

БИОМАРКЕРЫ-ФЕНАНТРЕНЫ В ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ ДОКЕМБРИЙСКИХ И ФАНОРОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ И В НЕФТЯХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.А. Каширцев^{1,2,3}, Т.М. Парфенова^{1,2}, А.К. Головкин¹, Б.Л. Никитенко^{1,2}, И.Н. Зуева³, О.Н. Чалая³

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

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

³Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677890, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия

В основу настоящей работы положены результаты изучения состава и распределения фенантронов (полиароматических углеводородов) хлороформных экстрактов из рассеянного органического вещества (РОВ) глинистых, кремнистых, карбонатных и терригенных пород различного возраста и фациальной принадлежности, а также некоторых нефтей Сибирской платформы.

В работе обсуждаются возможные пути образования фенантроновых углеводородов-биомаркеров.

Изучение фенантронов проводилось с применением хромато-масс-спектрометрии. Установлено, что в ОВ карбонатно-сланцевых формаций венда и кембрия, а также древних нефтях Непско-Ботубинской и Анабарской антеклиз в высоких содержаниях присутствуют 1,7,8-триметилфенантрен и 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен. В органическом веществе континентальных отложений перми и в нефтях Вилуйской синеклизы преобладает ретен (1,7-изопропилфенантрен). На основании оценки распределения фенантроновых биомаркеров предложена тригонограмма для диагностики типа исходного органического вещества пород и типизации генетически связанных с РОВ нефтей.

Органическая геохимия, фенантроны, биомаркеры, битумоид, осадочные породы, нефть, Сибирская платформа.

PHENANTHRENE BIOMARKERS IN THE ORGANIC MATTER OF PRECAMBRIAN AND PHANEROZOIC DEPOSITS AND IN OILS OF THE SIBERIAN PLATFORM

V.A. Kashirtsev, T.M. Parfenova, A.K. Golovko, B.L. Nikitenko, I.N. Zueva, and O.N. Chalaya

The composition and distribution of phenanthrenes (polyaromatic compounds) have been studied in chloroform extracts from dispersed organic matter (OM) of clayey, siliceous, carbonate, and terrigenous rocks of different ages and facies and from some oils of the Siberian Platform. Phenanthrenes have been analyzed by gas chromatography–mass spectrometry. High contents of 1,7,8-trimethylphenanthrene and 1,1,7,8-tetramethyl-1,2,3,4-tetrahydrophenanthrene are present in the OM of Vendian and Cambrian carbonate-shale deposits and in ancient oils of the Nepa–Botuobiya and Anabar anteclises. The OM of Permian continental deposits and oils of the Vilyui syncline is dominated by 1-methyl-7-isopropylphenanthrene (retene). A triangular diagram for identification of the types of original OM of rocks and classification of genetically related oils has been constructed based on the assessment of phenanthrene biomarker distribution. Putative pathways of the formation of phenanthrene biomarkers are discussed.

Organic geochemistry, phenanthrenes, biomarkers, bitumen, sedimentary rocks, oil, Siberian Platform

ВВЕДЕНИЕ

Ароматические углеводороды (УВ) почти не синтезируются живыми организмами и в большинстве своем не являются молекулами-биомаркерами ископаемого органического вещества (ОВ). Вместе с тем состав некоторых ароматических стероидов и терпеноидов, образующихся в диагенезе за счет циклизации и дегидрирования биологических соединений, в ряде случаев позволяет реконструировать их насыщенных и олефиновых предшественников [Peters et al., 2005]. Широко распространенные в ископаемом ОВ трициклические фенантроны могут играть роль «вторичных» биометок. В том числе метилзамещенные фенантроны благодаря различной термодинамической устойчивости изомеров могут быть использованы для расчетов степени катагенетической зрелости рассеянного ОВ и, соответственно, генерированных нефтей [Radke et al., 1986].

Настоящее сообщение посвящено результатам исследований фенантеновых углеводородов в отложениях Сибирской платформы, отличающихся по возрасту и фациям. Цель исследования – выявить те углеводороды, которые в наибольшей степени могут играть роль ароматических биометок, проследить их геологическую историю в разновозрастных нефтях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследования послужили коллекции образцов пород, нефтей и нефтепроявлений Сибирской платформы (табл. 1).

Образцы битуминозно-карбонатной хатыспытской свиты собраны на территории Оленекского поднятия. Строение этих отложений венда и условия среды обитания неопротерозойских организмов опубликованы в ряде работ [Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2010; Рогов и др., 2015; Cui et al., 2016]. Большая коллекция высокоуглеродистых глинистых, карбонатно-глинистых и кремнисто-глинистых пород куонамской свиты и ее аналогов (куонамский комплекс) нижнего, среднего кембрия была собрана авторами в течение многих лет из естественных обнажений и неглубоких поисковых и гидрогеологических скважин на территории востока Сибирской платформы от юго-восточного склона Анабарской антеклизы до северного склона Алданской антеклизы. В опубликованной литературе есть сведения о строении разрезов куонамского комплекса, пиролитических характеристиках пород, насыщенных молекулах-биомаркерах, составе ароматических, серо- и азотсодержащих органических соединений его ОВ [Тектоника и геодинамика..., 2001; Парфенова и др., 2004, 2017; Конторович и др., 2005; Мин и др., 2009; Парфенова, 2017; и др.]. Фенантены ОВ глинистых пород угленосных отложений пермского возраста Вилюйской синеклизы исследованы на коллекции проб из керна скважин Быраканская-2, Средневилюйская-22, -27 [Каширцев и др., 2017]. Изучены фенантены из коллекций глини юрского возраста. Описание разрезов, материалы по биостратиграфии, органической геохимии поздневожских и берриасских глини побережья моря Лаптевых, сведения о палеообстановках осадконакопления юрских и меловых отложений этого региона опубликованы в работах [Никитенко и др., 2015; Каширцев и др., 2018].

Битумоиды экстрагировали из 50-граммовых навесок дробленых до 0.25 мм пород хлороформом при комнатной температуре с применением центрифуги. После очистки экстракта ртутью от элементар-

Таблица 1. Материал для изучения фенантеновых углеводородов битумоидов рассеянного ОВ пород, нефтей и нефтепроявлений Сибирской платформы

Место отбора образцов	Порода	Возраст	Количество образцов
Мальты и ароматические фракции битумоидов ОВ пород			
Оленекское поднятие, обнажения в бассейне р. Хорбусуонка	Известняки, доломиты, глинистые карбонатные породы	Венд, хатыспытская свита	10
Оленекское поднятие, обнажения на реках Муна, Молодо, Малая Куонамка, Чомордах, Расторгуй, Кюленке; скважины участка Сектелях, скв. 6028, скв. Шамай-Терде-2	Аргиллиты, глинисто-кремнисто-карбонатные породы, горючие сланцы	Нижний, средний кембрий, куонамский комплекс	23
Северный склон Алданской антеклизы, Лено-Амгинское междуречье; скважины Хоточу-7, Тит-Эбя-6, Рассолода-8	Известняки, кремни, породы смешанного глинисто-кремнисто-карбонатного состава		15
Вилюйская синеклиза, скважины Средневилюйская-22, -27, Быраканская-2	Аргиллиты, алевролиты угленосных отложений	Верхняя пермь	11
Лено-Анабарский прогиб, обнажения на побережье моря Лаптевых	Глины	Верхняя юра	17
Место отбора образцов	Вмещающая порода	Возраст	Количество образцов
Мальты и ароматические фракции нефтей и нефтепроявлений			
Непско-Ботубинская антеклиза, скважины Среднеботубинская-39, -53, -75	Песчаники	Венд	8
Талаканская-179-76, -179-83, -94 Верхневилочанская-631, Иреляхская-712	Известняки, известняки, доломиты	Кембрий	
Район трубки Удачная, скв. КСС-1	Известняки, доломиты	Кембрий	5
Вилюйская синеклиза, скважины Быраканская-2, Среднетюнгская-227, Западно-Тюнгская-273	Песчаники	Пермь, триас	5

Таблица 2. Идентификация фенантроновых углеводородов по масс-спектральным данным и индексу удерживания [Lee et al., 1979]

№ пика	Индекс удерживания ПАУ	Углеводород	<i>m/z</i>
1	300.0	P (Phenanthrene)	178(M ⁺)
2	324.5	3-MP	192(M ⁺)
3	325.1	2-MP	192(M ⁺)
4	327.9	9-MP	192(M ⁺)
5	328.1	1-MP	192(M ⁺)
6	335.7	EP	206(M ⁺)
7	337.7	2,6-, 2,7-DMP	206(M ⁺)
8	340.0	1,3-,3,9-, 2,10-DMP	206(M ⁺)
9	340.9	1,6-, 2,5-, 2,9-DMP	206(M ⁺)
10	341.8	1,7-DMP	206(M ⁺)
11	343.1	2,3-DMP	206(M ⁺)
12	343.8	1,9-, 4-10-DMP	206(M ⁺)
13	345.3	1,8-DMP	206(M ⁺)
14	348.1	1,2-DMP	206(M ⁺)
15	356.9	TMTGP	223, 238(M ⁺)
16	357.0	1,3,6-,1,3,10, 2,6,10-TMP	220(M ⁺)
17	358.0	1,3,7-, 2,7,9-, 2,6,9-TMP,	220(M ⁺)
18	359.0	1,3,9-, 2,3,6-TMP	220(M ⁺)
19	359.4	1,6,9-, 1,7,9-, 2,3,7-TMP	220(M ⁺)
20	360.5	1,3,8-, 2,3,10-TMP	220(M ⁺)
21	362.5	1,6,7-TMP	220(M ⁺)
22	363.8	1,2,6-TMP	220(M ⁺)
23	366.7	1-M,7-IPP (Retene)	219, 234(M ⁺)
24	369.7	1,7,8 -TMP	220(M ⁺)
25	400.0	CHR (Chrisene)	228(M ⁺)

Примечание. ПАУ — полициклические ароматические углеводороды, P — фенантрен, MP — метилфенантрены, EP—этилфенантрены, DMP — диметилфенантрены, TMP — триметилфенантрены, TMTGP — 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен, 1-M, 7-IPP — 1-метил, 7-изопропилфенантрен (ретен), CHR — хризен.

ной серы петролевым эфиром битумоид делили на мальтены и асфальтены. Далее мальтены некоторых проб разделяли на фракции насыщенных углеводородов, ароматических соединений и смол. Разделение фракций нефтей больше 200 °С проводили по аналогичной методике.

Состав фенантроновых УВ в нефракционированных мальтенах и ароматических фракциях битумоидов и нефтей исследовался в двух геохимических лабораториях (ИПНГ СО РАН и ИНГТ СО РАН) методом хромато-масс-спектрометрии на системе, включающей газовые хроматографы Agilent 6890, имеющие интерфейс с высокоэффективными масс-селективными детекторами Agilent 5973N.

Хроматографы имели идентичные кварцевые капиллярные колонки длиной 30 м, диаметром 0.25 мм, импрегнированные фазой HP-5MS. В качестве газа-носителя служил гелий. Ионизирующее напряжение источника 70 эВ. Хроматограммы УВ были получены по общему ионному току (ГИС), по фрагментным и молекулярно-массовым ионам *m/z* 178, 192, 206, 220, 234 (фенантрены), а также по фрагментным (100 %) ионам *m/z* 219 и M⁺234 (для ретена) и *m/z* 223 и M⁺238 (для дегидрофенантрена). Поскольку исследование коллекций осуществлялось в разных лабораториях на идентичных приборах и капиллярных колонках, но с различными скоростями подъема температуры в термостатах, для сопоставления результатов рассчитывались индексы удерживания индивидуальных ароматических УВ (табл. 2) в соответствии с работой [Lee et al., 1979].

Количественная оценка относительных концентраций фенантроновых УВ проводилась по площадям пиков 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрена (TMTGP, см. табл. 2), 1,7,8-триметилфенантрена (1,7,8-TMP, см. табл. 2) и 1-метил, 7-изопропилфенантрена или ретена (1-M,7-IPP, см. табл. 2). За 100 % принимали сумму этих идентифицированных УВ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследовании хлороформенных экстрактов нефракционированных мальтенов из разновозрастных отложений первые наиболее интересные, на наш взгляд, результаты были получены в пробах кембрийских сланцев куонамского комплекса в районе северного замыкания бассейна. Здесь в разрезах сокращенной мощности (5—20 м) при постоянно высоких содержаниях органического углерода ($C_{\text{орг}} = 12\text{—}21$ мас. %) на масс-хроматограммах мальтенов выделяются два пика А и В (рис. 1) индивидуальных ароматических углеводородов, превышающих по концентрации все другие, в том числе и алифатические соединения. Масс-спектры позволили [Peters et al., 2005, v. 2, p. 591] идентифицировать пик А (m/z 223, M^+ 238) как 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен (ТМТГР, см. табл. 2). Пик В отнесен к 1,7,8-триметилфенантрону (1,7,8-ТМР, см. табл. 2) на основании m/z 220 и индекса удерживания. В литературе отмечено, что оба соединения широко распространены в пермских тасманитовых сланцах [Azevedo et al., 1992; Peters et al., 2005].

Следует отметить, что у C_3 -замещенных фенантронов определить положение метильных заместителей по индивидуальным масс-спектрам представляет достаточно сложную задачу, поскольку существенных различий в характере распада молекул в результате электронного удара не наблюдается. Полный ряд триметилфенантронов может насчитывать до 9 пиков. На масс-хроматограммах особенностью 1,7,8-ТМР является его последнее положение в ряду триметилфенантронов. Мало того, индекс удерживания 1,7,8-ТМР даже выше, чем у ретена (1-М,7-ИРР, см. табл. 2, рис. 2, 3), имеющего в алкильной группе на один атом углерода больше.

Идентификация ретена в ряде проб из вендских и кембрийских пород (см. рис. 2) оказалась достаточно неожиданной. Этот ароматический биомаркер типичен для органического вещества континентальных и прибрежно-морских отложений начиная с каменноугольного периода [van Aarssen et al., 2000; Otto, Simoneit, 2001]. Как правило, он образуется в результате частичной деградации абиетиновой кислоты, основного компонента смол хвойных растений, превращаясь последовательно в ароматические абиетены: симонелит и собственно ретен (рис. 4, IV). Концентрации ретена в мальтенах из докембрийских и раннепалеозойских сланцев невелики, чаще всего на уровне следов. Но там, где есть значимые количества ретена, последний хорошо идентифицируется по фрагментному иону m/z 219 (100 %) и массовому иону m/z 234 (см. рис. 2). Некоторые авторы отмечают, что предшественниками ретена в осадках могут являться и другие источники. В частности, в силурийских карбонатных отложениях Мичиганского бассейна с высокими концентрациями ретена и метилретена происхождение этих УВ связывается с некоторыми видами фитопланктона [Zhang et al., 2001]. Существенные количества ретена были обнаружены в органическом веществе силурийских и девонских отложений Северной Африки [Sarmiento et al., 2010]. Тем не менее среди ароматических (и даже алифатических) биомаркеров ретену принадлежит особая роль при оценке вклада континентальной органики в общий баланс органического вещества осадков различной фациальной принадлежности начиная с позднего палеозоя до настоящего времени.

Предшественниками ТМТГР и 1,7,8-ТМР могут являться различные молекулы-биомаркеры. В пермских тасманитовых сланцах наряду с ТМТГР C_{18} были идентифицированы его гомологи C_{17} , C_{19} и выше, что позволило связать происхождение названных фенантронов (см. рис. 4, I) с ароматизацией и последующей деструкцией трициклических терпеноидов с изопреноидной цепью [Azevedo et al., 1992]. Изучая юрские сланцы с обилием гаммацераана [Sinninghe Damste et al., 1998], исследователи пришли к выводу, что возможным предшественником ТМТГР может быть тетрахиманол, который трансформируется в гаммацерен с последующим разрывом кольца В и ароматизацией трехкольчатого фрагмента (см. рис. 4, II). В нашем случае подобный процесс вполне возможен лишь для вендских битуминозных известняков хатыспытской свиты, ОВ которого обогащено гаммацерааном. Во всех других проанализированных нами коллекциях концентрации гаммацераана выявлены либо в следовых количествах (m/z 191), либо этот биомаркер не обнаружен.

Вполне вероятным вариантом образования ТМТГР C_{18} и 1,7,8-триметилфенантрона в докембрийских и кембрийских сланцах является схема из работы [Bottego et al., 1997]. Согласно этой схеме, названные углеводороды возникают в результате разрыва кольца D в изоарбориноле и последующей ароматизации фрагментов (см. рис. 4, III). Изоарборинол и изоарборинон достаточно широко распространены в ископаемых и современных осадках. В ряде случаев они даже служат индикаторами высокой биопродуктивности озерных и лагунных обстановок [Argino et al., 1972]. Ароматические производные, связанные с изоарборинолом, известны в пермских сланцах Германии и в триасовых черных сланцах Италии [Hauke et al., 1995]. Авторы последней работы обосновывают водорослевое происхождение этих высокоуглеродистых образований. Предшественниками изоарборинола в осадках могут быть и азробные бактерии, поскольку их биосинтез включает энзимы, которые являются промежуточными звеньями между анаэробами прокариотами и аэробами эукариотами [Ourisson et al., 1982].

Для всех проанализированных образцов органического вещества пород различного возраста и фациальной принадлежности выполнена количественная оценка относительных концентраций трех фе-

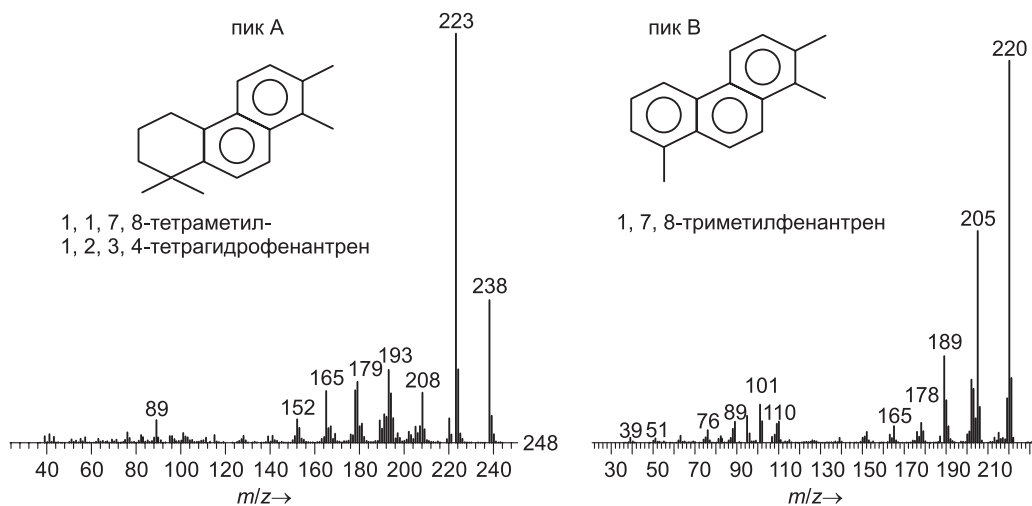
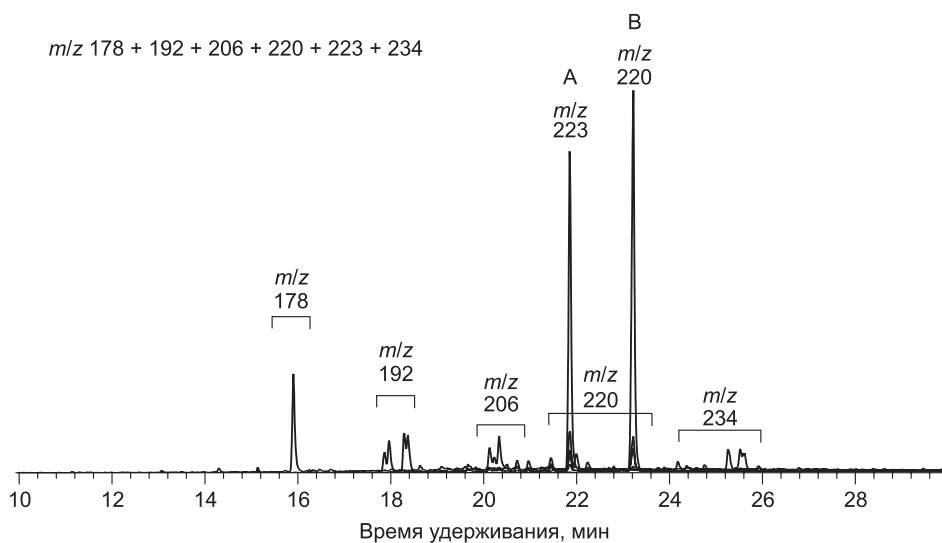
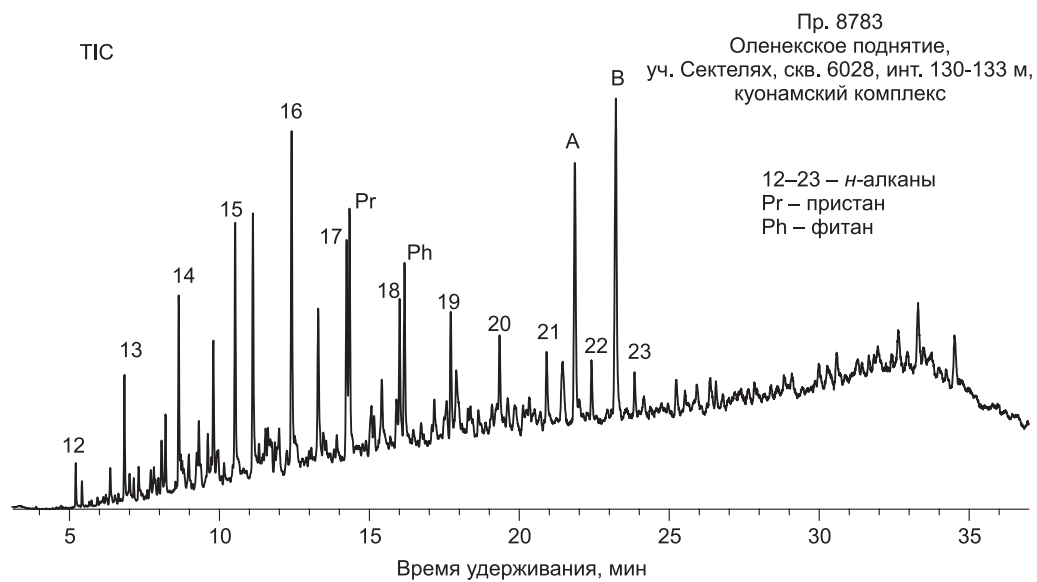


Рис. 1. Масс-хроматограммы по общему ионному току (TIC) и по фрагментным ионам (m/z 178 + 192 + 206 + 220 + 223 + 234) мальтенов из горючих сланцев куонамского комплекса Оленекского поднятия.

Внизу масс-спектры пиков А и В.

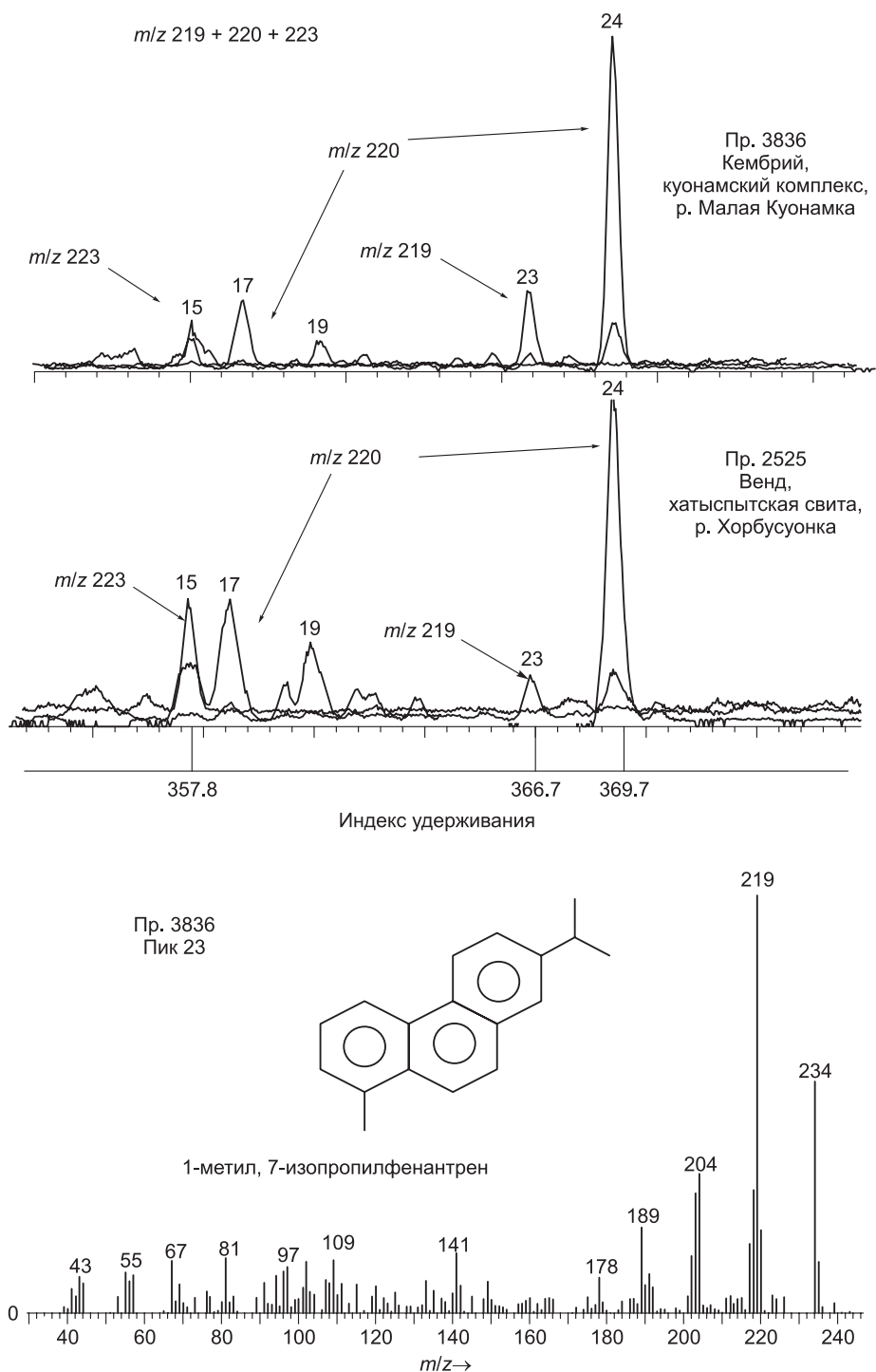


Рис. 2. Фрагменты синтетических масс-хроматограмм (m/z 219 + 220 + 223) ароматических фракций вендских и кембрийских битумоидов.

Внизу масс-спектр пика 23 и структура ретена. Номера пиков соответствуют углеводородам из табл. 2.

нантреновых УВ. Результаты нанесены на тригонограмму (рис. 5, а). Как видно из рисунка, все фенантрены вендских и кембрийских образцов группируются вдоль оси ТМТГР – 1,7,8-ТМР, отражая планктонно-водорослево-бактериальный состав исходного ОВ. В частности, палеоальгологические исследования керогена куонамского комплекса показали, что независимо от литотипов пород (от высокоуглеродистых аргиллитов до кремнистых и карбонатных пород) в них преобладают коллоальгинит и таломоальгинит (синезеленые водоросли *Gloeocapsomorpha*, в настоящее время относятся к бактериям)

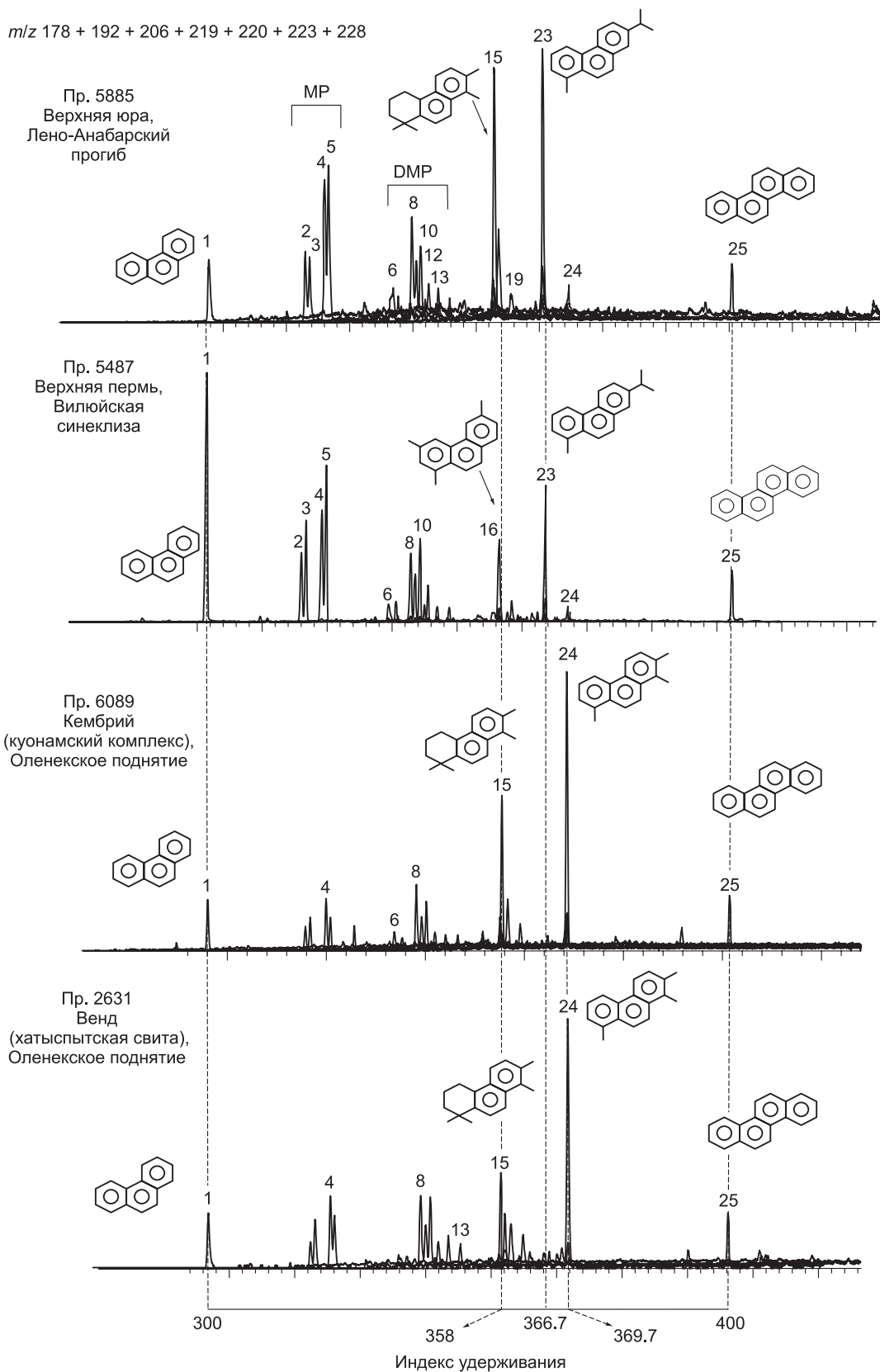


Рис. 3. Синтетические масс-хроматограммы (m/z 178 + 192 + 206 + 220 + 223 + 228) ароматических фракций битумоидов рассеянного ОВ разновозрастных отложений Сибирской платформы.

Номера пиков соответствуют углеводородам из табл. 2.

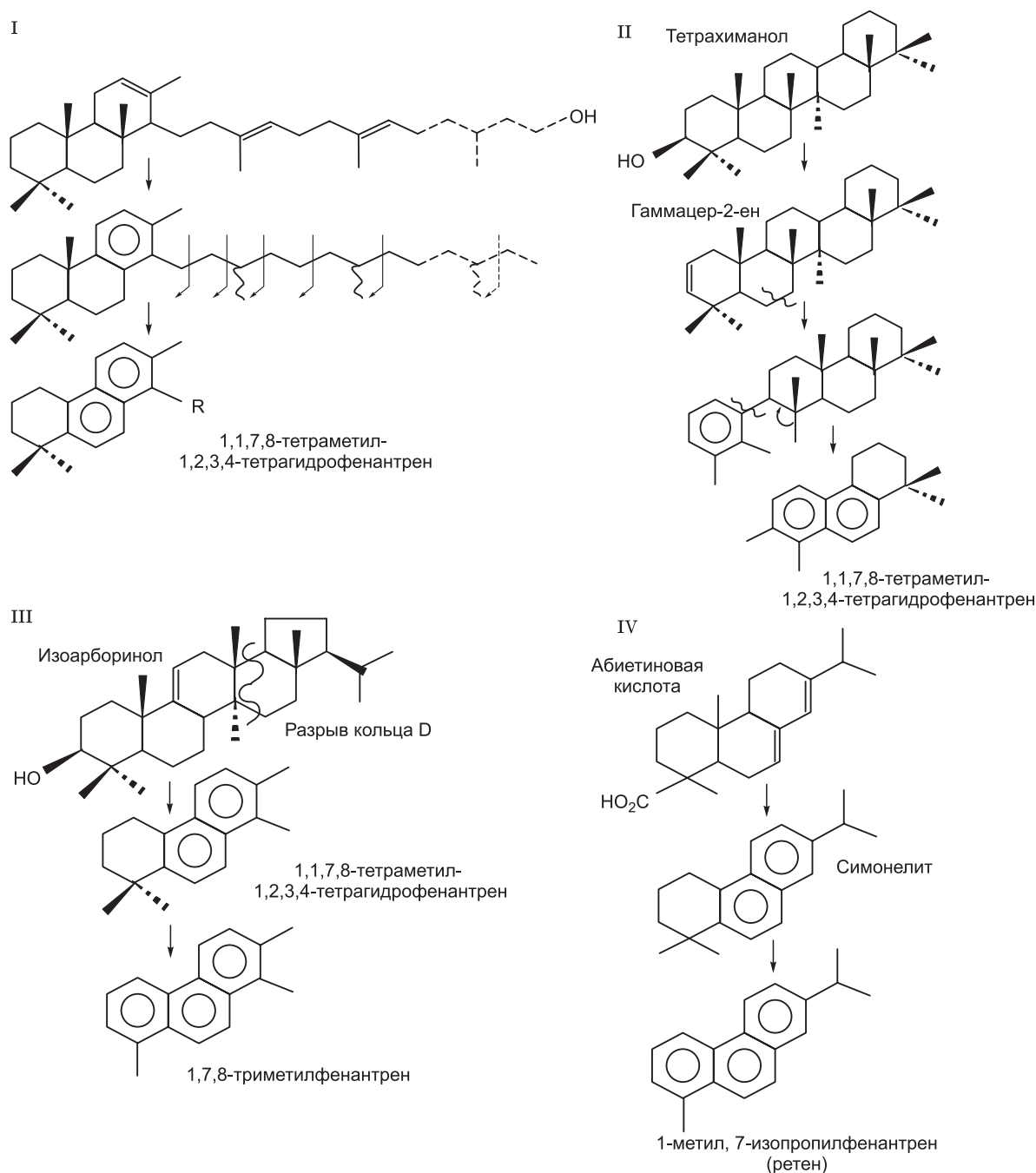


Рис. 4. Возможные пути образования фенантреновых углеводородов-биомаркеров.

I – по [Azevedo et al., 1992]; II – по [Sinninghe Damste et al., 1998]; III – по [Borrego et al., 1997]; IV – по [Otto, Simoneit, 2001].

и празинофиты типа *Tasmanites* [Зуева и др., 1992; Каширцев, 2003]. Как и ожидалось, все фенантреновые УВ битумоидов перми легли в «угол» ретена (1-М,7-ИРР). Установлено, что фенантрены из органического вещества глин верхней юры, сформировавшихся в максимум трансгрессии Сибирского бассейна, обогащены 1,1,7,8-тетрамethyl-1,2,3,4-тетрагидрофенантеном (ТМТГР). В палинокомплексах этого возраста преобладают морские празинофиты и диноцисты. По мере развития регрессивных событий баланс фенантренов последовательно сдвигается в направлении 1-М,7-ИРР (ретена), а в палинокомплексах начинают преобладать папоротниковые, гингговые и хвойные [Каширцев и др., 2018].

Аналогичная тригонограмма (см. рис. 5, б) построена для венд-кембрийских нефтей Непско-Ботубинской антеклизы (Среднеботубинское, Верхневилучанское, Иреляхское, Талаканское месторождения), кембрийских нефтепроявлений южного склона Анабарской антеклизы (кимберлитовая трубка

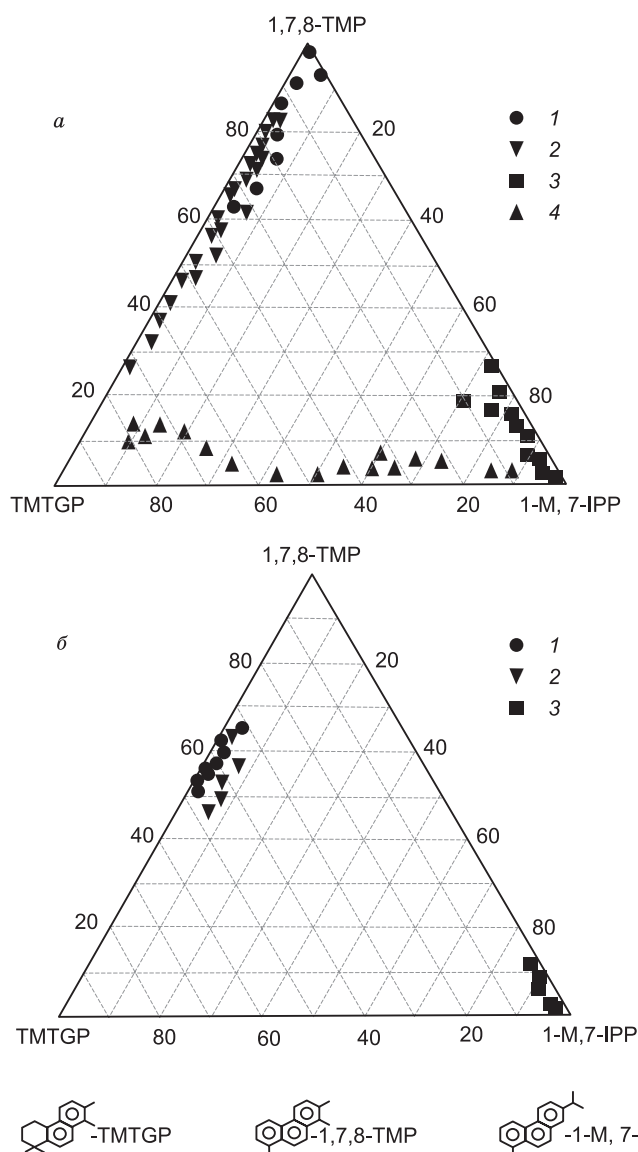


Рис. 5. Тригонограммы распределения фенантренов-биомаркеров в рассеянном органическом веществе (а) и нефтях (б) Сибирской платформы.

а — 1 — венд (хатыспытская свита) Оленекского поднятия, 2 — кембрий (куонамский комплекс) Сибирской платформы, 3 — верхняя пермь Вилюйской синеклизы, 4 — верхняя юра Лено-Анабарского прогиба; б — 1 — нефти Непско-Ботубинской антеклизы, 2 — нефтепроявления района тр. Удачная, 3 — нефти Вилюйской синеклизы.

Удачная, скв. КСС-1), а также пермских и триасовых нефтей Вилюйской синеклизы (Быраканское, Западно-Тюнгское и Среднетюнгское месторождения). Как видно на рисунке, фенантрены-биомаркеры нефтей Непско-Ботубинской антеклизы и Вилюйской синеклизы хорошо разделились по полям, которые характерны для морского и континентального рассеянного органического вещества. Нефти, генетически связанные с юрскими отложениями, на Сибирской платформе пока не обнаружены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше материалы позволяют сделать следующие выводы.

Состав ряда фенантреновых молекул (триметилфенантренов и ретена) хорошо отражает генетические типы морского и континентального ископаемого органического вещества. Эти молекулы могут играть роль «вторичных» биомаркеров в нефтях, генерированных рассеянным органическим веществом различной фациальной (и возрастной) принадлежности.

Работа выполнена при поддержке проектов программы фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. № IX.131.2.1 и РФФ 17-17-01241, 18-17-00038.

ЛИТЕРАТУРА

- Зуева И.Н., Каширцев В.А., Уткина Н.А. Геохимия порфиринов и микроэлементов органического вещества и нафтидов Западной Якутии. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1992, 108 с.
- Каширцев В.А. Органическая геохимия нафтидов востока Сибирской платформы. Якутск, ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003, 160 с.
- Каширцев В.А., Долженко К.В., Фомин А.Н., Конторович А.Э., Шевченко Н.П. Углеводородный состав битумоидов террагенного органического вещества больших глубин (зоны апокатагенеза) // Геология и геофизика, 2017, т. 56 (6), с. 869—879.
- Каширцев В.А., Никитенко Б.Л., Пещевицкая Е.Б., Фурсенко Е.А. Биогеохимия и микрофоссилии верхней юры и нижнего мела Анабарского залива моря Лаптевых // Геология и геофизика, 2018, т. 59, (4), с. 481—501.
- Конторович А.Э., Парфенова Т.М., Иванова Е.Н. Ароматические углеводороды-биомаркеры и дибензотиофены в битумоидах куонамской свиты (северо-восток Сибирской платформы) // ДАН, 2005, т. 402, № 6, с. 804—806.
- Мин Р.С., Сагаченко Т.А., Каширцев В.А., Чалая О.Н., Кучкина А.Ю. Гетероароматические соединения битумоидов горючесланцевой формации кембрия (восток Сибирской платформы) // Нефтехимия, 2009, т. 49, № 6, с. 469—472.

Никитенко Б.Л., Князев В.Г., Пещевецкая Е.Б., Глинских Л.А. Верхняя юра побережья моря Лаптевых: межрегиональные корреляции и палеообстановки // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (8), с. 1496—1519.

Парфенова Т.М. Геохимия серы и сернистых соединений куонамского комплекса нижнего и среднего кембрия (восток Сибирской платформы) // Георесурсы, 2017, № 1, с. 45—51.

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., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Иванова Е.Н., Каширцев В.А., Конторович А.Э. Геохимия органического вещества хатыспытской свиты (венд, северо-восток Сибирской платформы) // Успехи органической геохимии: материалы Всероссийской научной конференции (11—15 октября 2010 г.). Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2010, с. 265—268.

Парфенова Т.М., Коровников И.В., Эдер В.Г., Меленевский В.Н. Органическая геохимия синской свиты нижнего кембрия (северный склон Алданской антеклизы) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 723—738.

Рогов В.И., Карлова Г.А., Марусин В.В., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Гражданкин Д.В. Время формирования первой биостратиграфической зоны венда в сибирском гипостратотипе // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (4), с. 735—747.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., Маик «Наука/Интерпериодика», 2001, 571 с.

Arpino P., Albrecht P., Ourisson G. Studies on the organic constituents of lacustrine Eocene sediments. Possible mechanisms for the formation of some geolipids related to biologically occurring triterpenoids // Advances in organic geochemistry 1971 / Eds. H.R. von Gaertner, H. Wehner. Oxford, Pergamon Press, 1972, p. 173—187.

Azevedo D. A., Aquino Neto F. R., Simoneit B. R. T. and Pinto A. C. Novel series of tricyclic aromatic terpanes characterized in Tasmanian tasmanite // Org. Geochem., 1992, v. 18, p. 9—16.

Borrego A.G., Blanco C.G., Püttmann W. Geochemical significance of the aromatic hydrocarbon distribution in the bitumens of the Puertollano oil shales, Spain // Org. Geochem., 1997, v. 26, p. 219—228.

Cui H., Grazhdankin D.V., Xiao S., Peek S., Rogov V.I., Bykova N.V., Sievers N.E., Liu X.-M., Kaufman A.J. Redox-dependent distribution of early macro-organisms: Evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 2016, v. 461, p. 122—139.

Hauke V., Adam P., Trendel J.-M. Isoarborinol through geological times: evidence for its presence in the Permian and Triassic. // Org. Geochem., 1995, v. 23, p. 91—93.

Lee M.L., Vassilaros D.L., White C.M., Novotny M. Retention indices for programmed-temperature capillary-column gas chromatography of polycyclic aromatic hydrocarbons // Anal. Chem., 1979, v. 51, p. 768—773.

Otto A., Simoneit B.R.D. Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossils and conifer species and sediment from the Eocene Zeitz formation, Saxony Germany // Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, v. 64, p. 3505—3527.

Ourisson G., Albrecht P., Rohmer M. Predictive microbial biochemistry — from molecular fossils to procaryotic membranes // Trends in Biochemical Sciences, 1982, v. 7, p. 236—239.

Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The biomarker guide. Second ed. V. I, II, Cambridge University Press, 2005, 1155 p.

Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type // Org. Geochem., 1986, v. 10, p. 51—63.

Sarmiento M.F.R., Riboulleau A., Vecoli M., Versteegh G.J.M. Occurrence of retene in upper Silurian-Lower-Devonian sediments from North Africa: Origin and implication // Org. Geochem., 2010, v. 41, p. 302—306.

Sinninghe Damste J.S., Koster J., Bass M. A sedimentary tetrahydrophenanthrene derivative of tetrahymanol // Tetrahedron Lett., 1988, v. 40, p. 3949—3952.

van Aarssen B., Alexander R., Kagi R. Higher plant biomarkers reflect paleovegetation changes during Jurassic times // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, v. 65, p. 1417—1424.

Zhang L., Huang D., Liao Z. High concentration retene and methylrene in Silurian carbonate of Michigan Basin // Chinese Sci. Bull., 2001, v. 44, p. 2083—2086.

*Поступила в редакцию
17 января 2018 г.*