

КЕРОГЕН ВЕРХНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГИБА

© 2022 г. А. П. Родченко*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
пр-т ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: rodchenkoap@ipgg.sbras.ru*

Поступила в редакцию 11.08.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Керогены гольчихинской, яновстанской, сиговской и точинской свит позднеюрского возраста северо-востока Западной Сибири изучены современными аналитическими методами. Определены количественные характеристики проб (зольность, влажность), элементный состав (содержания углерода, водорода, серы, азота, кислорода), соотношение стабильных изотопов углерода и пиролизные параметры керогенов. Дана оценка типа и катагенеза органического вещества (ОВ), генерационного потенциала нефтепроизводящих пород. Установлено, что на состав керогенов северо-востока Западной Сибири существенное влияние оказали окислительные условия накопления ОВ. Выявлены закономерности изменения состава керогенов, связанные с типом и катагенезом ОВ. Обсуждается соотношение биохимических компонентов (липидов, белков и углеводов) исходного ОВ пород и их влияние на состав керогенов.

Ключевые слова: кероген, органическое вещество, верхняя юра, Енисей-Хатангский региональный прогиб, Арктика, элементный состав, изотопный состав углерода, Rock-Eval пиролиз

DOI: 10.31857/S0016752522080076

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные геохимические исследования ОВ мезозойских отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП) (Сороков, 1971; Конторович и др., 1971, 1974; Войцеховская, 1974; Данишевская и др., 1973; Соболева, 1981; Афанасенков, 1987; Нефтегазоносные бассейны..., 1991; Ларичев и др., 2003; Филипцов и др., 2006; Гончаров и др., 2011; Ким, Родченко, 2013; Афанасенков и др., 2015; Родченко, 2016) показали, что его вещественный состав имеет смешанную природу, в котором соотношение террагенной и аквагенной составляющих существенно варьирует. Значительное влияние на состав исходного ОВ, его количество и преобразование в диагенезе (сохранность) сыграло палеогеографическое положение изучаемой территории. В позднеюрский период Енисей-Хатангский бассейн представлял собой мелководно-морской бассейн с юга и севера ограниченный сушами Сибирской платформы и Таймыра соответственно. На западе — соединялся с Западно-Сибирским бассейном, на востоке — с Якутской акваторией. Глубина бассейна на большей части территории в различные временные интервалы составляла 25–200 м, за исключением периодов максимальной трансгрессии (волжское

время), когда в наиболее погруженных частях максимальная глубина достигала 200–400 м (Девятов и др., 2011; Конторович и др., 2013). Поступление с возвышающихся суши континента вместе с терригенными осадками ОВ высшей наземной растительности привело к его перемешиванию с аквагенным ОВ, образовывавшимся непосредственно в бассейне, а условия, соответствующие неритовым обстановкам, способствовали окислительным преобразованиям захоронявшегося ОВ. Такие условия в конечном счете существенно сказались на нефтегазоматеринском потенциале верхнеюрских отложений ЕХРП.

Объектом изучения в настоящей работе является **кероген** — основная составляющая рассеянного ОВ (РОВ) материнских пород, нерастворимая в органических растворителях, которая представляет значительный интерес как источник жидких и газообразных углеводородов (УВ) в геосфере. Кероген, являясь непосредственным продуктом преобразования живого вещества, несет в себе информацию о биотических сообществах, ставших источником ОВ, условиях его накопления в осадках, изменчивости обстановок осадконакопления, эволюции преобразования отложений, а также нефтепроизводящих свойствах исследуемой толщи.

Опубликованных работ по изучению химического и микроскопического состава нерастворимого ОВ (НОВ) ЕХРП немного и выполнены они главным образом в 70–80-е гг. XX столетия для пород нижней и средней юры Л.И. Богородской, А.Г. Войцеховской, А.И. Данюшевской, Е.И. Соболевой (Войцеховская, 1974, 1977; Данюшевская, 1975; Соболева, 1981; Богородская, Соболев, 1983, Богородская и др., 2005). Немногочисленность исследований непосредственно керогенов в настоящее время связана со сложностями технологического процесса и трудоемкостью выделения НОВ из пород.

В настоящей работе проведено обобщение и интерпретация результатов исследования ОВ позднеюрских отложений западной части ЕХРП. В работе показан уникальный материал изучения керогена, собранный за последнее десятилетие в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геохимические исследования проводились в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН. В работе была проанализирована коллекция из 33 керогенов верхней юры, которая включает 17 проб гольчихинской свиты, по 2 пробы сивговской и точинской свит и 12 проб яновстанской свиты. Скважины, из которых были отобраны образцы пород, показаны на рис. 1. Относительное положение изученных проб в разрезе верхнеюрских отложений этих скважин отражено на рис. 2. Отбор образцов керна, из которых выделялись керогены, в разные годы (1997–2014 гг.) выполнялся сотрудниками лаборатории – В.И. Москвиным, А.Н. Фоминым, Н.С. Ким и автором.

Выделение керогена осуществлялось из предварительно дебитуминизированного хлороформом порошка породы путем разрушения и удаления породообразующих минералов (метод обогащения) смесью плавиковой и соляной кислот в платиновых чашечках при нагревании. От остаточного растворимого ОВ и серы образец освобождался с помощью повторной экстракции горячим хлороформом. После этого кероген с оставшимися минеральными компонентами высушивался до постоянного веса. Методика, которую используют для выделения керогенов в ИНГГ СО РАН, подробно описана в (Богородская, 1986; Богородская и др., 2005). В выделенных керогенах определялись влажность, зольность и пиритная форма серы.

Анализ элементного состава выполнен на приборе EA1110 CHSN компании “CE Instruments Ltd” в ИНГГ СО РАН. Концентрации углерода, водорода, серы и азота пересчитывались в процентах на ОВ с учетом зольности, влажности и содержания пиритной серы в керогене. Концентрации кисло-

рода рассчитывались по разности. Контроль выполненных анализов для единичных проб осуществлялся в Федеральном исследовательском центре угля и углехимии СО РАН на элементном анализаторе “Flash EA 2000” компании “Thermo Fisher Scientific”, который предназначен для одновременного определения содержания органического углерода, водорода, азота, серы и кислорода в отдельном реакторе, а также в аналитическом центре LECO European application and technology center (г. Берлин, Германия) на элементном анализаторе “LECO CHN628” для определения углерода, водорода и азота с дополнительным модулем “628O” для определения кислорода компании “LECO Corporation”.

Методом пиролиза в варианте “Rock-Eval” коллекция керогенов исследована на приборе SourceRockAnalyzer (SR Analyzer-POPI, Humble Instruments) в ИНГГ СО РАН.

Измерение стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) НОВ (30 проб) выполнялось в ИГМ СО РАН с использованием масс-спектрометрического комплекса, состоящего из масс-спектрометра Finnigan MAT 253 и линии пробоподготовки – Gas Bench II (Thermo Fisher Scientific) и в Томском филиале ФГУП “СНИИГГиМС” в лаборатории изотопных методов на масс-спектрометре DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific).

Определение содержания органического углерода $C_{орг}$ (в % на породу) выполнялось на экспресс-анализаторе АН-7529.

Замеры отражательной способности витринита R_{vit}° сделаны А.Н. Фоминым на микроскопеспектрофотометре МСФП-2 при длине волны 546 нм в иммерсионной среде. Для анализа использовались полированные пришлифовки образцов керна.

Генетические типы ОВ. На сегодняшний день в России и за рубежом существует несколько вариантов классификации типов ОВ, основанные на различных принципах построения. В самом общем виде ОВ по фациально-генетическому принципу делится на два основных типа – ОВ, образованное за счет органической массы фито-, зообентоса и фито-, зоопланктона в морских, реже озерных обстановках (сапропелевое, аквагенное, алиновое, I и II типы) и ОВ, генетически связанное с высшей наземной растительностью и образованное в континентальных обстановках (гумусовое, террагенное, арконовое, III тип).

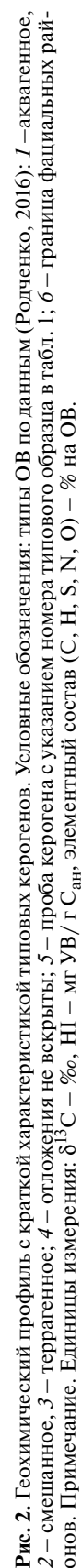
Первая классификация РОВ была перенята с классификации Г. Потонье (1912 г.) для каустобиолитов, т.е. концентрированных форм ОВ континентального происхождения. ОВ, образованное из остатков низших растений (сапропелей), было предложено называть сапропелевым, а высших растений, в составе которых преобладают гумусовые компоненты, – гумусовым; выделяемые



Рис. 1. Схема отбора образцов ядерного материала. Условные обозначения: 1 – скважины, в которых отобран ядерный материал (площадь и номер скважины); 2 – административные границы; 3 – граница распространения мезозойских отложений; 4 – граница фациальных районов; 5 – линия профиля на рис. 2.

промежуточные типы представляют собой смешанные формы с преобладанием того или иного материала. В настоящее время эту классификацию в основном используют ученые геохимики европейской части России, понимая под сапропелевым РОВ продукты распада органической

массы фито- и зообентоса и планктона морских и пресноводных водоемов. В 1958 г. В.А. Успенский с соавторами, исходя из положения об отсутствии принципиального различия между рассеянной и концентрированной формами ОВ, предложили детальную генетическую классификацию, в осно-



ву которой положены фациальные типы ископаемых углей и степень “метаморфизма” (катагенеза). В дальнейшем Г.М. Парпаровой и Н.Г. Неручевым была разработана вещественно-петрографическая классификация РОВ на основе исследования микрокомпонентного и химического состава керогенов (Парпарова, Неручев, 1977). Еще одна классификация РОВ в осадочных породах (по Н.Б. Вассоевичу — седидахитов), которая должна была устранить путаницу в терминологии, была разработана Н.Б. Вассоевичем (1973—1974 гг.) и базировалась на молекулярном составе ОВ: кероген с преобладающими алифатическими и ациклическими структурами, которыми богат сапропель, было предложено называть алиновым (подтипы алфиновое и алциновое); кероген, содержащий значительное количество конденсированных ароматических структур, т.е. гумусового типа — арконовым. Кроме того, выделялось амикагиновое ОВ с высоким содержанием азота и гидроароматических структур. Однако эти термины не получили широкого распространения. В сибирской научной школе органической геохимии принято пользоваться терминами — аквагенное и террагенное, предложенными А.Э. Конторовичем (1976 г.), которые также отражают генетический тип исходного органического материала для ОВ и согласуются с терминами *marine* и *terrestrial*, используемыми в иностранной литературе.

И.В. Гончаровым в монографии (1987) впервые была высказана мысль, что ОВ не следует делить на гумусовое и сапропелевое или морское и неморское, т.к. качество керогена, т.е. его способность генерировать определенное количество нефти или газа, а также их состав, определяются не столько природой биопродуцентов, сколько условиями, в которых происходит их fossilization. При этом исключительную роль автор отводит процессам аэробного окисления за счет растворенного в воде кислорода и в меньшей степени анаэробной дегградации за счет серы сульфат-иона, которые могут приводить к существенным потерям и преобразованию исходной биомассы.

В настоящее время как за рубежом, так и в России, широко применяется классификация керогенов на три основных типа (I, II и III) по данным элементного состава. Кероген I типа характеризуется высоким содержанием водорода ($H/C > 1.5$) и низким содержанием кислорода ($O/C < 0.1$) и формируется из смеси липидного материала водорослей и микроорганизмов. Условия для его образования чаще реализуются в бескислородных озерных обстановках. Для керогена II типа средние значения атомных отношений H/C равны 1.2—1.3 и O/C меньше 0.1. По источнику и условиям образования соответствует аквагенному или сапропелевому типу ОВ, состоящему из остатков различных фито- и зооорганизмов, микроорганизмов, а также незначительного количества принесенного в

морской бассейн материала высших растений. Кероген III типа характеризуется низкими значениями атомного отношения H/C (< 0.9) и повышенными величинами O/C более 0.2. Образуется преимущественно из остатков высшей наземной растительности (Тиссо, Вельте, 1981).

Разделение fossilized ОВ на группы, дополняющее представления о химико-вещественном составе ОВ, было предложено В.А. Успенским (Успенский и др., 1977). На биохимической основе ОВ дифференцировано на три группы, различные по происхождению, составу, свойствам и поведению в течение катагенеза: продукты преобразования лигниноцеллюлозного материала — собственно гумусовые элементы; продукты вторичного (типа меланоидинового) синтеза на основе остатков углеводного (в том числе хитинового) и белкового происхождения — гумоидные элементы; липидные элементы (липоидиновые по Н.Б. Вассоевичу), присутствующие преимущественно в полимерлипидной форме в fossilized ОВ. Типично аквагенное (сапропелевое) ОВ состоит из липидной и углеводно-белковой (гумоидной) частей, а в типично террагенных (гумусовых) разностях ОВ преобладают собственно гумусовые элементы. Наиболее характерным параметром липидной части является содержание водорода, а углеводно-белковой части — азота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Элементный состав керогенов

В табл. 1 приведены геохимические параметры — результаты определения аналитических характеристик, элементного состава, пиролиза и изотопного состава углерода типовых керогенов, а также дополнительная информация для пород соответствующих керогенов по содержанию $C_{орг}$ и катагенезу ОВ.

Содержание органического углерода в породах позднюрского возраста, из которых были выделены керогены, распределяется неравномерно и колеблется в широких пределах. Для гольчихинской свиты диапазон концентраций $C_{орг}$ варьирует от 0.7 до 9.9% на породу, при этом аномально высокие концентрации (4.1, 7.9 и 9.9%) отмечаются в образцах из скв. Пайяхская-1, содержащих углефицированные остатки детрита. Без учета этих проб среднее содержание органического углерода в породах гольчихинской свиты изученной коллекции составляет 1.6% на (разброс от 0.7 до 4.1% на породу). В образцах точинской свиты концентрации $C_{орг}$ составляют 0.9 и 2.5%, в образцах сиговской свиты — 1.7 и 2.3% на породу. Для яновстанской свиты среднее содержание $C_{орг}$ равно 1.9% и изменяется в интервале 1.3—4.3% на породу.

Таблица 1. Геохимические характеристики керогенов верхнеюрских пород ЕХРП

№ п/п	Площадь	Глубина отбора керн, м	Возраст	C _{орг} , % на поруду	δ ¹³ C, ‰	Анализ керогена, %			Элементный анализ, % на ОВ					(H/C) _{ат}	(O/C) _{ат}	Пиролиз		Ката- генез	R _{vt} , %
						W _{ан}	A	S _{пир}	C	H	S	N	O			T _{плав} , °C	HI, мг УВ/г C _{ан}		
1	Горчинская-1	2874	J ₃ -K ₁ уан	1.7	-25.6	3.07	1.80	0.35	76.7	4.4	1.1	3.3	14.5	0.68	0.14	434	135	МК ₁ ²	0.8
2	Дерябинская-9	3188	J ₂ -K ₁ гл	1.3	-23.7	2.21	3.81	0.36	69.4	4.3	0.5	4.1	21.8	0.74	0.24	434	89	МК ₁ ²	0.67
3	Медвежья-316	1927	J ₃ -K ₁ уан	1.7	-24.2	4.44	4.01	0.29	69.8	3.3	0.4	3.6	22.8	0.56	0.25	427	82	МК ₁ ¹	—
4	Медвежья-316	1993	J ₃ sg	2.3	-23.6	5.18	1.71	0.22	68.0	3.2	0.5	4.1	24.2	0.57	0.27	422	29	МК ₁ ¹	—
5	Медвежья-316	2060	J ₂₋₃ tch	2.5	-22.7	5.26	1.68	0.16	67.1	3.7	0.4	4.2	24.6	0.65	0.27	426	67	МК ₁ ¹	0.56
6	Озерная-10	3109	J ₃ -K ₁ уан	1.8	-29.0	1.74	12.44	0.15	82.0	6.2	0.9	4.7	6.2	0.90	0.06	433	228	МК ₁ ²	0.73
7	Озерная-10	3274	J ₃ -K ₁ уан	1.5	-25.4	2.25	6.53	0.20	73.9	4.1	0.9	4.0	17.2	0.65	0.17	433	56	МК ₁ ²	0.76
8	Озерная-10	3540	J ₃ -K ₁ уан	2.0	-23.4	2.39	3.22	0.11	72.0	3.5	0.6	3.9	20.0	0.58	0.21	430	14	МК ₁ ²	—
9	Пайяхская-1	4010	J ₂ -K ₁ гл	7.9	-23.5	2.83	0.97	0.15	77.3	3.3	0.2	3.0	16.1	0.51	0.16	463	12	МК ₂	1.14
10	Паютская-1	3367	J ₂ -K ₁ гл	1.0	-24.4	2.67	5.08	0.42	77.4	4.9	1.1	3.2	13.4	0.76	0.13	438	107	МК ₁ ²	0.83
11	Пелятинская-15	3130	J ₂ -K ₁ гл	1.5	-28.9	2.01	3.28	0.60	77.3	5.2	0.7	3.8	13.1	0.79	0.13	438	219	МК ₁ ²	—
12	Сузунская-4	3220	J ₃ -K ₁ уан	2.6	-26.6	1.86	1.68	0.50	74.0	5.4	0.8	3.1	16.8	0.86	0.17	429	126	МК ₁ ¹	0.62
13	Туколандо- Валинская-320	4078	J ₃ -K ₁ уан	1.3	-25.7	1.7	4.9	0.2	79.1	4.3	1.2	3.0	12.4	0.64	0.12	436	63	МК ₂	—
14	Туколандо- Валинская-320	4262	J ₃ sg	1.7	-25.9	1.3	5.4	0.1	79.6	4.6	1.1	2.8	13.9	0.69	0.13	436	86	МК ₃ ¹	1.32
15	Ушаковская-1	3079	J ₂ -K ₁ гл	2.1	-29.0	1.31	5.76	0.62	75.6	5.7	2.6	3.5	12.6	0.90	0.13	434	288	МК ₁ ¹	0.62
16	Ушаковская-1	3169	J ₂ -K ₁ гл	4.1	-27.3	1.21	2.31	0.42	75.8	4.9	1.1	3.6	14.7	0.77	0.15	436	178	МК ₁ ¹	0.64
17	Хабейская-2	2064	J ₂ -K ₁ гл	2.0	-24.7	5.92	6.39	3.5	71.2	3.8	1.4	3.6	20.0	0.64	0.21	423	60	МК ₁ ¹	0.5
18	Южно-Носков- ская-318	4005	J ₂ -K ₁ гл	1.1	-24.1	4.07	2.28	0.09	80.0	3.2	0.01	2.6	14.2	0.47	0.13	455	25	МК ₂	1.14

Примечание. Порядковые номера проб соответствуют номерам керогенов на рис. 2.

Используя результаты содержания органического углерода в породе и углерода в элементном составе керогена, были рассчитаны массы ОВ в породе. Доля ОВ в изученных аргиллитах и алевроаргиллитах изменяется от 0.9 до 13.0% на породе.

В составе изученных керогенов аналитическая влажность ($W_{ан}$) составляет от 1.0 до 5.9% на “влажное” НОВ. Зольность (А) исследуемых образцов не превышает значения 12.4% и в среднем составляет 4.0% на кероген. Содержание пиритной серы в керогенах варьирует от 0.09 до 0.95% и только в одной пробе гольчихинской свиты (скв. Хабейская-2) достигает 3.5%. Общая доля минеральной массы (включая пирит) невелика и варьирует от 3.8 до 14.3%. Так как наличие в больших количествах минералов, трудно разлагаемых или неподдающихся действию кислот, в пробах снижает правильность результатов анализов, то представленные аналитические характеристики керогенов указывают на высокое качество выделенных концентратов РОВ.

Анализ результатов элементного состава керогенов верхнеюрских пород западной части ЕХРП показал, что в его структуре в отличии от керогенов баженовского горизонта центральной части Западной Сибири (Конторович и др., 2019) отмечаются пониженные концентрации углерода и водорода, в больших концентрациях присутствует кислород.

Содержание углерода в керогенах изменяется от 67.0 до 83.8% в пересчете на ОВ. Наименьшие концентрации С в элементном составе (67.0–71.2%) установлены в образцах с наименее преобразованным ОВ (катагенез по данным R_{vt}^o соответствует градации MK_1^1 по шкале (Конторович, 1976)) из скважин Медвежья-316, Хабейская-2 и Дерябинская-9, расположенных на периферии ЕХРП (см. табл. 1). Эти пробы также содержат наибольшие концентрации кислорода – 20.0–24.6%. В целом изученная коллекция керогенов характеризуется значительной вариацией содержания кислорода от 6.2 до 24.6%. Концентрации водорода в НОВ незначительны и изменяются от 3.0 до 6.2% на ОВ. Повышение содержания водорода до 6.2% на ОВ отмечается в некоторых керогенах верхневолжской-нижнеберриасской части разрезов гольчихинской (скв. Пеляткинская-15 и Ушаковская-1) и яновстанской (скв. Озерная-10) свит (рис. 2). Тогда как остальные керогены характеризуются низким содержанием водорода – меньше 5.0% на ОВ. Доля азота в исследованной коллекции керогенов составляет от 2.5 до 4.7%. В самых низких концентрациях в керогенах содержится сера от 0.01 до 2.6% на ОВ.

Распределение элементного состава керогенов наглядно продемонстрировано на тригонограмме (рис. 3), широко используемой для диагностики

типа и степени преобразованности ОВ, с координатами С, Н, и суммы концентраций N, S и О и на диаграмме Ван Кревелена соотношения атомных отношений водорода к углероду ($H/C_{ат}$) и кислорода к углероду ($O/C_{ат}$) (рис. 4). На тригонограмме часть проб керогенов ЕХРП по распределению химических элементов не соответствует традиционным областям основных генетических типов, построенным на коллекциях Кузнецкого и Канско-Ачинского бассейнов (угли и РОВ C_1 - P_{1-2} - J_2 возраста), Западной Сибири (баженовская свита и ее аналоги, тогурская свита) и Восточной Сибири (куонамская свита и ее аналоги) (Богородская и др., 2005). На диаграмме Ван Кревелена также отмечается, что некоторые образцы по значениям $H/C_{ат}$ не попадают в основное поле керогена или близки к его нижней границе.

Основываясь на диаграмме Ван Кревелена керогены принято разделять на I, II и III типы (Тиссо, Вельте, 1981; Лопатин, Емец, 1987; Peters et al., 2005). На диаграмме проанализированные пробы по своему элементному составу ближе к области распространения керогена III типа, для которого характерны значения $H/C_{ат}$ меньше 1.0 и $O/C_{ат}$ до 0.3. Для верхнеюрских керогенов ЕХРП отношение атомарных водорода и углерода варьирует значительно в интервале 0.46–0.94. Отношение $O/C_{ат}$ изменяется от 0.06 до 0.27. В интервал значений $O/C_{ат}$ от 0.10 до 0.20 попадает большая часть проб изученной коллекции, большими величинами ($O/C_{ат} > 0.20$) характеризуются описанные ранее керогены из скважин Медвежья-316, Дерябинская-9 и Хабейская-2. Один образец (скв. Озерная-10, гл. 3109.5 м) со значениями $H/C_{ат}$ и $O/C_{ат}$ 0.90 и 0.06, соответственно, тяготеет к керогену II типа.

Невысокие концентрации водорода в НОВ верхнеюрских отложений ЕХРП, вероятнее всего, объясняются совокупностью факторов – составом исходного органического материала и его аккумуляцией в окислительной обстановке. Пониженные концентрации водорода в изученной коллекции керогенов свидетельствуют о низком содержании в его структуре полимерлипидной составляющей, наследуемой главным образом от архей, бактерий и простейших эукариотов, т.е. аквагенного ОВ, и большей доле гумусово-гумоидного материала (Успенский, Радченко, 1973; Богородская и др., 2005). Вероятнее всего, окислительные условия среды в осадках в диагенезе и на ранних стадиях катагенеза предопределили гумоидный (псевдогумусовый) облик изученных керогенов, который они приобрели за счет выгорания липидной части и потери водорода при анаэробном окислении ОВ. Этот процесс был назван А.Э. Конторовичем псевдофузенизацией (Успенский, Радченко, 1973; Конторович, 1970, 1976). Кроме того, аномально низкие значения

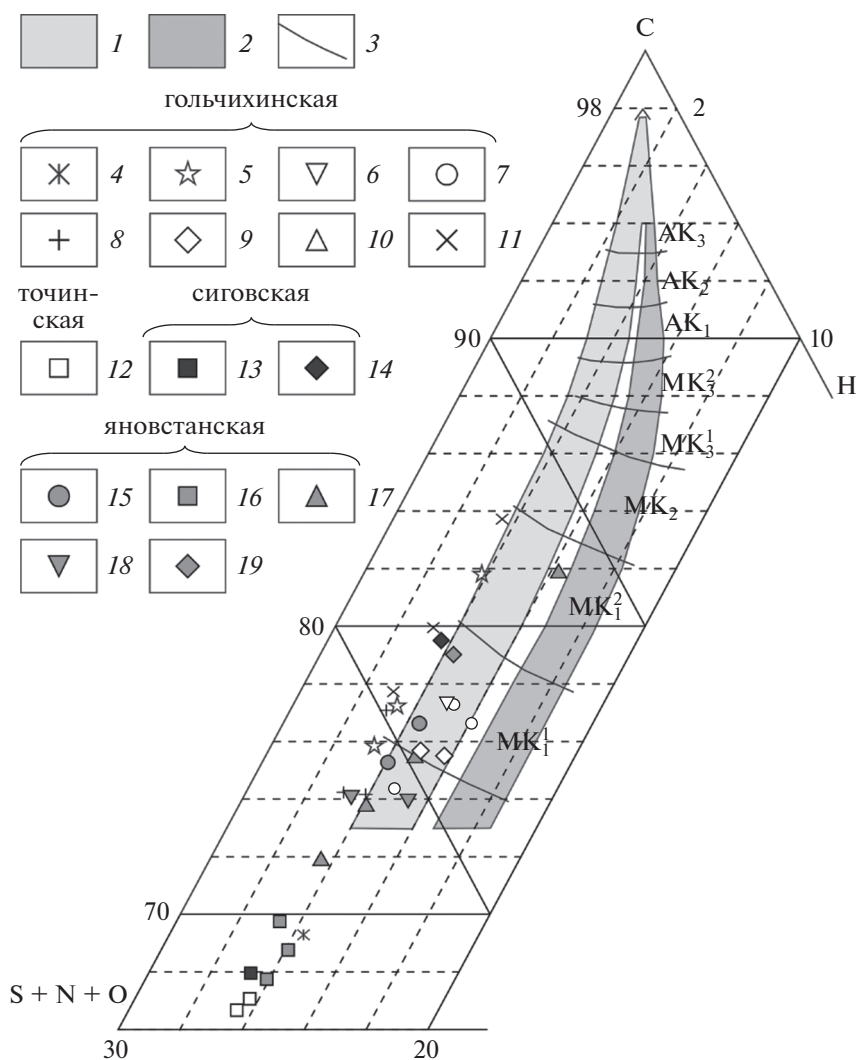


Рис. 3. Тригонограмма элементарного состава верхнеюрских керогенов ЕХРП. Условные обозначения: поля эволюции элементарного состава в катагенезе: 1 — керогена террагенного типа, 2 — керогена аквагенного типа; 3 — границы зон катагенеза; скважины: 4 — Дерябинская-9, 5 — Пайяхская-1, 6 — Паютская-1, 7 — Пелятская-1, 8 — Средняя-3, 9 — Ушаковская-1, 10 — Хабейская-2, 11 — Южно-Носковская-318; точинская свита: 12 — Медвежья-316; сиговская свита: 13 — Медвежья-316, 14 — Туколандо-Вадинская-320; яновстанская свита: 15 — Горчинская-1, 16 — Медвежья-316, 17 — Озерная-10, 18 — Сузунская-4, 19 — Туколандо-Вадинская-320.

отношения $H/C_{ат}$ могут свидетельствовать о том, что часть террагенного ОВ претерпела сильное изменение еще на суше, что подтверждается наличием среди террагенного материала фюзинизированных (окисленных) остатков лигнина и целлюлозных тканей растений (Ронкина и др., 1971; Войцеховская, 1974; Богородская, Соболева, 1983). Выявленный элементный состав керогенов в скважинах, расположенных на периферии ЕХРП (Дерябинская-9, Медвежья-316, Хабейская-2), следует связывать не только с низкой преобразованностью ОВ, соответствующей грациям катагенеза MK_1 , а также с вкладом такого окисленного террагенного ОВ и сильного аэробного окисления, приведшего к внедрению кисло-

рода в структуру протокерогена. В керогенах верхневожской-нижеберриасской части изученных разрезов отмечается увеличение концентраций водорода (4.9–6.2%), свидетельствующее об обогащении ОВ этого уровня липидными компонентами, за счет увеличения доли в составе ОВ морского фитопланктона, что может быть связано с увеличением биопродуктивности в бассейне осадконакопления в это время и менее окислительными условиями преобразования исходного материала.

Содержание водорода в структуре проанализированных керогенов коррелирует с данными изотопного состава углерода и нефтегазогенерационным потенциалом (НП), определенным методом пиролиза (рис. 5, 6). Так как липиды обога-

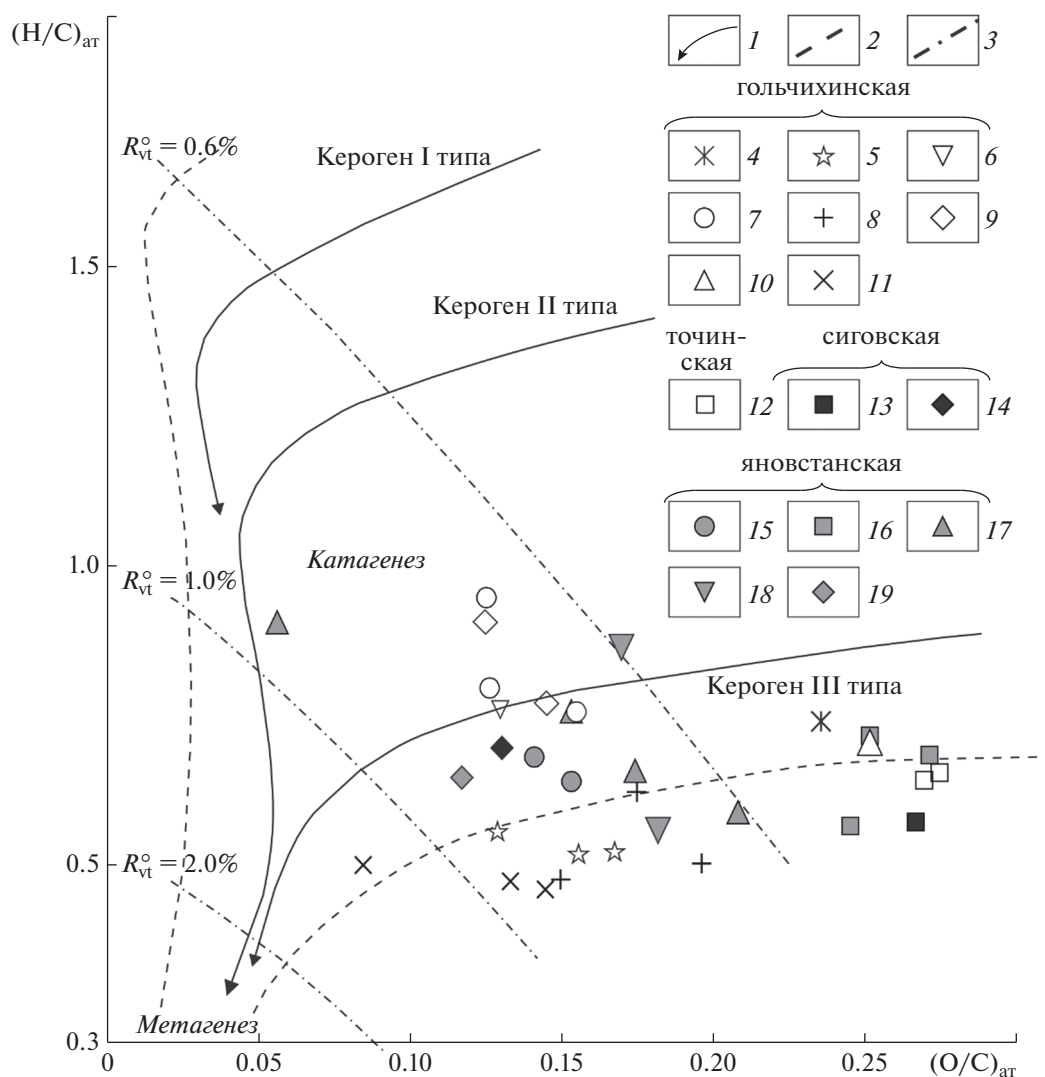


Рис. 4. Распределение характеристик элементного состава верхнеюрских керогенов ЕХРП на диаграмме Ван Кривелена (по Тиссо, Вельте, 1981). условные обозначения: 1 – эволюционные кривые основных типов керогенов, 2 – границы поля, отвечающего керогену; 3 – изолинии приближенных значений отражательной способности витринита; условные обозначения свит см. рис. 3.

щены легким изотопом ^{12}C (в морском планктоне величина $\delta^{13}\text{C}$ составляет $-28\text{...}-24\text{‰}$) относительно белков и углеводов морского планктона ($\delta^{13}\text{C}$ изменяются от -21 до -16‰) и растений в целом (Конторович и др., 1986), то пробы, в составе которых увеличивается доля полимерлипидных компонентов, т.е. содержание водорода, имеют более легкий изотопный состав углерода (рис. 5). Как известно, водородный индекс HI фактически характеризует содержание водорода в керогене и находится в прямой зависимости от атомного отношения $\text{H}/\text{C}_{\text{ат}}$, поэтому наличие прямой зависимости подтверждает корректность определения концентраций водорода в керогенах независимым методом (рис. 6).

Кислород в структуре изученных керогенов имеет разную природу. Его источником могут

быть лигнин и целлюлоза растительных клеток, растворенный кислород в водной толще, а также углеводные компоненты исходного живого вещества. Кроме того, за счет потери углерода, водорода и серы при аэробном и анаэробном окислении на этапах седиментогенеза и раннего диагенеза происходит относительное увеличение доли кислорода в керогене. Для определения источника кислорода в структуре керогенов необходимо провести дополнительные исследования, которые позволят определить классы органических соединений, содержащих кислород.

Низкие концентрации серы в керогенах западной части ЕХРП также свидетельствуют об отсутствии в осадочном бассейне восстановительных условий при накоплении ОВ и сероводородного заражения в наддонных водах, диагностируемых

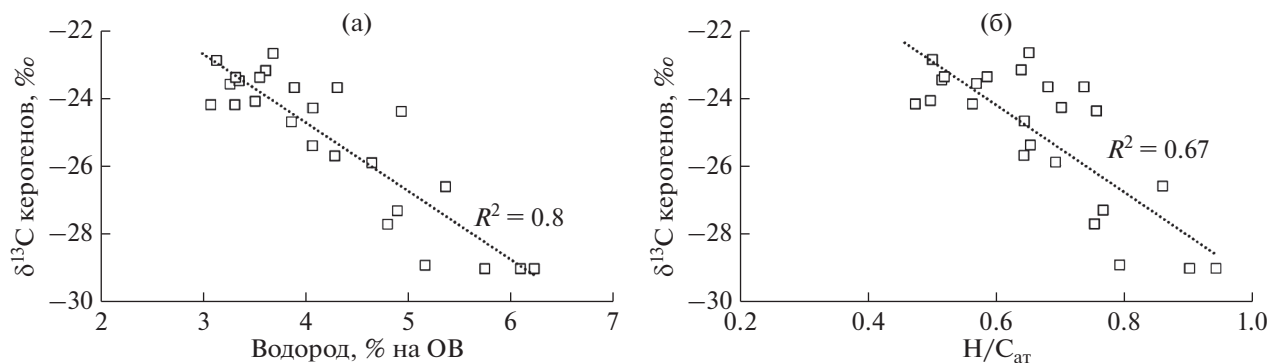


Рис. 5. Зависимости изотопного состава углерода керогенов от содержания водорода (а), величины атомного отношения Н/С (б) керогенов.

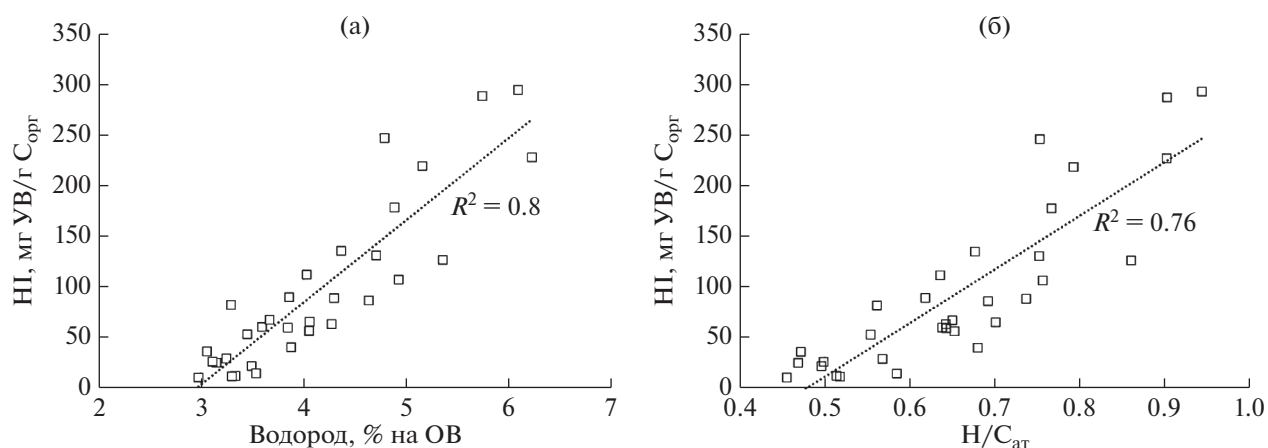


Рис. 6. Зависимости значений HI керогенов от содержания в них водорода (а) и атомного отношения Н/С (б).

в баженовском море в центральной части Западно-Сибирского осадочного бассейна (Конторович, 1967; Брадучан и др., 1986). Сера, образующаяся на стадии захоронения исходного ОВ в результате микробиологического восстановления сульфатов (сульфатредукция), связывалась с ионами железа в практически нерастворимые сульфиды железа, что также привело к уменьшению количества серосодержащих соединений в протокерогене. Содержание пирита в изученных образцах пород составляет 0.6–3.6%.

Изменение относительных концентраций углерода в верхнеюрских керогенах обусловлено, прежде всего, изменением степени преобразованности ОВ и отражает его эволюцию в катагенезе. В процессе катагенеза кероген утрачивает углерод и водород в виде углеводородов, приближаясь по составу к графиту. Увеличение концентраций углерода в верхнеюрских керогенах ЕХРП не сопровождается изменением содержания водорода. Отсутствие значимой зависимости между содержанием водорода в составе керогена и данными отражательной способности витринита, а

также пиролитической температуры T_{max} еще раз подтверждает, что основными причинами, влияющими на концентрацию водорода в изученных керогенах, является состав исходной биомассы и степень его окисленности в седиментогенезе и раннем диагенезе. С ростом зрелости керогена и увеличением концентраций углерода в элементном составе отмечается закономерная потеря кислорода (рис. 7).

Диаграмма Ван Кревелена также отражает трансформацию состава керогенов при возрастании катагенеза. В области низкого катагенеза ($R_{\text{vt}}^{\circ} < 0.6\%$) находятся пробы из скважин Медвежья-316 и Хабейская-2 со слабо преобразованным ОВ, подтвержденным реальными замерами отражательной способности витринита в пробах пород ($R_{\text{vt}}^{\circ} = 0.50\text{--}0.56\%$), а также образец из скв. Дерябинская-9, для которого значение R_{vt}° равно 0.67%. Большая часть изученных керогенов со значениями отражательной способности витринита от 0.62 до 0.83%, а также керогены из сква-

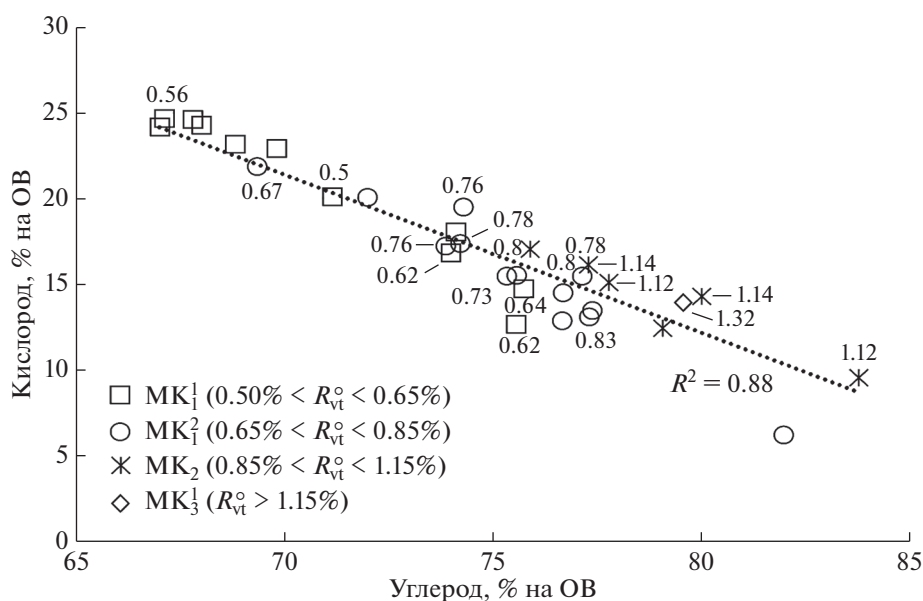


Рис. 7. Зависимость содержания кислорода от концентраций углерода в составе керогенов.

жин Пайяхская-1 ($R_{vt}^o = 1.14\%$) и Туколандо-Вадинская-320 ($R_{vt}^o = 1.12–1.32\%$) находятся в этой области $0.6\% < R_{vt}^o < 1.0\%$. Пробы гольчихинской свиты из скв. Южно-Носковская-318 ($R_{vt}^o = 1.12$) расположены в области со значениями R_{vt}^o выше 1.0% . Определение катагенеза ОВ только с помощью этой модели для керогенов ЕХРП некорректно, хотя в некоторой степени отношение O/C_{at} отражает общую тенденцию преобразования состава керогенов. Это связано с вариабельностью концентраций кислорода в элементном составе НОВ, обусловленное происхождением исходного ОВ и условиями преобразования, несмотря на постепенный рост относительного содержания углерода в керогенах.

Концентрации азота в составе керогенов зависят главным образом от генетического типа ОВ и в процессе катагенеза меняются мало. Азот входит преимущественно в состав аминокислотных составляющих керогена, а его источником служат продукты взаимодействия белковых и углеводных компонентов исходного материала ОВ, а также хитин, входящий в состав экзоскелета (кутикулы) беспозвоночных и клеточной стенки грибов и бактерий (Успенский, Радченко, 1973; Успенский и др., 1977). Основная часть углеводно-белкового материала ОВ претерпевает интенсивный распад в раннем диагенезе, однако часть продуктов его деструкции может сохраняться в керогенах в виде нерастворимых гетероциклических конденсированных структур — гумоидных веществ (гумусоподобных веществ, называемых также сапропелевыми кислотами, меланоидинами и др.). Сохранение гумоидных компонентов в

керогенах происходит благодаря наличию минерального скелета у планктонных организмов, формирующих основную массу ОВ, который может предотвратить разрушение белково-углеводных компонентов в процессе микробного преобразования на стадии седиментации и раннего диагенеза. Повышенные содержания азота ($2.5–4.7\%$ на ОВ), а следовательно, наличие гумоидных компонентов в керогенах верхнеюрских пород северо-востока Западной Сибири, указывает на вклад в состав исходной биомассы ОВ зоопланктонного материала. Для сравнения концентрации азота в керогенах терригенных верхнеюрских (волжский и берриасский ярусы) пород центральной части Западной Сибири составляют $2.1–2.2\%$ на ОВ (Богородская и др., 2005). Петрографическими исследованиями установлено, что аквагенное ОВ ЕХРП обогащено различными зоогенными формами (Данюшевская, 1975), в том числе представляет собой продукты распада радиолярий и фораминифер (Ронкина и др., 1971; Данюшевская, 1975; Столбова, Исаева, 2014).

Аналогично эволюционной характеристике элементного состава керогенов ниже- и среднеюрских терригенных пород ЕХРП, ранее опубликованной Л.И. Богородской с соавторами (Богородская и др., 2005), в настоящей работе для керогенов позднеюрского возраста были посчитаны средние значения элементного состава керогенов для каждой градации катагенеза (табл. 2 и 3).

Изотопный состав углерода керогенов

Определение типа ОВ изученных проб основывалось на значениях изотопного состава углерода. Соотношение стабильных изотопов углеро-

Таблица 2. Эволюционная характеристика элементного состава керогена ниже- и среднеюрских терригенных пород ЕХРП (средние значения на начало градаций катагенеза) (Богородская и др., 2005)

Катагенез	Глубины, м	Элементный состав НОВ, %					Атомные отношения		
		С	Н	N	S	O	H/C	O/C	N/C
МК ₁ ¹	1000–2400	77.0	4.8	2.0	0.8	15.4	0.75	0.15	0.022
МК ₁ ²	2400–3600	80.0	4.7	2.0	0.7	12.6	0.71	0.12	0.021
МК ₂	>3600	85.0	4.6	1.9	0.6	7.9	0.65	0.07	0.019

Таблица 3. Эволюционная характеристика элементного состава керогена верхнеюрских терригенных пород ЕХРП

Катагенез	Глубины, м	Элементный состав НОВ, % на ОВ					Атомные отношения		
		С	Н	N	S	O	H/C _{ат}	O/C _{ат}	N/C _{ат}
МК ₁ ¹	1900–2100	67.0–75.8	3.2–5.7	3.0–4.2	0.4–2.6	12.6–24.6	0.55–0.90	0.13–0.27	0.035–0.054
		70.8	4.1	3.6	1.0	20.6	0.69	0.22	0.044
МК ₁ ²	2800–3300	72.0–83.7	1.9–6.2	1.0–4.7	0.3–3.4	6.2–20.0	0.27–0.94	0.06–0.21	0.011–0.049
		76.8	4.1	3.3	1.2	14.6	0.64	0.14	0.037
МК ₂	>4000	75.9–81.9	3.3–4.3	3.0–3.8	0.0–1.2	12.4–17.0	0.51–0.64	0.12–0.17	0.033–0.043
		78.5	3.7	3.3	0.4	14.9	0.56	0.14	0.036
МК ₃ ¹	>4000	77.8–83.8	3.0–4.6	2.5–3.6	0.0–1.1	9.5–19.2	0.46–0.69	0.09–0.14	0.026–0.040
		80.3	3.6	2.9	0.6	16.6	0.53	0.12	0.031

Примечание. В числителе приведены минимальное и максимальное значение параметра, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

да ($\delta^{13}\text{C}$) для керогенов верхнеюрских пород ЕХРП изменяется от -29.0 до -22.7‰ . Ранее на значительной выборке для баженовской и тюменской свит определено, что значения $\delta^{13}\text{C}$ составляют в аквагенном ОВ $-34\ldots-28\text{‰}$, в террагенном ОВ $-26\ldots-24\text{‰}$ и интервалу $-28\ldots-26\text{‰}$ соответствует ОВ смешанного типа (Голышев и др., 1979; Конторович и др., 1985а, 1985б, 1986). Это указывает на то, что породы верхнеюрских отложений ЕХРП содержат ОВ разных генетических типов. Как было показано ранее для изученной выборки керогенов значения изотопного состава углерода зависят от содержания водорода в составе керогенов (рис. 5), т.е. соотношения липидного и гумусово-гумоидного материалов.

На рис. 2 и 8 видно, что пробы верхних частей гольчихинской свиты (Пеляткинская и Ушаковская площади) и яновстанской свиты (скв. Озерная-10, гл. 3109.5 м) обогащены изотопом углерода ^{12}C ($\delta^{13}\text{C} = -29.0\text{‰}$). Это указывает на сохранность в их протокерогене большей части липидной фракции с легким изотопным составом углерода и преимущественно аквагенный состав ОВ. По сравнению с типично аквагенным ОВ баженовской свиты ($\delta^{13}\text{C} -35\ldots-29\text{‰}$ (Конторович и др., 2019)) значения $\delta^{13}\text{C}$ керогенов верхнеюрских отложений северо-востока Западной Сибири пре-

имущественно морского генезиса являются повышенными (рис. 8). Вероятно, утяжеление изотопного состава углерода (обогащение изотопом ^{13}C) изученных керогенов связано с частичным окислением липидной фракции и незначительным привнесом в состав исходного автохтонного аквагенного ОВ изотопно тяжелых компонентов террагенного ОВ – лигнина и целлюлозы (Конторович и др., 1986) с окружающей суши вместе с терригенными осадками.

Большая часть образцов гольчихинской и яновстанской свит, точинской свиты и одной пробы сивговской свиты обогащены изотопом ^{13}C и характеризуются значениями $\delta^{13}\text{C}$ больше -25.0‰ . В керогенах этих проб, липидная фракция подвергнута сильному химическому разрушению в окислительной обстановке, а изотопный состав углерода наследуется от основных компонентов высшей наземной растительности (лигнина и целлюлозы), участвовавшего в формировании ОВ. Известно, что повышение значений $\delta^{13}\text{C}$ также является следствием вовлечения в состав керогена более изотопно тяжелых гуминовых соединений, образовавшихся в результате взаимодействия углеводных и белковых компонентов исходной биомассы планктона в условиях морской среды по механизму реакции меланоидинообразования (Кодина, Галимов, 1984; Конторович и др., 1985а;

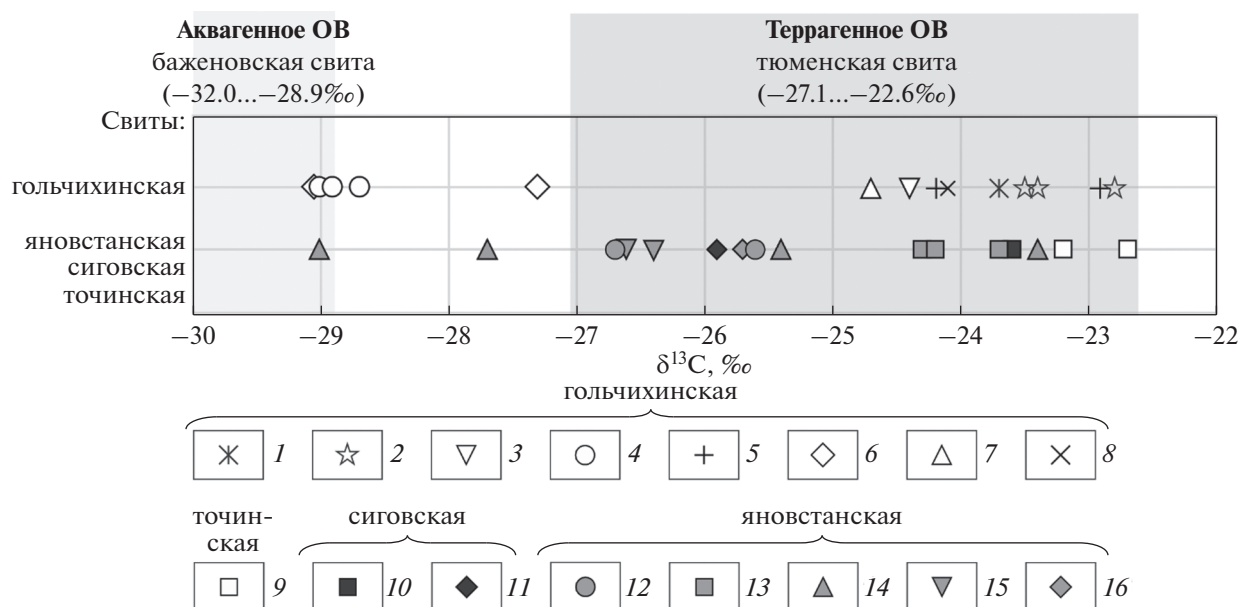


Рис. 8. Изотопный состав углерода керогенов (условные обозначения свит см. рис. 3).

Галимов, 1986). Вероятно, наличие организмов с минеральным скелетом и фоссилизация белково-углеводного комплекса, незначительно повлияли на изменение изотопного состава углерода керогенов.

Для остальных проб, со значениями $\delta^{13}\text{C}$, варьирующими в интервале от -27.7 до -25.4‰ , можно предполагать ОБ смешанного типа, в котором доля липидного (аквагенного) материала увеличивается в сторону облегчения изотопного состава углерода.

Пиролиз керогенов

Пиролиз керогенов верхнеюрских толщ показал, что пробы гольчихинской свиты в скважинах Пеляткинская-15 и Ушаковская-1 и яновстанской свиты в скважине Озерная-10 (инт. 3100–3130 м) имеют относительно высокий остаточный генерационный потенциал ($\text{HI} = 178\text{--}294 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{ан}}$) и смешанный – II/III тип ОБ (рис. 9).

Остальные керогены изученной коллекции находятся в области III типа со значениями водородного индекса меньше $150 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{ан}}$, что свидетельствует об их низком нефтегазогенерационном потенциале. Преобразованные керогены гольчихинской свиты скважин Южно-Носковская-318 и Пайяхская-1 ($T_{\text{max}} > 440^\circ\text{C}$) также характеризуются низкими значениями водородного индекса $11\text{--}25 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{ан}}$. Эти значения показывают, что генерационный потенциал ОБ нижней части гольчихинской свиты в наиболее глубоко погруженных тектонических структурах ЕХРП почти полностью исчерпан. Значения HI ,

равные $29\text{--}82 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{ан}}$, подтверждают низкий исходный нефтегазогенерационный потенциал слабопреобразованных верхнеюрских отложений в периферийной части исследуемого бассейна в скважинах Медвежьей и Хабейской площадей.

В результате корреляции пиролитических параметров для пород и керогенов было определено, что температуры максимального выхода УВ, определяемые при пиролизе керогенов, заметно ниже, чем при пиролизе образцов соответствующих пород. На исследованной коллекции керогенов вариации различий температур T_{max} для керогенов и пород составляют $5\text{--}21^\circ\text{C}$. Выявленную закономерность, вероятно, следует объяснять “эффектом удерживания” (Espitalie, Joubert, 1987; Лопатин, Емец, 1987), когда при крекинге пород происходит частичное удерживание УВ (высокомолекулярные УВ и гетероциклические компоненты) на активной поверхности глинистых минералов, и для пород наблюдается некоторое увеличение значений температуры T_{max} по сравнению с керогенами. По сопоставлению значений T_{max} с результатами определения отражательной способности витринита при углепетрографическом анализе пород были определены граничные значения T_{max} для начала главной зоны нефтеобразования и глубинной зоны газообразования. Значения T_{max} для керогенов из скважин Медвежья-316 и Хабейская-2, зрелость которых соответствует началу мезокатагенеза и только вступает в главную зону нефтеобразования, меньше 430°C . Катагенез керогенов гольчихинской свиты из скважин Южно-Носковская-318 и Пайяхская-1 по значениям параметра T_{max} больше 450°C отвечает концу глав-

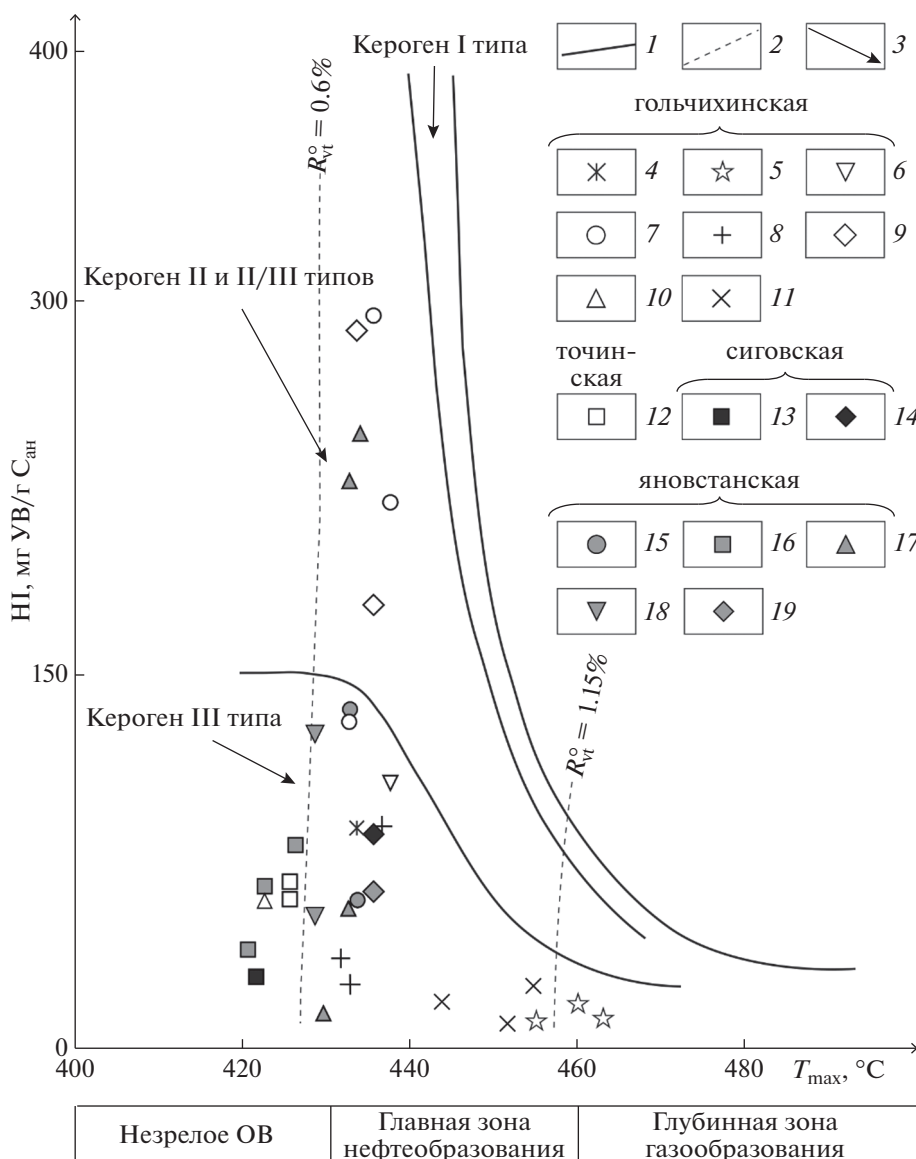


Рис. 9. Диаграмма зависимости водородного индекса (HI) от температуры максимального выхода углеводородов при разрушении керогена ($T_{\max}$) в процессе пиролиза. Условные обозначения: 1 – эволюционные кривые основных типов керогенов; 2 – изолинии приближенных значений отражательной способности витринита; 3 – направленность изменения величин HI и $T_{\max}$ в катагенезе; условные обозначения свит см. рис. 3.

ной зоны нефтеобразования – началу глубинной зоны газообразования. Для остальных изученных керогенов значения температуры $T_{\max}$ при пиролизе керогенов от 430 до 438°C соответствуют главной зоне нефтеобразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализированные керогены верхнеюрских отложений западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба различных генетических типов и на разных стадиях катагенетического преобразования характеризуются пониженными содержаниями водорода и атомного

отношения $H/C_{\text{ат}}$, которые отражают низкое содержание полимерлипидной составляющей керогенов, наследуемой от бактерий и планктона автохтонного аквагенного ОВ. Основными факторами, повлиявшими на потерю не перешедшего в нерастворимую форму липидного материала в докатагенный этап, являются низкий коэффициент фоссилизации и высокий темп разложения исходного материала ОВ в условиях окислительной обстановки, по сравнению с его биологической продукцией, а также биогенное разрушение (анаэробное окисление) в осадке. Для проб, находящихся на этапе главной зоны нефтеобразования, уменьшение концентраций водорода также связано с про-

цессами нефте- и газообразования. Невысокие содержания сероорганических соединений в структуре керогенов подтверждают отсутствие в осадочном бассейне восстановительных условий при накоплении ОВ и низкую интенсивности сульфатредукции.

Большая доля в составе керогенов принадлежит гумусо-гумоидному материалу. Значительное влияние на состав керогенов оказало привнесенное в бассейн с окружающей суши фюзионизированное (окисленное) ОВ высшей наземной растительности и продукты поликонденсации белковых и углеводных компонентов по механизму меланоидинообразования исходного морского живого вещества, из-за которых ОВ верхнеюрских отложений западной части ЕХРП приобрело псевдогумусовый состав. Увеличение содержания азота указывает на вклад в состав исходной биомассы ОВ зоопланктонных организмов с минеральным скелетом.

Было показано, что изотопный состав углерода ОВ зависит от изотопного состава углерода фоссилизированных биохимических компонентов. Керогены, содержащие большее количество конденсированных липидных компонентов (скважины Озерная-10, Пеляткинская-15 и Ушаковская-1), обогащены легким изотопом ^{12}C относительно остальных проб коллекции изученного интервала.

Результаты пиролиза керогенов подтверждают высокий нефтегазогенерационный потенциал ОВ верхней части гольчихинской и яновстанской свит и почти полностью исчерпавшийся потенциал ОВ нижней части гольчихинской свиты. Низкий исходный генерационный потенциал в результате аэробного окисления имеет ОВ верхнеюрских пород в краевых частях (скв. Медвежья-316, Хабейская-2 и Дерябинская-9) ЕХРП.

Работа выполнена при финансовой поддержке научной темы № FWZZ-2022-0011 Государственной программы ФНИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасенков А.П., 1987 Историко-генетические предпосылки нефтегазоносности юрских отложений Енисей-Хатангской нефтегазоносной области. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 395 с.
- Афанасенков А.П., Пороскун В.И., Царев В.В., Евстратова И.А., Луговая О.В., Петров А.Л. (2015) О возможности пропущенных нефтяных оторочках в Гыдано-Хатангской нефтегазоперспективной зоне на примере Дерябинского месторождения. *Геология нефти и газа*. (2), 34-44.
- Брадучан Ю.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А., Гольберт А.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А., Климова И.Г., Козлова Г.Э., Лебедев А.И., Месежников М.С., Нальняева Т.И., Турбина А.С. (1986) *Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность)*. Новосибирск: Наука, 217 с.
- Богородская Л.И. (1986) Методические рекомендации по рациональному комплексу химических методов исследования нерастворимого органического вещества (Под ред. Конторович А.Э.). Новосибирск: СНИИГГиМС, 74 с.
- Богородская Л.И., Соболева Е.И. (1983) Катагенез органического вещества осадочных пород Енисей-Хатангского регионального прогиба. *Геохимические и гидрогеологические предпосылки поисков нефти и газа в Сибири*. Новосибирск: СНИИГГиМС, 60-70.
- Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. (2005) Кероген: Методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск: СО РАН, фил. "Гео", 255 с.
- Войцеховская А.Г. (1974) О составе рассеянного органического вещества в юрских и меловых отложениях Енисей-Хатангского прогиба. *Енисей-Хатангская нефтегазоносная область*. Л., 67-70.
- Галимов Э.М. (1986) Формирование изотопного состава исходного органического вещества морских фаций и диагностика нефтематеринских пород. *Современные геохимические методы диагностики нефтематеринских отложений*. М.: Наука, 19-20.
- Гольшев И.С., Конторович А.Э., Богородская Л.И. (1979) Влияние типа органического вещества и процессов литогенеза на изотопный состав углерода керогенов. *Органическое вещество в современных и ископаемых осадках. Седикахиты: VI Всесоюзный семинар, Москва, 29-31 мая 1979 г.* М.: МГУ, 129.
- Гончаров И.В. (1987) *Геохимия нефтей Западной Сибири*. М.: Недра, 181 с.
- Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В., Кригин В.А., Ошмарин Р.А. (2011) Природа нефтей района Ванкорского месторождения. *Нефтяное хозяйство*. (3), 12-17.
- Данюшевская А.И., Дроздова И.Н., Матвеева В.А., Юдовный Е.Г. (1973) Генезис и геохимические особенности рассеянного органического вещества (РОВ) мезозойских отложений Хатангской впадины. *Состав и происхождение органического вещества осадочных толщ Арктики*. Л.: НИИГА, 26-45.
- Данюшевская А.И., 1975 Геохимия органического вещества мезозойских отложений севера Средней Сибири (теоретические закономерности и прогноз нефтегазообразования). Автореферат дис. ... док. геол.-мин. наук. Л., 57 с.
- Девятков В.П., Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н. (2011) Палеогеография Сибири в юрском периоде на этапах основных перестроек. *Новости палеонтологии и стратиграфии*. (16-17), 87-101.
- Ким Н.С., Родченко А.П. (2013) Органическая геохимия и нефтегазогенерационный потенциал юрских и меловых отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба. *Геология и геофизика*. 54(8), 1236-1252.
- Кодина Л.А., Галимов Э.М. (1984) Формирование изотопного состава углерода органического вещества "гумусового" и "сапропелевого" типов в морских отложениях. *Геохимия*. (11), 1742-1756.
- Конторович А.Э. (1970) Теоретические основы объемно-генетического метода оценки потенциальных ресурсов нефти и газа. *Материалы по геохимии нефтегазоносных бассейнов Сибири*. Новосибирск: СНИИГГиМС, 4-51.

- Конторович А.Э. (1976) *Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности*. М.: Недра, 250 с.
- Конторович А.Э., Бабина Н.М., Богородская Л.И., Винокур Б.Г. (1967) Нефтепроизводящие толщи и условия образования нефти в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. Л.: Недра, 224 с. (Тр. СНИИГГиМС. Сер. нефт. геол.; Вып. 50).
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Борисова Л.С., Бурштейн Л.М., Исмаилов З.Р., Ефимова О.С., Костырева Е.А., Лемина Н.М., Рыжкова С.В., Созинов С.А., Фомин А.Н., Лившиц В.Р. (2019) Геохимия и катагенетические превращения керогена баженовского горизонта. *Геохимия*. 64(6), 585–593.
- Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Borisova L.S., Burshstein L.M., Ismagilov Z.P., Efimova O.S., Kostyrev E.A., Lemina N.M., Ryzhkova S.V., Sozinov S.A., Fomin A.N. (2019) Geochemistry and Catagenetic Transformations of Kerogen from the Bazhenov Horizon. *Geochem. Int.* 57(6), 621–634.
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985а) Закономерности фракционирования изотопов углерода в седикахитах. *Геология и геофизика*. (9), 34–42.
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985б) Распределение стабильных изотопов углерода в седикахитах различной генетической природе. *Геология и геофизика*. (7), 3–11.
- Конторович А.Э., Верховская Н.А., Тимошина И.Д., Фомичев А.С. (1986) Изотопный состав углерода органического вещества и битумоидов и некоторые спорные вопросы теории образования нефти. *Геология и геофизика*. (5), 3–13.
- Конторович А.Э., Гребенюк В.В., Кузнецов Л.Л., Куликов Д.П., Хмелевский В.Б., Азарнов А.Н., Накаряков В.Д., Полякова И.Д., Сибгатуллин В.Г., Соболева Е.И., Старосельцев В.С., Степаненко Г.Ф. (1994) Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 3. Енисей-Хатангский бассейн. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, СНИИГГиМС, 71 с.
- Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. (2013) Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде. *Геология и геофизика*. 54(8), 972–1012.
- Конторович А.Э., Полякова И.Д., Стасова О.Ф., Трушков П.А., Бабина Н.М., Богородская Л.И., Данилова В.П., Зуева Т.В., Колганова М.М., Липницкая Л.Ф., Мельникова В.М., Фомичев А.С. (1974) *Органическая геохимия мезозойских нефтегазоносных отложений Сибири*. М.: Недра, 189 с.
- Конторович А.Э., Полякова И.Д., Трушков П.А., Фомичев А.С., Данюшевская А.И., Казаринов В.В., Парпарова Г.М., Стасова О.Ф., Рогозина Е.А., Шпильман К.А. (1971) Геохимия мезозойских отложений нефтегазоносных бассейнов Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 86 с. (Тр. СНИИГГиМС; Вып. 118).
- Ларичев А.И., Рязанова Т.А., Меленевский В.Н., Сухоручко В.И., Чуйкова Т.Э., Видик С.В., Соловьева Н.С. (2003) Органическая геохимия среднеюрско-нижне-мелового разреза восточного борта Большехетской впадины. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. (11), 4–13.
- Лопатин Н.В., Емец Т.П. (1987) *Пиролиз в нефтегазовой геохимии*. М.: Наука, 144 с.
- Парпарова Г.М., Неручев С.Г. (1977) Основы генетической классификации рассеянного органического вещества пород. *Геология и геофизика*. (5), 45–51.
- Родченко А.П. (2016) Геохимия органического вещества верхнеюрских отложений северо-востока Западной Сибири и генезис меловых нефтей региона. *Геология нефти и газа*. (6), 107–118.
- Ронкина З.З., Колокольцева Е.П., Войцеховская А.Г. (1971) Вещественный состав юрских и меловых отложений. *Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба* (Под ред. Н.Н. Лапиной). Л.: НИИГА, 19–39.
- Соболева Е.И. (1981) Новые данные о составе органического вещества в глинистых породах Енисей-Хатангского регионального прогиба. *Органическая геохимия мезозойских и палеозойских отложений Сибири* Вып. 288. Новосибирск: СНИИГГиМС, 190–195.
- Сороков Д.С. (1971) Органическое вещество юрско-меловых пород. *Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба: сб. ст.* Л., 83–91.
- Столбова Н.Ф., Исаева Е.Р. (2014) Литолого-геохимические особенности отложений яновстанской свиты Ванкорской площади. *Фундаментальные исследования*. (11), 826–831.
- Тиссо Б., Вельте Д. (1981) *Образование и распространение нефти*. М.: Мир, 502 с.
- Успенский В.А., Радченко О.А. (1973) *Опыт оценки нефтематеринского потенциала пород. Современные проблемы геологии и геохимии горючих ископаемых*. Л.: Наука, 49–52.
- Успенский В.А., Радченко О.А., Буланова Н.Ф., Смирнова Н.Б. (1977) Дифференциация ископаемого органического вещества по его химико-вещественному составу и геохимическое значение этой характеристики. *Рассеянное органическое вещество горных пород и методы его изучения* Тр. ИГиГ СО АН СССР; Вып. 334 (Под ред. Конторович А.Э., Успенский В.А.). Новосибирск: Наука, 24–36.
- Филиппов Ю.А., Давыдова И.В., Болдушевская Л.Н., Данилова В.П., Костырева Е.А., Фомин А.Н. (2006) Взаимосвязь материнских пород и нефтей в мезозойских отложениях северо-востока Западно-Сибирской плиты на основе изучения углеводородов-биомаркеров и катагенеза органического вещества. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. (5–6), 52–57.
- Espitalié J., Joubert L. (1987) Use of Tmax as maturation index in petroleum exploration. *Petroleum Geochemistry and Exploration in the Afro-Asian Region* (Eds. Kumar). 67–73.
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005) *The biomarker guide*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1155 p.