes, hopane ratios, and 2 α -methylhopane index have been established. The conditions of sedimentation, diagenesis, and catagenesis of OM and the generation potential of the rocks have been estimated. It is shown that lanostanes, 28,30-bisnorhopanes, and methylhopanes can be used as biomarkers of the source rocks of the Sinyaya Formation and thus can help to determine the source of bitumens on the northern slope of the Aldan antecline of the Siberian Platform.

Organic geochemistry, bitumens, biomarkers, source rocks, Lower Cambrian, Siberian Platform

ВВЕДЕНИЕ

Обогащенные органическим веществом (ОВ) карбонатные осадки накапливались в нижнем кембрии на северном склоне Алданской антеклизы. Они сформировали породы синской свиты. Разрезы этой толщи изучались геологами по берегам рек Синяя (левый приток Лены), Лена, Ботома на юго-востоке Сибирской платформы. Синская свита распространена в Синско-Ботомской фациальной области Анабаро-Синского фациального региона [Зеленов, 1957; Савицкий и др., 1972; Конторович, 1976; Геология..., 1981; Решения..., 1983; Бахтуров и др., 1988].

Долгое время информация о геохимии ОВ синской свиты нижнего кембрия была основана на анализе единичных образцов. В публикациях представлены сведения о содержании ОВ и битумоидов в породах [Зеленов, 1957], результаты исследования порфиринов, элементного и группового состава би-

тумоидов [Савицкий и др., 1972; Конторович, 1976; Геология..., 1981], свойств керогена [Богородская и др., 2005]. Породы синской свиты являются фаціальным аналогом куонамской, иниканской, шумнинской свит нижнего и среднего кембрия. Их рассматривают как потенциально нефтегазопроизводящие, а также в качестве углеводородного и минерального сырья на востоке Сибирской платформы [Зеленов, 1957; Савицкий и др., 1972; Конторович, 1976; Геология..., 1981; Гурари и др., 1984; Каширцев, 2003]. В последние годы начато исследование геохимии биомаркеров синской свиты [Парфенова и др., 2010; Парфенова, 2011а, б].

Настоящая работа направлена на комплексное изучение органической геохимии синской свиты. Цель исследования — выявить закономерности формирования аномально обогащенных ОВ пород нижнего кембрия на юго-востоке Сибирской платформы, уточнить сведения о разнообразии и биохимических особенностях биоты, послужившей источником ОВ, об условиях накопления ОВ, преобразования его в диагенезе, о катагенезе ОВ и генерационных свойствах пород.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Коллекция образцов карбонатных пород нижнего кембрия была собрана в 2004 г. на правом берегу р. Синяя (рис. 1). Изучено 34 пробы: две из переходной, 31 из синской и одна из куторгиновой свит. Породы дробили до 0.25 мм. Методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Комплекс СРМ-25 — Электроника-60» определяли содержание породообразующих оксидов. Общее содержание железа, серы ($S_{\text{общ}}$) и их форм, вклад CO_2 анализировали химическим методом. Содержание в породах глинистых и карбонатных минералов (кальцита, доломита), аутигенного кремнезема оценено методом нормативного пересчета. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в породах определяли на экспресс-анализаторе АН-7529 методом сжигания в кислороде предварительно декарбонатизированных 10 %-й соляной кислотой проб нерастворимых остатков (НО). Пиролиз пород (23 образца) проводили на приборе SR Analyzer—POPI (Pyrolytic Oil Productivity Index). Определяли «битумоидную» (S_1 , %) и «керогеновую» (S_2 , %) составляющие ОВ, индекс продуктивности ($PI = S_1/(S_1+S_2)$), водородный индекс (HI, мг УВ/г $C_{\text{орг}}$), температуру максимального выхода УВ (T_{max} , °С). Битумоид экстрагировали из 50-граммовых навесок (31 образец) хлороформом при комнатной температуре с применением центрифуги. После очистки экстракта ртутью от элементарной серы петролевым эфиром из битумоида выделяли асфальтены. Далее мальтены делили на фракции насыщенных углеводородов (УВ), ароматических соединений и смол (26 образцов). Насыщенные УВ изучали на хроматографе 5890 series II Gas Chromatograph с использованием капиллярной медной колонки с фазой апиезон-L при начальной температуре анализа 60 °С и конечной 280 °С. На хромато-масс-спектрометрической системе Agilent 5973N (газовый хроматограф 6890 с высокоэффективным масс-селективным детектором и компьютерной системой регистрации) при температуре 100-320 °С изучали УВ (26 образцов), из них в режиме сканирования по общему ионному току 23 образца. Хроматограф снабжен кварцевой капиллярной колонкой длиной 30 м, диаметром 0.25 мм с импрегнированной фазой HP-5MS. Скорость потока газа-носителя гелия 1 мл/мин. Идентификация УВ осуществлялась по времени удерживания путем сравнения с уже известными соединениями, а также с опубликованными данными. Измерения изотопного состава углерода бескарбонатного вещества 14 проб НО выполняли на масс-спектрометре MI 1201В относительным методом, который заключается в попеременном измерении ионных токов двух масс m/z 44, m/z 45 образца и стандарта, представляющих собой газ (CO_2).

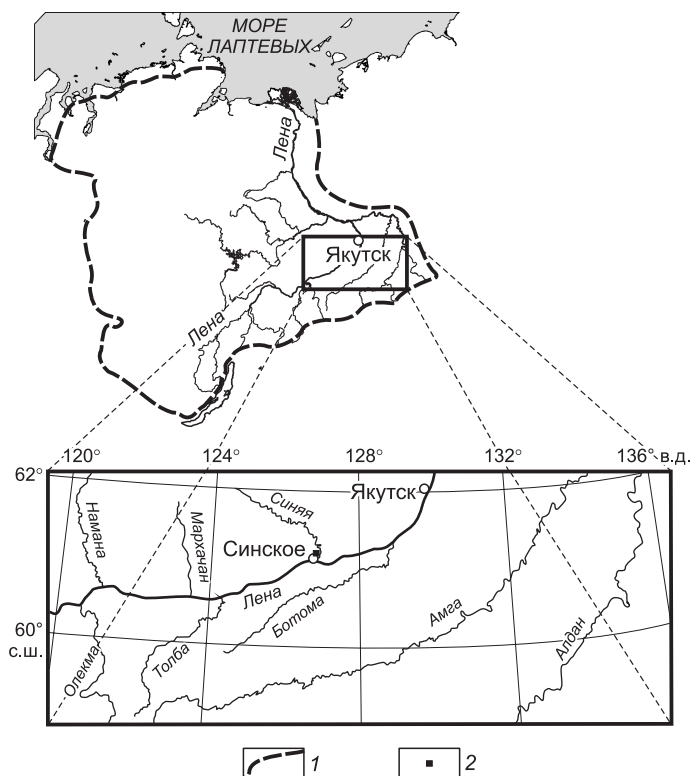


Рис. 1. Схема отбора образцов.

Рис. 1. Схема отбора образцов.

1 — границы Сибирской платформы, 2 — место отбора образцов.

СТРОЕНИЕ РАЗРЕЗА

Строение разреза синской свиты представлено в монографиях [Зеленов, 1957; Бахтуров и др., 1988; и др.]. Полевые и лабораторные исследования авторов последних лет позволили дополнить сведения о составе и структуре нижнекембрийских отложений. Изученный разрез расположен на правом берегу р. Синяя в 6 км от устья (координаты: 61°10'437" с.ш., 126°52'640" в.д.). Синская свита согласно залегает на светло-коричневых массивных и трещиноватых доломитистых известняках переходной свиты с содержанием $C_{\text{орг}}$ на уровне 0.1 % (рис. 2). В ней выделено три пачки. Описание отложений выполнено снизу вверх. Оценки мощностей пачек показаны (см. рис. 2) по наблюдениям авторов и опубликованным материалам.

Пачка I. Чередование тонкослоистых черных, темно-коричневых известняков, часто доломитистых, со светло-коричневыми, массивными, крупноплитчатыми известняками и доломитами. В нижней и средней частях пачки мощность слоев сланцеватых пород изменяется от 0.05 до 0.20 м и достигает 0.40 м. В верхней ее части наблюдается частое переслаивание тонкослоистых (0.01—0.05 м) и массивных известняков с вертикальными трещинами и биокластическим материалом. В минеральном составе пород преобладает кальцит (обычно более 80 %). Содержание доломита, как правило, менее 5—10 %, редко достигает 30.52 % (обр. 3) и 54.54 % (обр. 6). Количество аутигенного кремнезема изменяется от 0 до 4.7 %. В образцах 9 и 13 его содержание составляет 6.07 и 9.75 % соответственно. Содержание $C_{\text{орг}}$ в породах изменяется от 0.22 до 6.84 %. Поверхности напластования ровные. Мощность пачки 8 м.

Пачка II. Коричневые массивные известняки, часто доломитовые или доломитистые с пятнистой текстурой, залегают в виде линз и караваев неправильной формы. Их облекают тонкие, до 0.01—0.05 м, тонкослоистые доломитовые и кремнисто-доломитовые темно-коричневые известняки. Основным минералом в породах является кальцит. Его содержание повышается до 90.93 % (обр. 14). В верхней части пачки (обр. 17) фиксируется максимальное количество доломита (26.58 %) и аутигенного кремнезема (6.38 %). Содержание $C_{\text{орг}}$ в породах изменяется от 0.65 до 5.06 %. Поверхности слоев неровные, волнистые. Мощность пачки 5.5 м.

Пачка III. В нижней части пачки наблюдается частое переслаивание тонкослоистых темно-коричневых доломитистых известняков с крупноплитчатыми коричневыми и светло-коричневыми массивными известняками. Мощности прослоев варьируют от 0.01—0.05 до 0.2—0.4 м. В верхней части пачка сложена массивными доломитистыми известняками волнисто-слоистыми, на которых залегает прослой сланцеватых темно-коричневых и черных доломитистых известняков мощностью 1.5 м. Выше наблюдаются в основном крупноплитчатые доломитистые коричневые известняки с вертикальными трещинами и тонкими прослоями сланцеватых пород. Кальцит в породах обычно преобладает (более 75—80 %). Содержание доломита, как правило, менее 10 %. В нижней части пачки оно составляет 90.05 % (обр. 21). Количество аутигенного кремнезема изменяется от 0 до 2.22 %. Содержание $C_{\text{орг}}$ в породах пачки варьирует от 0.18 до 7.03 %. Поверхности наслоения обычно ровные, в средней части пачки волнистые. Мощность 14.5 м.

Содержание Al_2O_3 в породах синской свиты изменяется от 0 до 0.99 %. Это указывает, что глинистые минералы в известняках, доломитах и кремнистых карбонатных породах, как правило, отсутствуют, редко находятся в следовых количествах и не имеют породообразующего значения. При ударе карбонатные породы пахнут бензином. Общая мощность синских отложений в изученном разрезе 28 м. Породы синской свиты согласно перекрываются светло-коричневыми массивными доломитистыми известняками куторгиновой свиты. Содержание $C_{\text{орг}}$ в них составляет 0.18 %. В породах встречены спикеры губок, отпечатки и осколки трилобитов и брахиопод ботомского яруса нижнего кембрия. Биостратиграфическое расчленение отложений проведено на основе распределения трилобитов. При проведении зональных границ использована стратиграфическая схема [Решения..., 1983].

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Анализ содержания $C_{\text{орг}}$, HO , $S_{\text{общ}}$, битумоида в породах, пиролитических и литологических характеристик пород позволил разделить коллекцию образцов на две группы (табл. 1).

Углеродистые породы — это, как правило, тонкослоистые коричневые или темно-серые, иногда черные известняки, доломитистые, доломитовые, кремнисто-доломитовые и кремнистые известняки, редко крупноплитчатые доломитистые и доломитовые известняки, обогащенные $C_{\text{орг}}$ больше 1.0 %. В этих породах содержание HO составляет 4.8—23.0 %, $S_{\text{общ}}$ 0.08—0.52 %, битумоида 0.07—0.38 %. Среднее значение битумоидного коэффициента (β) равно 5.2 %. Битумоиды содержат 1.1—7.6 % насыщенных УВ, 4.6—15.4 % ароматических соединений. Основную их часть (более 80 %) составляют смолы и асфальтеновые компоненты (см. табл. 1).

Пиролиз показал, что S_1 углеродистых пород обычно варьирует от 0.01 до 0.04 % (см. табл. 1). Оценки S_2 этих пород лежат в интервале 0.85—4.28 %. Значения PI , как правило, не превышают 0.03,

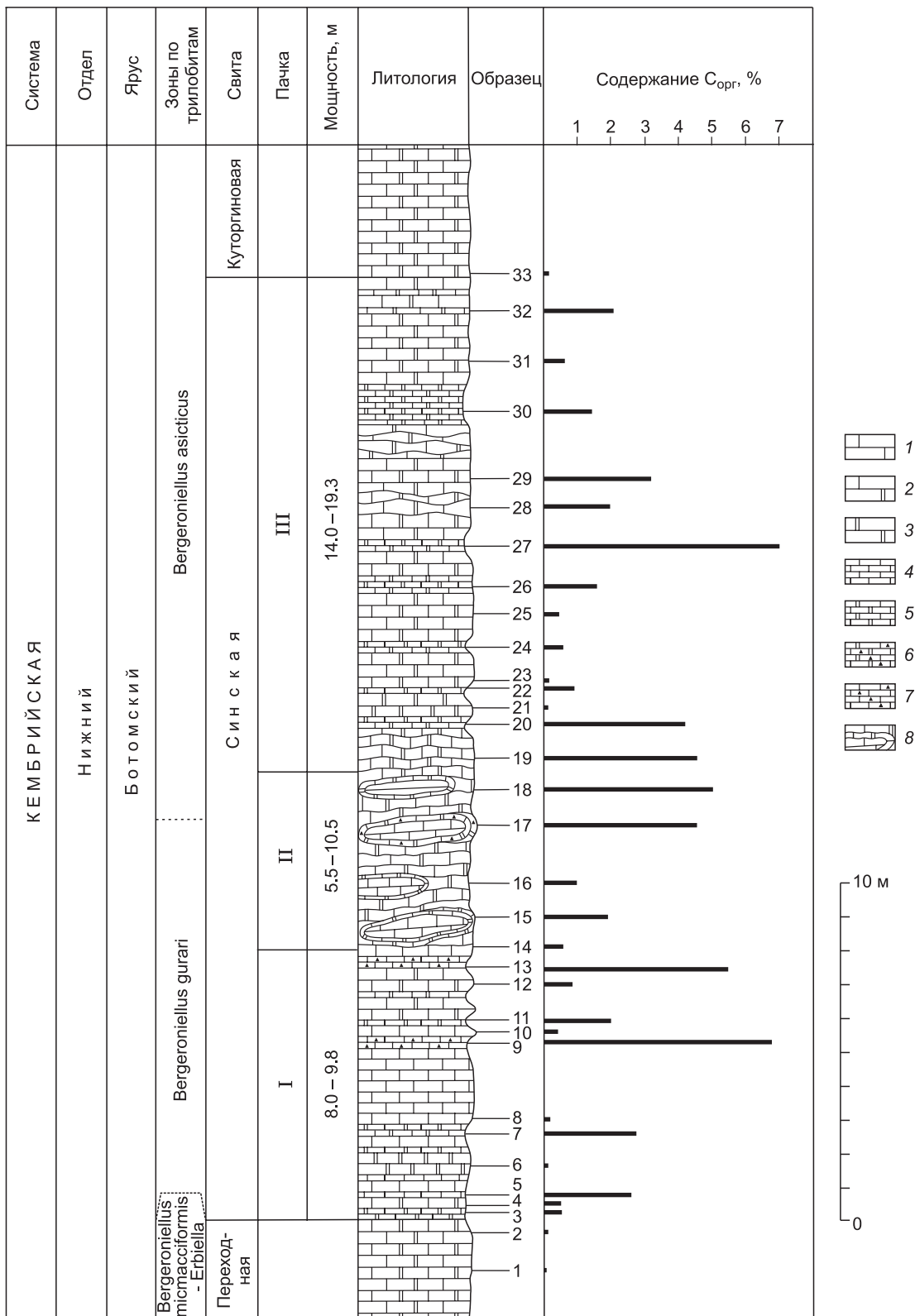


Рис. 2. Распределение органического углерода в породах нижнего кембрия (р. Синяя, юго-восток Сибирской платформы).

1 — известняк крупноплитчатый; 2 — известняк доломитистый и доломитовый крупноплитчатый; 3 — доломит известковистый и известковый; 4 — известняк тонкослоистый; 5 — известняк доломитистый и доломитовый тонкослоистый; 6 — известняк кремнисто-доломитовый тонкослоистый; 7 — известняк кремнистый тонкослоистый; 8 — известняк доломитистый и доломитовый, волнисто-слоистый или залегающий в виде линзовидных и караваяобразных тел, окаймленных тонкослоистыми породами.

Таблица 1.

Характеристика пород и ОБ синской свиты

Геохимический параметр		Породы		
		углеродистые	низкоуглеродистые	
НО, %		$\frac{4.8-23.0}{10.9}$	$\frac{1.1-8.6}{3.4}$	
C _{орг} , %		$\frac{1.4-7.0}{3.5}$	$\frac{0.1-1.0}{0.5}$	
S _{общ.} , %		$\frac{0.08-0.52}{0.29}$	$\frac{0.02-0.12}{0.07}$	
Выход битумоида, %		$\frac{0.07-0.38}{0.22}$	$\frac{0.01-0.11}{0.05}$	
β, %		$\frac{1.4-9.8}{5.2}$	$\frac{1.6-10.1(13.6-26.2)*}{6.2}$	
Пиролиз	S ₁ , %	$\frac{0.01-0.04(0.09)*}{0.03}$	$\frac{0.01-0.01}{0.01}$	
	S ₂ , %	$\frac{0.85-4.28}{2.07}$	$\frac{0.03-0.59}{0.24}$	
	PI	$\frac{0.01-0.03(0.09)*}{0.01}$	$\frac{0.01-0.05(0.13-0.14)*}{0.02}$	
	HI, мг УВ/г C _{орг}	$\frac{411-704(367)*}{562}$	$\frac{202-436}{323}$	
	T _{max} , °C	$\frac{433-438}{435}$	$\frac{434-440}{437}$	
Групповой состав битумоидов	УВ	насыщенные	$\frac{1.1-7.6}{3.4}$	$\frac{2.3-11.7}{4.7}$
		ароматические	$\frac{4.6-15.4}{7.5}$	$\frac{2.6-11.8}{7.2}$
	Смолы		$\frac{51.3-74.9}{62.1}$	$\frac{45.0-67.0}{56.5}$
	Асфальтеновые компоненты		$\frac{16.5-39.6}{26.9}$	$\frac{11.5-47.5}{31.5}$

Примечание. Здесь и далее: над чертой — разброс значений, под чертой — среднее.

* Аномальные значения не учитывались при расчете средних.

редко повышаются до 0.09. Водородный индекс (HI) обычно изменяется от 411 до 704 мг УВ/г C_{орг}, T_{max} — от 433 до 438 °C (рис. 3, см. табл. 1).

Низкоуглеродистые породы — это крупноплитчатые, массивные светло-серые и светло-коричневые известняки, доломитистые и доломитовые известняки, доломиты. В них содержание C_{орг} меньше или равно 1.0 %, НО меньше 10.0 %, S_{общ.} как правило, меньше 0.1 % (см. табл. 1). В этих породах часто наблюдаются вертикальные трещины. Низкоуглеродистые породы по сравнению с углеродистыми обеднены битумоидом. Его содержание изменяется от 0.01 до 0.11 %. Значения β варьируют в пределах 1.6—10.1 %, иногда достигают 26.2 %. По групповому составу битумоиды не отличаются от битумоидов углеродистых пород (см. табл. 1).

По данным пиролиза S₁ низкоуглеродистых пород не превышает 0.01 %, S₂ — 0.59 % (см. табл. 1). В среднем PI равен 0.02, редко повышается до 0.14. Для этих пород выявлена прямая связь между PI и β. Значения HI лежат в интервале 202-436 мг УВ/г C_{орг} (см. табл. 1, рис. 3). Температуры максимального выхода УВ близки значениям T_{max} углеродистых пород (средняя составляет 437 °C).

Рассмотрим состав, содержание и распределение УВ в битумоидах углеродистых и низкоуглеродистых пород.

Алканы. На ГЖ-хроматограммах насыщенных фракций УВ можно видеть алканы нормального (n-) и изостроения (рис. 4). Среди n-алканов в максимальных содержаниях в пробах углеродистых и низкоуглеродистых пород обычно присутствуют n-C₁₆₋₁₉. Иногда во фракциях низкоуглеродистых пород доминируют n-C₂₅₋₃₀ (см. рис. 4, з). Пристан (Pr) и фитан (Ph) имеют максимальные содержания в изопреноидах. Отношения алканов ОБ двух групп пород характеризуются близкими значениями (табл. 2). Соотношения Pr/Ph, Pr/n-C₁₇, Ph/n-C₁₈ обычно ниже 1. Коэффициент n-C₂₇/n-C₁₇, как правило,

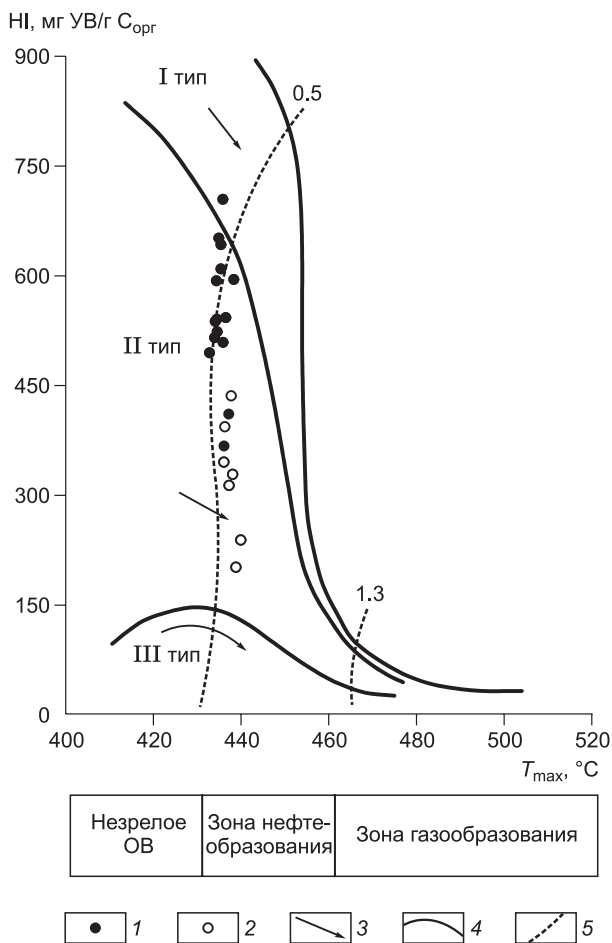


Рис. 3. Диаграмма HI— T_{max} для пород синской свиты (р. Синяя).

1, 2 — породы: 1 — углеродистые, 2 — низкоуглеродистые; 3 — направленность изменения величин HI и T_{max} в катагенезе; 4 — линии, ограничивающие максимальные значения водородного индекса (HI) для трех типов органического вещества (I — аквагенного, озерного; II — аквагенного, морского; III — террагенного, связанного с высшей наземной растительностью); 5 — изолинии отражательной способности витринита, %.

не превышает 1, редко повышается до 1.82 в пробах низкоуглеродистых пород. Значения коэффициента нечетности (CPI — **carbon preference index**) в основном сохраняются на уровне 1 (см. табл. 2). Следует отметить, что во всех образцах насыщенных фракций битумоидов двух групп пород на хроматограммах (см. рис. 4) в высокомолекулярной области ($n-C_{25+}$) присутствуют пики гопанов и гомогопанов, реже стеранов. В насыщенных фракциях углеродистых пород высоты пиков этих УВ обычно превышают алканы $n-C_{21-27}$, а иногда и $n-C_{16-20}$ (см. рис. 4, а, б).

Стераны и ланостаны. На масс-хроматограммах по m/z 217 определены регулярные стераны ($\alpha\alpha$ и $\beta\beta$) и диастераны ($\beta\alpha$) $C_{27}-C_{30}$ (рис. 5, а). Содержание гомологов стеранов $C_{27}-C_{30}$ ОВ двух групп пород имеют близкие значения. В углеродистых породах средние содержания этих УВ соотносятся $C_{27}:C_{28}:C_{29}:C_{30}$ как 32:10:55:2, в низкоуглеродистых — 33:10:56:2. Независимо от содержания $C_{орг}$ в породах отношение стеранов C_{29}/C_{27} превышает 1 (см. табл. 2). Распределение стеранов, в ко-

тором в максимальных содержаниях присутствует этилхолестан C_{29} (см. рис. 5, а), характерно и для ОВ углеродистых пород куонамской свиты, распространенной на северо-востоке Сибирской платформы [Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2004, 2011].

Отношение изомеров $20S/(20S+20R)$ этилхолестана равно 0.5 (см. табл. 2). Отношение диастеранов к регулярным стеранам ($\beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$) лежит в интервале 0.1-0.3. Средние значения этого коэффициента в двух группах пород не превышают 0.2. Коэффициент $\beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ для ОВ куонамской свиты обычно больше 0.3, иногда превышает 0.5 [Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2004, 2011]. Среди стеранов определены прегнаны — C_{21} , C_{22} (см. рис. 5, а, в). В углеродистых породах отношение стераны/прегнаны изменяется от 7.67 до 29.35, в низкоуглеродистых наблюдаются редкие повышения этого коэффициента до 59.93 (см. табл. 2). В ОВ синской свиты в отличие от ОВ куонамских отложений закономерного увеличения содержания прегнанов с повышением концентраций $C_{орг}$ в породах не наблюдается, коэффициент стераны/прегнаны имеет повышенные значения.

На хроматограммах по m/z 259 были обнаружены изомеры ланостана C_{30} (см. рис. 5, в), по m/z 245 — норланостана C_{29} (см. рис. 5, б). Анализ спектров и геохимия гомологов ланостана битумоидов синской свиты представлены в работах [Парфенова, 2011а,б].

Терпаны. На хроматограммах по m/z 191 идентифицированы трициклановые, тетрациклановые, гопановые и моретановые УВ. Коэффициент (стераны+прегнаны)/терпаны имеет близкие значения для углеродистых и низкоуглеродистых пород. Средние его оценки равны 0.2 (см. табл. 2).

Трицикланы. Эти УВ среди терпанов в ОВ двух групп пород синской свиты содержатся в близких количествах. В ОВ углеродистых пород трицикланы составляют от 4 до 13 % (среднее = 7 %), в ОВ низкоуглеродистых 4—16 % (среднее = 8 %) (рис. 6, а). В составе изученных битумоидов определены трицикланы $C_{19}-C_{31}$. Значения трицикланового индекса $2 \cdot \sum(C_{19-20})/\sum(C_{23-26})$ [Конторович и др., 1999] не превышают 1 (см. табл. 2).

Тетрацикланы. Содержание тетрацикланов на сумму терпанов составляет 1—2 % в битумоидах двух групп пород. В ряду тетрацикланов $C_{24}-C_{27}$ в максимальных концентрациях (80—95 %) присутствует C_{24} . На хроматограммах высота его пика сопоставима с высотой пика трициклана C_{23} (см. рис. 6, а) или превышает его.

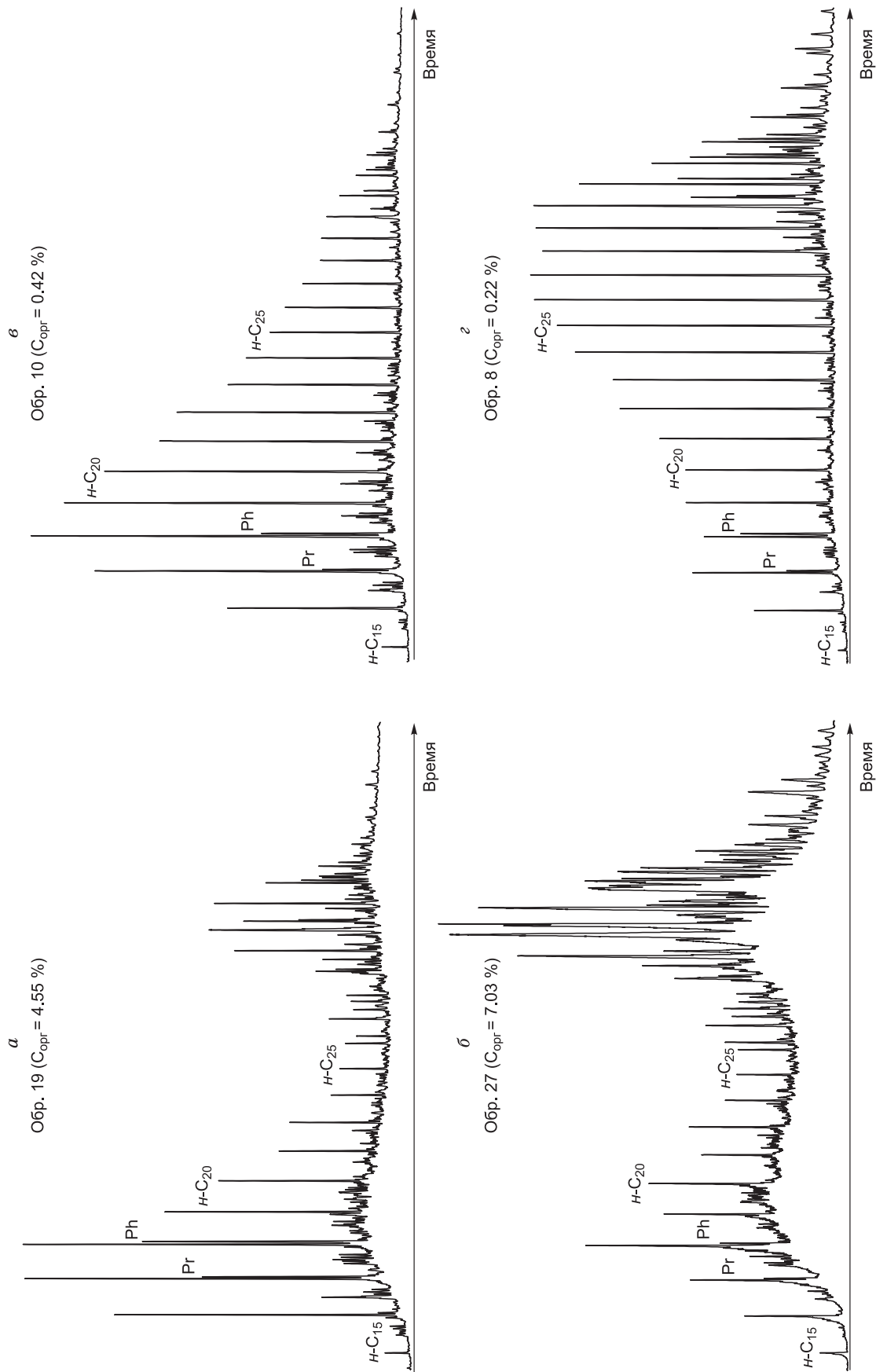


Рис. 4. Хроматограммы УВ насыщенных фракций битуменов синской свиты.

a–г — описание см. в тексте. Pr — пристан, Ph — фитан, *n*-C_{*n*} — алкан нормального строения, где *n* — количество углерода в цепи молекулы.

Таблица 2. Соотношения алкановых, стерановых и терпановых УВ битумоидов синской свиты

Отношение биомаркеров		Породы	
		углеродистые	низкоуглеродистые
$C_{орг}, \%$		$\frac{1.4-7.0}{3.5}$	$\frac{0.1-1.0}{0.5}$
Алканы	Pr/Ph	$\frac{0.41-1.21}{0.77}$	$\frac{0.28-1.14}{0.73}$
	Pr/n-C ₁₇	$\frac{0.24-0.79}{0.43}$	$\frac{0.26-0.50}{0.34}$
	Ph/n-C ₁₈	$\frac{0.28-0.95}{0.52}$	$\frac{0.33-0.72}{0.43}$
	n-C ₂₇ /n-C ₁₇	$\frac{0.12-1.11}{0.45}$	$\frac{0.18-1.82}{0.95}$
	CPI	$\frac{0.87-1.50}{1.09}$	$\frac{0.97-1.18}{1.05}$
Стераны	C ₂₉ /C ₂₇	$\frac{1.33-2.46}{1.74}$	$\frac{1.32-2.11}{1.71}$
	C ₂₉ 20S/(20S+20R)	$\frac{0.46-0.54}{0.51}$	$\frac{0.48-0.51}{0.50}$
	Диастераны/регулярные стераны	$\frac{0.11-0.27}{0.18}$	$\frac{0.09-0.26}{0.19}$
	Стераны/прегнаны	$\frac{7.67-29.35}{18.27}$	$\frac{10.03-59.93}{29.02}$
	Трицикланы	$\frac{0.42-0.98}{0.64}$	$\frac{0.18-0.92}{0.62}$
Гопаны, гомогопаны	C ₂₇ /C ₃₀	$\frac{0.56-1.22}{0.79}$	$\frac{0.52-0.75}{0.62}$
	C ₂₈ /C ₃₀	$\frac{0.34-0.65}{0.53}$	$\frac{0.25-0.76}{0.47}$
	C ₃₀ /C ₃₁	$\frac{0.97-1.29}{1.16}$	$\frac{0.78-1.16}{0.97}$
	Ts/Tm	$\frac{0.10-0.59}{0.34}$	$\frac{0.10-0.40}{0.32}$
	C ₃₅ /C ₃₄	$\frac{0.81-1.55}{1.15}$	$\frac{0.81-1.56}{1.10}$
	$2 \cdot \Sigma(C_{27-30})/\Sigma(C_{31-35})$	$\frac{1.46-2.31}{1.80}$	$\frac{1.06-1.53}{1.27}$
Трицикланы/(гопаны + гомогопаны)		$\frac{0.04-0.21}{0.09}$	$\frac{0.04-0.16}{0.08}$
2 α -метилгопановый индекс		$\frac{5.1-25.6}{11.6}$	$\frac{5.1-14.1}{8.1}$
(Стераны + прегнаны)/терпаны		$\frac{0.11-0.30}{0.20}$	$\frac{0.12-0.35}{0.18}$

Гопаны. Идентифицированы гомологи гопана C₂₇-C₃₅ (см. рис. 6, а). Суммарное содержание гопанов и гомогопанов углеродистых пород изменяется от 78 до 90 % (среднее = 86 %), низкоуглеродистых — от 81 до 92 % (среднее = 88 %). На хроматограммах по *m/z* 191 кроме гопана C₃₀, норгопанов (C₂₇, C₂₉) и гомогопанов (C₃₁-C₃₅) диагностирован 28,30-бисноргопан C₂₈ (см. рис. 6) [Парфенова и др., 2010]. В 10 образцах на хроматограммах по *m/z* 355 (см. рис. 6, б) идентифицированы его гомологи C₂₉₋₃₃. В остальных пробах они присутствуют в следовых количествах или не наблюдаются. Только в обр. 30 установлено отсутствие 28,30-бисноргопана C₂₈ и определен 29,30-бисноргопан C₂₈ по известным характеристикам [Peters, Moldowan, 1993].

В углеродистых породах средние содержания гомологов гопана соотносятся C₂₇:C₂₈:C₂₉:C₃₀:C₃₁:C₃₂:C₃₃:C₃₄:C₃₅ как 16:11:17:20:17:10:4:2:3, в низкоуглеродистых — 12:9:15:19:20:12:5:3:3. Видно, что в распределениях гомологов наблюдаются отличия. Изменение гопановых коэффициентов подтверждает это (см. рис. 7, табл. 2). Для ОВ углеродистых пород характерно присутствие гопана C₃₀ в максимальных концентрациях. Отношение C₃₀/C₃₁ для этой группы пород обычно больше 1. Среди гомологов гопана

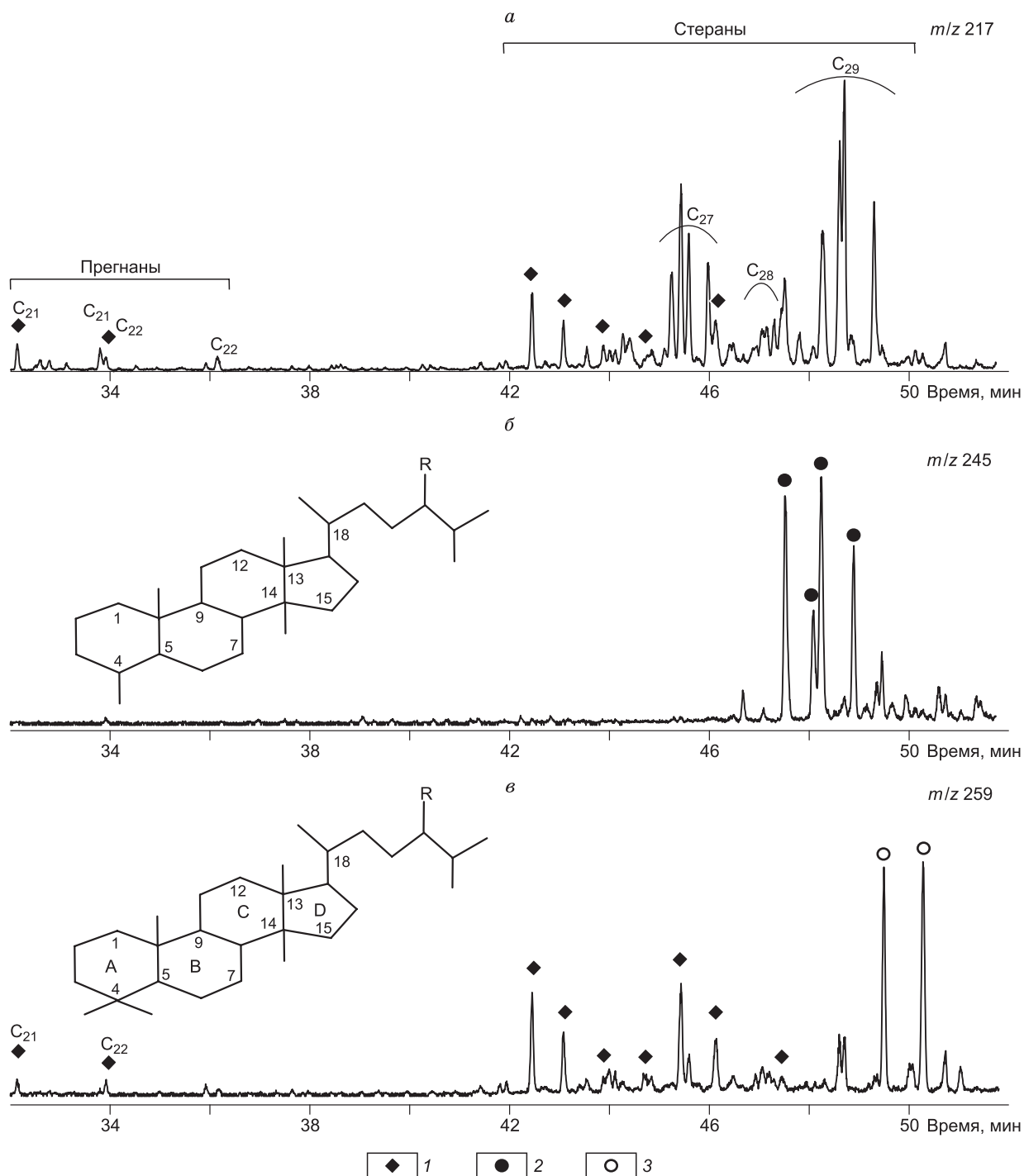


Рис. 5. Масс-хроматограммы по m/z 217, 245, 259 УВ синской свиты.

a — диастераны (1) и регулярные стераны; *б* — норланостаны (2); *в* — ланостаны (3). R = H, CH₃, C₂H₅, C_{*n*} — стеран, где *n* — количество атомов углерода в структуре молекулы.

низкоуглеродистых пород, как правило, преобладает гомогопан C₃₁, коэффициент C₃₀/C₃₁ обычно меньше 1, редко повышается до 1.16 (см. табл. 2, рис. 7, *a*). С увеличением содержания C_{орг} в породах значения параметра C₃₀/C₃₁ закономерно повышаются (см. рис. 7, *a*). Коэффициент корреляции (*R*) этой зависимости равен 0.59. Для ОВ синской свиты характерно увеличение содержания трисноргопанов C₂₇ и норгопанов C₂₉ по мере обогащения пород C_{орг}. Установлена прямая зависимость отношения C₂₇/C₃₀ от содержания C_{орг} в породах (см. рис. 7, *б*), *R* = 0.80. Соотношение геологического триснорнеогопана и биологического трисноргопана (Ts/Tm) обычно изменяется от 0.10 до 0.40 (см. табл. 2, рис. 6, *a*). Со-

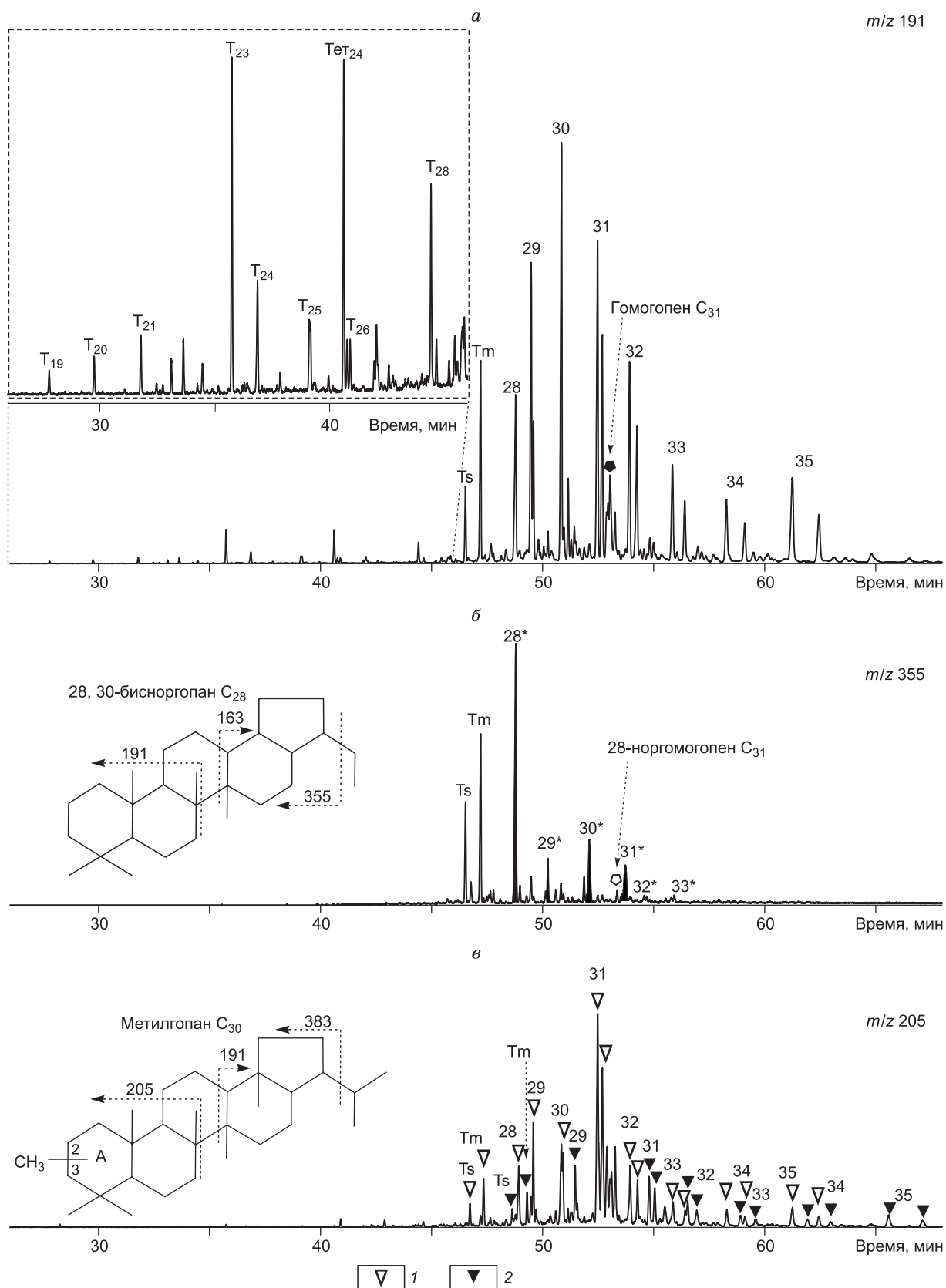


Рис. 6. Типовые масс-хроматограммы по m/z 191, 355, 205 УВ синской свиты (на примере обр. 8).
 а — трицикланы (T_{19-28}), тетрацикланы (Tet_{24}), гоноаны (28—35 — количество атомов углерода в структуре УВ); б — 28,30-норгоноаны (28*—33* — количество атомов углерода в структуре УВ); в — метилгоноаны (1 — 2 α -метилгоноаны, 2 — 3 β -метилгоноаны).

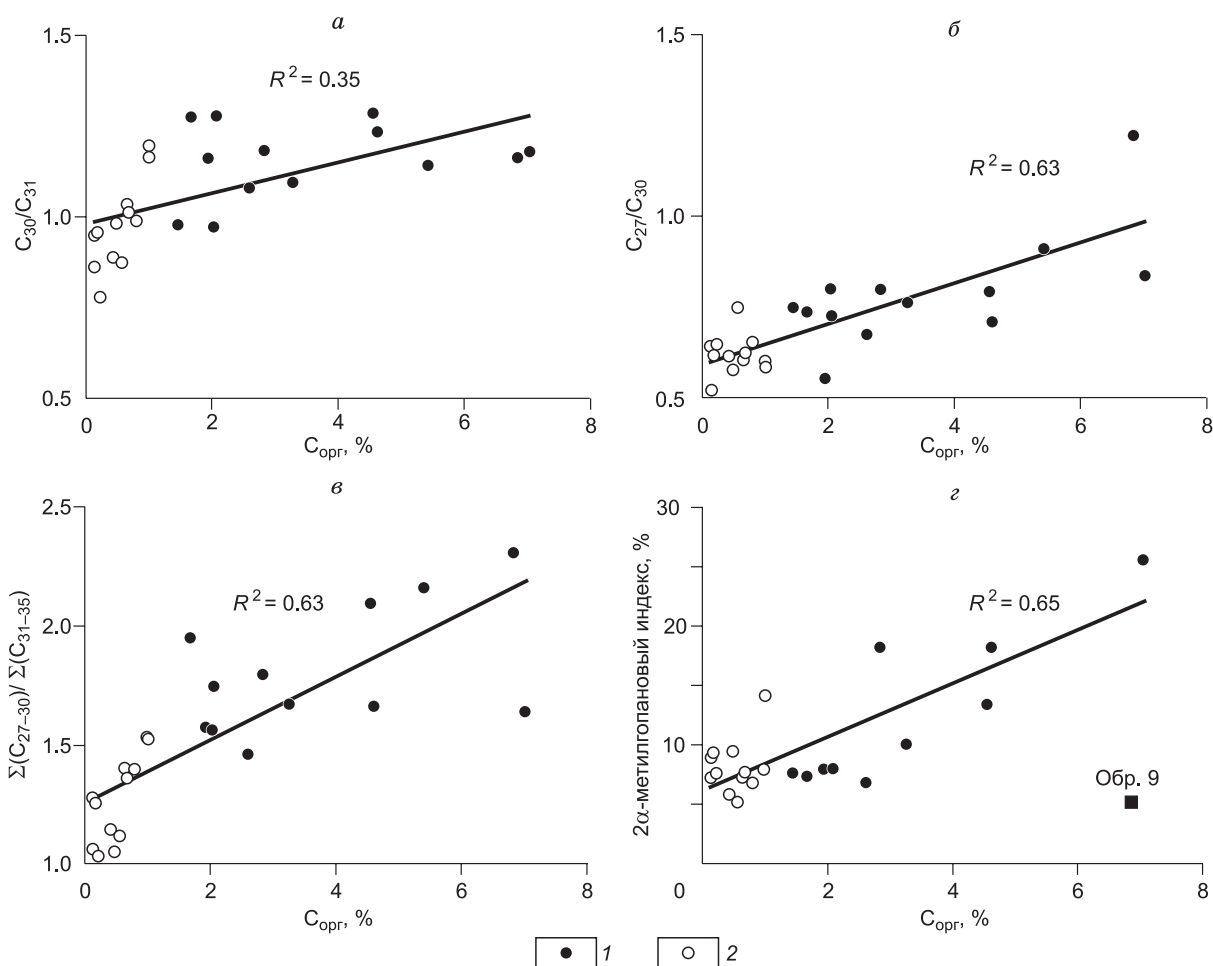


Рис. 7. Диаграммы, показывающие связь между гопановыми отношениями и содержанием органического углерода в породах синьской свиты.

a–г — описание см. в тексте. 1, 2 — породы: 1 — углеродистые, 2 — низкоуглеродистые. R^2 рассчитан без учета обр. 9.

держания гопанов C_{27} и C_{29} превышают концентрации 28,30-бисноргопана (см. рис. 6, *a*) в ОВ двух групп пород. Отношение C_{28}/C_{30} в основном сохраняется на уровне 0.5 (см. табл. 2). Содержание гомогопанов $\Sigma(C_{31-35})$ с увеличением в породах $C_{орг}$ уменьшается. Повышение значений отношения $\Sigma(C_{27-30})/\Sigma(C_{31-35})$ с ростом содержания $C_{орг}$ в породах подтверждает эту закономерность, $R = 0.79$ (см. рис. 7, *в*). В распределении гомогопанов, как правило, C_{35} преобладает над C_{34} (см. рис. 6, табл. 2), только в четырех образцах $C_{35}/C_{34} < 1$. Отношение трицикланы/(гопаны+гомогопаны) обычно не превышает 0.1 (см. табл. 2). Оценки этого параметра битумоидов куонамской свиты часто в 10 раз выше [Парфенова и др., 2004, 2011].

Моретаны. Содержание этих УВ среди терпанов углеродистых пород изменяется от 3 до 7 % (среднее = 4 %, низкоуглеродистых — от 3 до 6 % (среднее = 4 %)). Отношение **S** и **R** изомеров моретана C_{32} варьирует от 0.87 до 1.83 в пробах двух групп, средние значения равны 1.0.

На хроматограммах по m/z 191 между пиками гомогопанов C_{31} и C_{32} видны три (см. рис. 6, *a*), иногда один-два широких пика углеводородов. Изучение масс-спектра УВ, отмеченного на рис. 6, *a*, показало, что он характеризуется массой M , равной 424, фрагмент-ионами m/z 203 и m/z 409. Таким образом, во всех пробах коллекции был обнаружен гомогопен с неопредельной связью между 22 и 30 атомами углерода в молекуле [Парфенова и др., 2010]. В единичных образцах на хроматограммах по m/z 355 идентифицирован 28-норгомогопен C_{31} с неопредельной связью между 30 и 31 атомами углерода (см. рис. 6, *б*).

Гаммацеран определен на хроматограммах по m/z 191 УВ двух групп. Его содержание в терпанах составляет меньше 1 %.

В насыщенных УВ синьской свиты на хроматограммах по m/z 205 видны высокие пики УВ (см. рис. 6, *в*). Анализ спектров этих УВ показал, что основным фрагмент-ионом для них является m/z 205,

M и $[M - \text{CH}_3]^+$ на 14 единиц превышают соответствующие параметры гопанов. Наблюдается повышенная интенсивность фрагмент-ионов m/z 95 и m/z 137. Такие характеристики спектров доказывают наличие метильного заместителя ($-\text{CH}_3$) в кольце А циклической структуры УВ (см. рис. 6, в). Анализ распада молекул и сравнение распределений метилгопанов на хроматограммах с опубликованными материалами [Summons, Jahnke, 1990; Peters, Moldowan, 1993; Farrimond et al., 2004] указывают, что в УВ битумоидов синской свиты присутствуют гомологические ряды 2 α -метилгопана и 3 β -метилгопана. Для количественной оценки рассчитан 2-метилгопановый индекс (2-МеГИ), равный отношению 2 α -метилгопан $C_{30}/(2\alpha\text{-метилгопан } C_{30} + \text{гопан } C_{30}) \cdot 100$, в % [Summons et al., 1999]. 2-МеГИ ОВ углеродистых пород синской свиты изменяется от 5.1 до 25.6 % (см. табл. 2). В ОВ низкоуглеродистых пород этот коэффициент варьирует от 5.1 до 9.4 %. Только в одном образце его значение повышается до 14.1 % (см. рис. 7, з). Установлена прямая связь между содержанием $C_{\text{орг}}$ и 2-МеГИ (см. рис. 7, з), $R = 0.81$.

Для ОВ углеродистых пород $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от -36.4 до -32.8 ‰ (среднее равно -34.6 ‰), низкоуглеродистых — от -36.4 до -29.3 ‰ (среднее = -33.5 ‰).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Распределение ОВ в породах синской свиты. Анализ показал, что содержание $C_{\text{орг}}$ становится больше по мере увеличения в породе концентрации НО и кремнезема, R этих зависимостей равны 0.87 и 0.64 соответственно. Прямая связь между количеством НО и кремнезема подтверждается $R = 0.89$. В разрезе синской свиты наблюдается чередование углеродистых и низкоуглеродистых пород (см. рис. 2).

Изучение синской свиты в обнажениях по рекам Синяя, Лена, Ботома (см. рис. 1) показало изменение содержания $C_{\text{орг}}$ от 0.15—0.19 % в плотных черных и коричневых известняках до 3.20—8.02 % (редко до 17.26 % в разрезе на р. Лена) в черных сланцеватых тонкослоистых и тонкоплитчатых известняках [Зеленов, 1957]. В последних ОВ располагается в виде нитевидных и каплевидных включений, ориентированных параллельно друг другу и создающих слоистость. По оценкам Ф.Г. Гурари с соавторами [1984], в пяти образцах пород синских отложений на р. Синяя с содержанием НО от 26.1 до 50.5 % количество $C_{\text{орг}}$ изменяется от 8.09 до 18.11 %. Анализируя образцы из двух разрезов р. Синяя, С.Ф. Бактуров с коллегами [1988] показали, что среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в известняках синской свиты не превышает 0.93 %. Таким образом, выявлено, что содержание ОВ в синской свите резко изменяется как по разрезу, так и по латерали даже на одном обнажении р. Синяя.

Оценка типа ОВ и условий накопления его в осадке. Значения HI больше 200 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, отношение Pr/Ph на уровне 1, распределения n -алканов с максимумами в области выхода легких УВ, трицикланов с коэффициентом $2 \cdot \sum(C_{19-20})/\sum(C_{23-26})$ [Конторович и др., 1999] менее 1, изменение значений $\delta^{13}\text{C}$ подтверждают аквагенную полимерлипидную природу ОВ пород синской свиты [Зеленов, 1957; Савицкий и др., 1972; Конторович, 1976]. Однако на диаграмме $\text{HI}-T_{\text{max}}$ видно разделение области точек на две совокупности (см. рис. 3). Это дает основание предполагать, что карбонатные породы синской свиты обогащены двумя подтипами аквагенного ОВ. Отличия ОВ могут быть обусловлены преобразованием ОВ в диагенезе и/или биохимическими особенностями организмов, накопившихся в осадках.

По мере увеличения в породах синской свиты $C_{\text{орг}}$ растет содержание $S_{\text{общ}}$ (см. табл. 1), $R = 0.94$. Связь этих параметров ранее была установлена для пород куонамской, иниканской и синской свит, распространенных на востоке Сибирской платформы [Савицкий и др., 1972; Конторович, 1976]. В распределении гомогопанов битумоидов двух групп пород из обнажения на р. Синяя, как правило, C_{35} преобладает над C_{34} (см. рис. 6, табл. 2). Это свидетельствует об устойчивом сероводородном заражении осадков и придонных вод синского палеоморя, иногда сменяющимся периодами аэрации морского бассейна [Peters, Moldowan, 1993; Sinninghe Damste et al., 1995]. Исследование микробиальных остатков синской свиты показало, что среди них обильно присутствуют кокки пурпурных бактерий. На основании этого сделан вывод, что дефицита сероводорода в фотической зоне не было [Астафьева, 2003]. Изучая палеоэкологию синской биоты, А.Ю. Иванцов с соавторами пришли к выводу, что все организмы адаптировались к жизни в условиях недостатка кислорода или анаэробных обстановках в придонных водах [Иванцов и др., 2005; Ivantsov et al., 2005]. Различия в содержании $S_{\text{общ}}$, вероятно, связано с двумя факторами: 1) биологической продуктивностью синского моря и, как следствие, скоростью поступления ОВ, создающего восстановительные условия в осадке; 2) скоростью минерализации углеродистых и низкоуглеродистых карбонатных илов.

Сходство ОВ углеродистых и низкоуглеродистых пород наблюдается в групповом составе битумоидов, характеристике n - и изоалканов, их отношений, аномально легком изотопном составе углерода НО. Присутствие в каждом образце насыщенной фракции стеранов и трицикланов указывает на вклад эукариот в ОВ синской свиты, по-видимому, преимущественно водорослей. Определение водорослей представлено в работах [Иванцов и др., 2005; Ivantsov et al., 2005]. Максимальные содержания этилхолестана в распределении стеранов, отношение стеранов C_{29}/C_{27} больше 1 типично для рассеянного ОВ и

нефтей осадочных бассейнов докембрия и раннего палеозоя древних платформ [Peters, Moldowan, 1993; Конторович и др., 1999; Каширцев, 2003; Kelly et al., 2011].

Исследование стеранов синской свиты позволило выявить протостераны C_{29} и C_{30} (УВ ряда ланостана) [Парфенова, 2011а, б]. Следовательно, в биологическом сообществе синского моря жили уникальные организмы, синтезировавшие протостероиды. Обобщение опубликованных материалов по распространению ланостанов показало, что они обычно встречаются в рассеянном ОВ и нефтях кайнозоя. Новая работа по идентификации ланостанов C_{24} и C_{25} в нефтях бассейна Богай Бэй на севере Китая [Lu et al., 2011] дополняет это наблюдение. Синская свита на Сибирской платформе является самым древним и пока единственным осадочным образованием, где в ОВ нижнего кембрия диагностированы ланостаны. Анализ результатов биохимических опытов продемонстрировал, что в современной биосфере молекулы с ланостановым скелетом синтезируют эукариоты и прокариоты. Наше исследование особенностей геохимии ланостановых соединений синской свиты и ископаемого ОВ кайнозоя свидетельствует, что эти биомаркеры накапливаются в карбонатных осадках в восстановительных условиях и являются, таким образом, литологическими и палеогеографическими индикаторами [Парфенова, 2011а, б].

Источником УВ ряда гопана признаны прокариоты [Peters, Moldowan, 1993]. 28,30-бисноргопан C_{28} характеризует ОВ двух групп пород синской свиты. Он отсутствует в ОВ куонамской свиты [Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2004, 2011]. Этот УВ недавно был обнаружен в докембрийских и кембрийских нефтях Восточной Сибири [Kelly et al., 2011]. Он встречен в битумах юрских отложений Мунского поднятия на северо-востоке Сибирской платформы [Каширцев, 2003]. Предполагают, что источником 28,30-бисноргопана и его гомологов могли быть террагенные и аквагенные организмы [Seifert et al., 1978; Nytoft et al., 2000; Dahl, 2004]. В ОВ палеогеновых отложений Западной Сибири идентифицированы 28,30-бисноргопан и 28,30-бисноргоп-17(21)-ен [Каширцев и др., 2008]. Эти биомаркеры встречены вместе с терпанами и терпенами континентального и морского происхождения. Кембрийский возраст ОВ синской свиты исключает привнос в осадок высшей наземной растительности. Наши наблюдения подтверждают, что 28,30-бисноргопан накапливается в морских карбонатных илах в восстановительных условиях и синтезируется анаэробными бактериями (хемоавтотрофами) [Peters, Moldowan, 1993; Nytoft et al., 2000; Dahl, 2004].

2 α - и 3 β -метилгопаны, идентифицированные в битумоидах синской свиты, ранее были обнаружены в рассеянном ОВ глинистых, кремнистых, карбонатных пород, в углях и нефтях протерозоя и фанерозоя, а также в ОВ современных осадков [Summons, Jahnke, 1990; Summons, Walter, 1990; Peters, Moldowan, 1993; Summons et al., 1999; Farrimond et al., 2004; Talbot, Farrimond, 2007; Talbot et al., 2008; Allen et al., 2010; Kelly et al., 2011]. Экспериментально установлено, что 2 α -метилгопановые биопреdecessоры синтезируются цианобактериями (планктонными организмами и бентосными формами — цианобактериальными матами) [Summons, Jahnke, 1990; Summons et al., 1999; Farrimond et al., 2004; Talbot, Farrimond, 2007; Talbot et al., 2008; Allen et al., 2010]. Кроме того, 2-метилбактериогопанополиолы были выделены из аноксических фотоавтотрофов (*Rhodospseudomonas palustris*) [Rashby et al., 2007]. Известно, что 3 β -метилбактериогопанополиолы синтезируются метанотрофами, метилотрофами, ацетобактериями [Summons, Jahnke, 1990; Peters, Moldowan, 1993; Farrimond et al., 2004; Talbot, Farrimond, 2007; Birgel, Peckmann, 2008; Allen et al., 2010]. Присутствие 2 α - и 3 β -метилгопанов обнаружено в ОВ отложений, сформированных в бассейнах рек, пресноводных и соленых озер, морей [Summons, Jahnke, 1990; Summons et al., 1999; Farrimond et al., 2004; Talbot et al., 2008]. На основе анализа 2-МеГИ [Summons et al., 1999] были отмечены следующие закономерности: 1) максимальные значения 2-МеГИ (более 10 %) получены для ОВ протерозоя независимо от состава пород; 2) аномально высокие значения этого коэффициента, по мнению исследователей, связаны с аноксическими событиями в фанерозое; 3) повышенный более 10 % 2-МеГИ коэффициент зафиксирован в ОВ карбонатных пород фанерозоя и нефтях, источником которых были карбонатные отложения, сформированные в условиях теплых, мелководных морских бассейнов континентального шельфа и прибрежных лагун [Summons et al., 1999; Talbot et al., 2008]. Таким образом, результаты исследования 2-метилгопанов синской свиты нижнего кембрия подтверждают, что высокие значения 2-МеГИ характеризуют ОВ теплых морских бассейнов, в карбонатных осадках и, вероятно, в придонных водах которых либо постоянно, либо периодически имело место сероводородное заражение.

Содержание гопанов и гомогопанов в терпанах на уровне 80—90 %, низкие значения коэффициентов трицикланы/(гопаны+гомогопаны) и (стераны+прегнаны)/терпаны свидетельствуют о существенной бактериальной переработке биомассы и, по-видимому, о том, что прокариоты были основным источником ОВ синской свиты. Идентифицированный широкий набор гопанов и метилгопанов указывает на разнообразие бактериальных сообществ морского бассейна в нижнем кембрии на территории формирования синских осадков. Рассмотренная геохимия терпанов и гомологов гопана показывает, что бактериальные сообщества синского моря отличались от сообществ куонамского. Представленные выше различия распределений гопанов, значений гопанового коэффициента C_{30}/C_{31} и 2-МеГИ (см. рис. 7, табл. 2)

позволяют сделать вывод, что состав прокариот, которые были источниками ОВ углеродистых и низкоуглеродистых пород, имел индивидуальные особенности. Наличие метилгопанов показывает, что одними из первичных продуцентов были цианобактерии и/или фотоавтотрофные прокариоты, а также метанотрофные и метилотрофные бактерии. Прямая связь 2-МеГИ с $C_{орг}$ пород синской свиты указывает, что накопление высокого содержания ОВ углеродистых известняков связано с периодическим массовым поступлением в осадок именно фототрофных прокариот. Новая геохимическая информация не дает возможности судить, были ли микробные сообщества планктонными или бентосными организмами и, как следствие, о глубинах синского моря.

Увеличение содержания низкомолекулярных гопанов C_{27} и C_{29} , коэффициентов C_{27}/C_{30} и $\sum C_{27-30}/\sum C_{31-35}$ с повышением содержания $C_{орг}$ в породах, вероятно, связано с бактериальным деметилированием гопанов в диагенезе. Закономерное увеличение содержания трисноргопанов по мере роста концентрации $C_{орг}$ в породах отмечалось прежде для ОВ куонамской свиты [Парфенова и др., 2004, 2011].

Оценка генерационного потенциала и катагенеза ОВ пород. Наши исследования показали, что содержание битумоида связано с количеством $C_{орг}$ в породах синской свиты ($R = 0.72$). Кроме этого, установлены прямые связи между значениями S_1 , S_2 и содержанием $C_{орг}$. Это типично для потенциально нефтегазопроизводящих пород [Конторович, 1976; Peters, Moldowan, 1993]. Сумма S_1 и S_2 является количественной оценкой генетического потенциала нефтегазопроизводящих отложений [Tissot, Welte, 1984; Меленевский, 1991]. Согласно классификации Б. Тиссо и Д. Вельте, низкоуглеродистые породы синской свиты обладают газовым и умеренным генетическим потенциалом (среднее значение $\sum(S_1+S_2) = 0.25$ %), углеродистые — высоким (среднее значение $\sum(S_1+S_2) = 2.10$ %) (см. табл. 1). На высокий генерационный потенциал указывают оценки НІ (см. табл. 1, рис. 3).

Температуры максимального выхода УВ по пиролизу (см. табл. 1, рис. 3), низкие на уровне 10 %-го содержания насыщенных УВ и ароматических соединений, высокие пики гомологов гопана на ГЖ-хроматограммах (см. рис. 4), присутствие ненасыщенных гомогопена и 28,30-гомогопена в УВ (см. рис. 6), низкие значения коэффициента Ts/Tm (в среднем 0.3, минимум до 0.1), элементный состав керогена (углерод — 76.9 %, водород — 8.9 %, гетероатомы — 14.1 %) [Богородская и др., 2005] показывают [Конторович, 1976; Tissot, Welte, 1984; Меленевский, 1991; Peters, Moldowan, 1993], что уровень катагенеза ОВ синской свиты соответствует границе прото- и началу мезокатагенеза.

Обычно оценки СРІ на уровне 1 (см. табл. 2) свидетельствуют о зрелом ОВ. Результаты лабораторных микробиологических исследований показали, что сульфатредуцирующие бактерии внеклеточно синтезируют УВ нормального и изостроения. Отношение СРІ при этом близко к 1 [Багаева, 1997]. При росте биомассы некоторых штаммов образуются повышенные количества именно четных гомологов *n*-алканов. В осадках морских бассейнов, воды которых обогащены сульфат-ионом, первичное ОВ перерабатывается сульфатредуцирующими гетеротрофными бактериями. Этот процесс может привести к выравниванию концентраций четных и нечетных УВ уже на этапе диагенеза, а возможно, и к преобладанию четных УВ. Следовательно, СРІ зависит не только от температурного воздействия недр на ОВ, но и от интенсивности биохимического изменения органического материала в морском осадке. Содержания геоизомеров (S) гомогопанов (см. рис. 6, а) превышают концентрации биоизомеров (R), что типично для зрелого ОВ. Однако известны примеры, когда в незрелом ОВ карбонатных пород были обнаружены полностью изомеризованные гомогопаны [Peters, Moldowan, 1993].

Для углеродистых и низкоуглеродистых пород синской свиты отмечены редкие повышенные значения β (больше 10 %) и РІ (больше 0.1) (см. табл. 1). Вероятно, это связано со слабым перераспределением битумоидной части ОВ за счет кристаллизации карбонатного вещества. Образцы с высокими значениями β и РІ имеют низкие содержания насыщенных и ароматических фракций в битумоидах низкоуглеродистых и углеродистых пород. Это свидетельствует об отсутствии следов существенной миграции внутри синской свиты в изученном разрезе на р. Синяя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ наших и опубликованных материалов свидетельствует, что ОВ в синской свите нижнего кембрия распределено неравномерно. Исследование геохимии биомаркеров показало, что чередование углеродистых и низкоуглеродистых пород на одном обнажении р. Синяя, вероятно, связано с изменением биологической продуктивности. Периодически на ограниченных по площади участках морского бассейна происходил массовый расцвет водорослево-бактериальной микробиоты, в которой доминирующую роль играли фототрофные прокариоты. После гибели этого микробного сообщества формировался аномально обогащенный ОВ карбонатный осадок. Литификация его приводила к образованию тонкослоистых углеродистых пород. Низкоуглеродистые породы синской свиты формировались из карбонатных осадков, в которые медленно поступало преимущественно бактериальное ОВ.

2. Современное исследование органической геохимии синской свиты на р. Синяя показало, что генерационный потенциал на этой территории реализовывался слабо, катагенез ОВ зафиксирован на

уровне ПК-МК¹ (по шкале [Конторович, 1976]). Известно, что в синском горизонте и на границах с подстилающими и перекрывающими его отложениями обнаружены битумы [Зеленов, 1957]. Геохимию их биомаркеров не изучали. Возможно, в каких-то районах синские отложения входили в главную зону нефтеобразования и генерировали нефти. Для достоверной оценки синской свиты как возможного источника нефтяных ресурсов на юго-востоке Сибирской платформы следует использовать сравнительный атомно-молекулярный анализ. Идентификация в битумах ланостанов, 28,30-бисноргопанов, 2- и 3-метилгопанов, $\delta^{13}\text{C}$ в среднем от -35 до -33 ‰ могут служить доказательством генерации нефтей породами синской свиты на северном склоне Алданской антеклизы.

ЛИТЕРАТУРА

- Астафьева М.М.** Микробиальные остатки синской свиты (нижний кембрий Сибирской платформы) // Палеонтологический журнал, 2003, № 4, с. 3—8.
- Багаева Т.В.** Способность сульфатредуцирующих бактерий различных таксономических групп к синтезу внеклеточных углеводов // Микробиология, 1997, т. 66, № 6, с. 796—799.
- Бахтуров С.Ф., Евтушенко В.М., Переладов В.С.** Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация. Новосибирск, Наука, 1988, 160 с.
- Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И.** Кероген. Методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005, 254 с.
- Геология нефти и газа Сибирской платформы** / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М., Недра, 1981, 552 с.
- Гурари Ф.Г., Гавшин В.М., Матвиенко Н.И., Переладов В.С., Бобров В.А., Смертина Л.Н., Шестель С.Т.** Геохимия микроэлементов в морских планктоногенных отложениях нижнего и среднего кембрия Сибирской платформы // Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири. Новосибирск, ИГГ СО АН СССР, 1984, с. 41—69.
- Зеленов К.К.** Литология нижнекембрийских отложений северного склона Алданского массива. М., Изд-во АН СССР, 1957, 123 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 8).
- Иванцов А.Ю., Журавлев А.Ю., Красилов В.А., Легута А.В., Мельникова Л.М., Урбанек А., Ушатинская Г.Т., Малаховская Я.Е.** Уникальные синские местонахождения раннекембрийских организмов (Сибирская платформа). М., Наука, 2005, 143 с. (Тр. ПИН РАН, т. 284).
- Каширцев В.А.** Органическая геохимия нефтяных ресурсов востока Сибирской платформы. Якутск, ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003, 160 с.
- Каширцев В.А., Конторович А.Э., Москвин В.И., Кучкина А.Ю., Ким В.Е.** Углеводороды-биомаркеры в органическом веществе палеогеновых отложений юга Западной Сибири // Нефтехимия, 2008, т. 48, № 4, с. 271—276.
- Конторович А.Э.** Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М., Недра, 1976, 250 с. (Тр. СНИИГГиМСа, вып. 229).
- Конторович А.Э., Бахтуров С.Ф., Башарин А.К., Беляев С.Ю., Бурштейн Л.М., Конторович А.А., Кринин В.А., Ларичев А.И., Ли Году, Меленевский В.Н., Тимошина И.Д., Фрадкин Г.С., Хоменко А.В.** Разновозрастные очаги нефтянообразования и нефтяноаккумуляции на Северо-Азиатском кратоне // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (11), с. 1676—1693.
- Меленевский В.Н.** Методические рекомендации по применению пиролитических методов моделирования в органической геохимии. Новосибирск, Изд-во СНИИГГиМСа, 1991, 50 с.
- Парфенова Т.М.** Ланостаны в органическом веществе кембрия (юго-восток Сибирской платформы) // ДАН, 2011а, т. 436, № 3, с. 386—389.
- Парфенова Т.М.** Углеводороды гомологического ряда ланостана в органическом веществе фанерозоя и их возможные биологические источники // Геология и геофизика, 2011б, т. 52(8), с. 991—1000.
- Парфенова Т.М., Бахтуров С.Ф., Шабанов Ю.Я.** Органическая геохимия нефтепроизводящих пород куонамской свиты кембрия (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (7), с. 911—923.
- Парфенова Т.М., Пушкарев М.С., Иванова Е.Н.** Гопаны и гопены синской свиты нижнего кембрия (северный склон Алданской антеклизы) // ДАН, 2010, т. 430, № 3, с. 382—385.
- Парфенова Т.М., Коровников И.В., Иванова Е.Н., Меленевский В.Н.** Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород среднего кембрия (северо-восток Сибирской платформы) // Геология нефти и газа, 2011, № 5, с. 64—72.
- Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч. I. Верхний докембрий, нижний палеозой** / Ред. Ю.Я. Шабанов. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1983, 216 с.

Савицкий В.Е., Евтушенко В.М., Егорова Л.И., Конторович А.Э., Шабанов Ю.Я. Кембрий Сибирской платформы (юдомо-оленекский тип разреза, куонамский комплекс отложений). М., Недра, 1972, 200 с. (Труды СНИИГГ и МСа, вып. 130).

Allen M.A., Neilan B.A., Burns B.P., Jahnke L.L., Summons R.E. Lipid biomarkers in Hamelin Pool microbial mats and stromatolites // *Org. Geochem.*, 2010, v. 41, p. 1207—1218.

Birgel D., Peckmann J. Aerobic methanotrophy at ancient marine methane seeps: A synthesis // *Org. Geochem.*, 2008, v. 39, p. 1659—1667.

Dahl B. The use of bisnorhopane as a stratigraphic marker in the Oseberg Back Basin, North Viking Graben, Norwegian North Sea // *Org. Geochem.*, 2004, v. 35, p. 1551—1571.

Farrimond P., Talbot H.M., Watson D.F., Schulz L.K., Wilhelms A. Methylhopanoids: molecular indicator of ancient bacteria and a petroleum correlation tool // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68, № 19, p. 3873—3883.

Ivantsov A.Yu., Zhuravlev A.Yu., Leguta A.V., Krassilov V.A., Melnikova L.M., Ushatinskaya G.T. Paleocology of the Early Cambrian Sinsk biota from the Siberian Platform // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecology*, 2005, v. 220, p. 69—88.

Kelly A.E., Love G.D., Zumberge J.E., Summons R.E. Hydrocarbon biomarkers of Neoproterozoic to Lower Cambrian oils from eastern Siberia // *Org. Geochem.*, 2011, v. 42, p. 640—654.

Lu H., Sheng G., Peng P., Ma Q., Lu Zh. Identification of C₂₄ and C₂₅ lanostanes in Tertiary sulfur rich crude oils from the Jinxian Sag, Bohai Bay Basin, Northern China // *Org. Geochem.*, 2011, v. 42, p. 146—155.

Nytoft H.P., Bojesen-Koefoed J.A., Christiansen F.G. C₂₆ and C₂₈-C₃₄ 28-norhopanes in sediments and petroleum // *Org. Geochem.*, 2000, v. 31, p. 25—39.

Peters K.E., Moldowan J.M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993, 363 p.

Rashby S.E., Session A.L., Summons R.E., Newman D. Biosynthesis of 2-methylbacteriohopanepolyols by an anoxygenic phototroph // *PNAS*, 2007, v. 104, p. 15099—15104.

Seifert W.K., Moldowan J.M., Smith G.W., Whitehead E.V. First proof of structure of a C₂₈-pentacyclic triterpane in petroleum // *Nature*, 1978, v. 271, p. 436—437.

Sinninghe Damste J.S., van Duin A.C.T., Hollander D., Kohnen M.E.L., de Leeuw J.W. Early diagenesis of bacteriohopanepolyol derivatives: Formation of fossil homohopanoids // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, v. 59, p. 5141—5147.

Summons R.E., Jahnke L.L. Identification of the methylhopanes in sediments and petroleum // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, v. 54, p. 247—251.

Summons R.E., Walter M.R. Molecular fossils and microfossils of prokaryotes and protists from Proterozoic sediments // *Amer. J. Sci.*, 1990, v. 290-A, p. 212—244.

Summons R.E., Jahnke L.L., Hope J.M., Logan G.A. 2-Methylhopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis // *Nature*, 1999, v. 400, p. 554—557.

Talbot H.M., Farrimond P. Bacterial population recorded in diverse sedimentary biohopanoid distributions // *Org. Geochem.*, 2007, v. 38, p. 1212—1225.

Talbot H.M., Summons R.E., Jahnke L.L., Cockell C.S., Rohmer M., Farrimond P. Cyanobacterial bacteriohopanepolyol signatures from cultures and natural environmental settings // *Org. Geochem.*, 2008, v. 39, p. 232—263.

Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence. Second rev. and Enlarged ed., Berlin, Springer, 1984, 699 p.

*Рекомендована к печати 26 апреля 2016 г.
А.Э. Конторовичем*

*Поступила в редакцию
15 февраля 2016 г.*