

## Изотопный состав изопреноидных хемофоссилий в нефтях и его генетическая интерпретация

**М.Ю. Чудецкий**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: chudetsky@mail.ru

**Аннотация.** В работе проведен анализ феномена скоррелированности изменения изотопного состава углерода хемофоссилий-биомаркеров и расчетного бета-фактора этих фоссилизированных молекул со всеми остальными углеводородными молекулами нефти. Если интерпретировать хемофоссилии с позиции их синтеза в наземных организмах, то указанный феномен доказывал бы единство хемофоссилий-биомаркеров с остальным веществом нефти. В рамках представлений об образовании хемофоссилий микроорганизмами подземной биосферы этот феномен получает альтернативное объяснение, не связанное с наземным биосинтезом, а отражающее закономерности биотрансформации углеводородных флюидов в процессах метаболизма в анаэробных микробиоценозах.

**Ключевые слова:** изотопный состав, микробиальные сообщества, подземная биосфера, биомаркеры, флюиды, биотрансформация.

**Для цитирования:** Чудецкий М.Ю. Изотопный состав изопреноидных хемофоссилий в нефтях и его генетическая интерпретация // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art8>

### Углеводороды нефти и биомасса бактерий как их возможный источник

В последнее десятилетие в органической геохимии работами отечественных микробиологов и нефтехимиков были достигнуты значительные успехи в экспериментальном моделировании процессов образования углеводородов микроорганизмами. Путем термолиза биомассы были смоделированы в лабораторных условиях процессы генерации углеводородов колониями микроорганизмов, относящихся к археям *Thermoplasma archaea* [1]. Отдельно были проведены эксперименты по моделированию образования углеводородов бактериальными микроорганизмами *Geobacillus jurassicus* (по той же методике, также после термолиза их биомассы) и был получен широкий спектр углеводородов, в том числе циклических и ациклических изопреноидов [2].

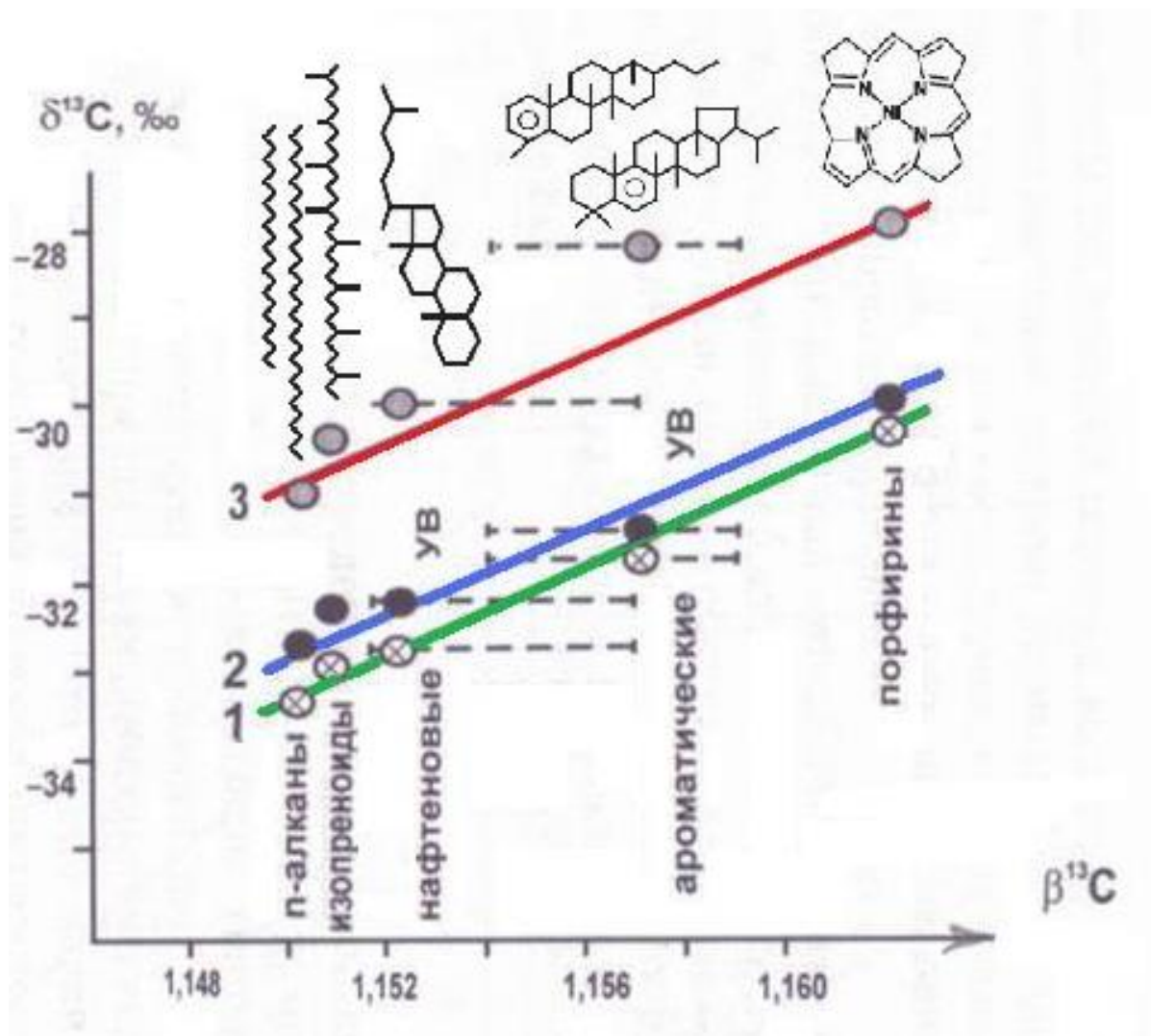
Что касается индивидуального изучения изопреноидных хемофоссилий, то моделированием были охвачены почти все линейные изопреноиды, кроме археола и родственных ему изопреноидов с соединениями звеньев по типу «голова к голове». С целью моделирования процессов образования нефтяных изопреноидов состава  $C_{10}-C_{20}$  проводился термолиз регулярных и нерегулярных изопреноидов состава  $C_{20}-C_{40}$  (фитана,

кроцетана, сквалана и ликопана), а также предполагаемых предшественников регулярных нефтяных изопренанов – фитола и изофитола. Было показано, что в результате термоллиза этих соединений образуются регулярные, нерегулярные и псевдoreгулярные изопренаны. Были выявлены закономерности их распределения и определены индексы удерживания. В частности, эти результаты показали, что к величине отношения пристан/фитан, которое широко используют в нефтяной геохимии, необходимо относиться с большой осторожностью [3].

К сожалению, достигнутые результаты напрямую нельзя практически использовать, так как их трудно связать с теми закономерностями, которые выявлены при геохимическом изучении нефтяных месторождений. Однако геохимиками нефти часто не учитывалась роль микроорганизмов в синтезе углеводородов. Например, зарубежными исследователями широко используются диаграммы или графики Софера (Sofer plot of  $\delta^{13}\text{C}$  values for the saturate and aromatic hydrocarbon fraction in oil samples). Они представляют собой перекрестное сопоставление изотопного состава углерода насыщенных и ароматических углеводородных фракций и подходят для сравнения типов нефтей между разными месторождениями и горизонтами, но для реконструкции источников углеводородов эти показатели оказываются слишком неоднозначными [4].

Значительно более тонким инструментом геохимического анализа являются диаграммы, разработанные Э.М. Галимовым, в которых проводится сопоставление пяти фракций [5]. Выделяют неполярную гексановую фракцию, три фракции возрастающей полярности – гексан-бензольную, бензольную и бензол-метанольную, а также асфальтены и сопоставляют их изотопный состав по углероду. При всех достоинствах этого анализа приходится отметить, что его слабыми сторонами являются плохая сопоставимость с данными по биомаркерам, так как большинство биомаркеров объединяется и сольются в гексановой фракции, а также невозможность учета относительного количественного значения каждой из фракций. Деление на фракции удовлетворительно укладывалось в концепцию переработки биомассы, захороненной наземными организмами, но наличие подземных микроорганизмов создает проблему – биомаркеры захороненной биомассы и новообразованные в залежах становятся неразличимы. В дополнение к вышеописанному анализу Э.М. Галимовым был разработан еще более детальный анализ, совмещающий сопоставление изотопного состава углерода в трех углеводородных фракциях и в двух типах биомаркеров – в изопреноидах и в порфиринах [6]. Этот тип анализа получил

признание в зарубежных работах [7]. Такой подход позволил Э.М. Галимову увидеть и описать важную природную закономерность (рис. 1). Была показана связь изотопного состава углерода нефтяных биомаркеров и углерода углеводородных молекул, представляющих основную массу нефти относительно  $\beta^{13}\text{C}$ -фактора, вычисленного для молекулярной структуры этих молекул.



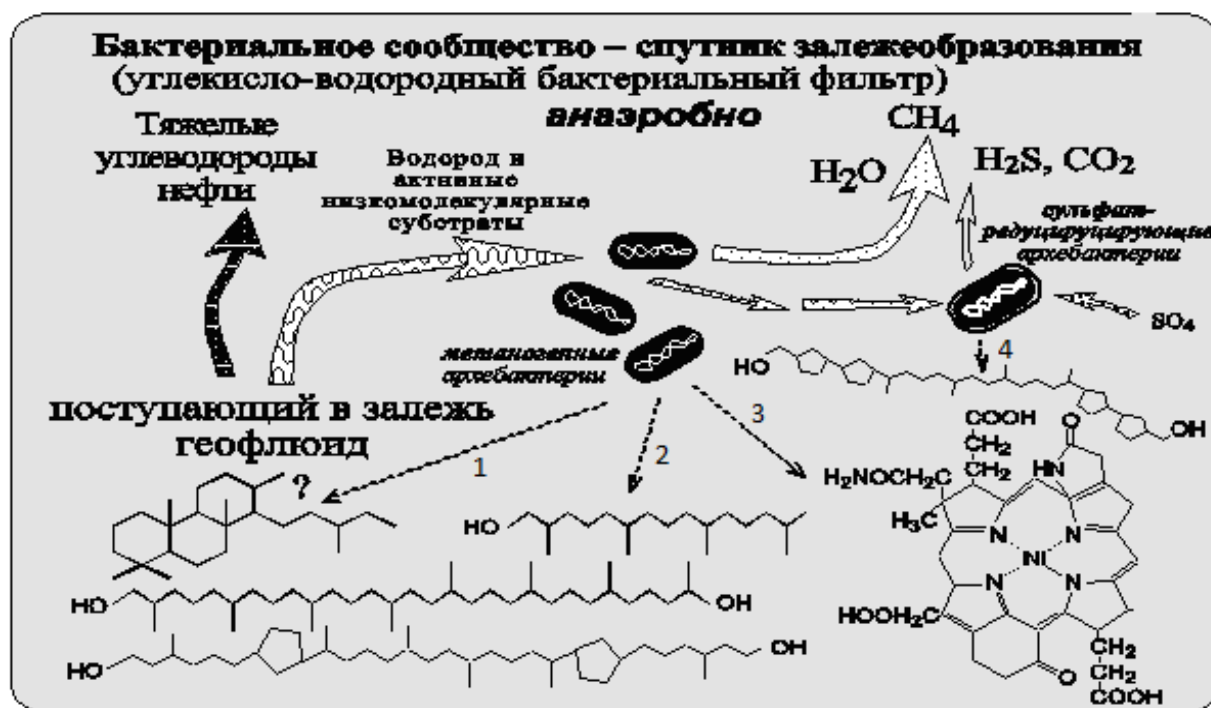
**Рис. 1.** Линии закономерной связи изотопного состава углерода нефтяных биомаркеров и углерода углеводородных молекул, представляющих основную массу нефти относительно  $\beta^{13}\text{C}$ -фактора, вычисленного для молекулярной структуры этих молекул: 1 – Северо-Островское нефтяное месторождение, 2 – Сургутское нефтяное месторождение, 3 – Кокуйское нефтяное месторождение (схема построена по данным, взятым из [6], с изменениями и дополнениями)

Как показано на рис. 1, эта закономерность справедлива для нефтяных месторождений с различным средним изотопным составом нефтяных углеводородов. Примечательно, что без учета биосинтетической роли подземных микроорганизмов эта

закономерность была интерпретирована как серьезное доказательство однозначно биогенного происхождения нефти.

### Жизнедеятельность микробиальных сообществ подземной биосферы и вертикальная зональность нефтей в многопластовых месторождениях углеводородов

Многопластовые нефтяные месторождения могут иметь четко выраженную вертикальную зональность, иметь сокращенную зональность или не обладать зональностью. На наш взгляд, это определяется изменением степени изолированности резервуаров в зависимости от глубины их залегания [8]. Для нижних резервуаров месторождений наиболее вероятно поступление коллекторонаполняющего углеводородного флюида и газов из еще более нижележащих пород. На питательной основе поступающей термодинамически неравновесной смеси может развиваться микробиальное сообщество [9]. В результате происходит формирование нефтей типа  $A^0$  (без участия микроорганизмов) и  $A^1$  или  $A^2$  (при синхронном развитии микробиального сообщества) (рис. 2).



**Рис. 2.** Трофическая цепочка биотрансформации компонентов углеводородного флюида микробиальным сообществом архей – флюидотрофов: 1, 2, 3, 4 – биосинтез прокариотами биомаркеров, характерных для нефтей  $A^1$  и  $A^2$  (1 – трициклический терпан хейлантан, 2 – ациклические изопреноиды и изопреноиды с циклопентановыми кольцами, 3 – порфирин и его гомологи, 4 – фрагменты молекулы кренархеола)

В средней части разреза может происходить поступление вод с окислами серы и железа из близлежащих по напластованию пород и развитие на основе образующегося контакта смеси частично метеорных вод и углеводородов бактериально-архейного сообщества. Совместная жизнедеятельность бактерий и архей приводит к обогащению нефтей полициклическими изопреновыми алканами, поглощению нормальных алканов и приобретению нефтями свойств, характерных для нефтей типа Б<sup>2</sup> (рис. 3).



**Рис. 3.** Трофическая цепочка биodeградации нефтяных углеводородов под действием микробного сообщества нафтенотрофов (бактерий и архей) с попутным привнесением в нефть синхронно биосинтезированных биомаркеров: 1, 2, 3, 4 – биосинтез микробным сообществом биомаркеров, характерных для биodeградируемых нефтей типов Б<sup>2</sup> и Б<sup>1</sup> (1 – стераны, 2 – гопаны, 3 – ациклические изопреноиды, 4 – изо- и антеизонометилалканы)

Нами показано, что для верхних пластов более вероятно поступление поверхностных вод с растворенным кислородом. Только в этих условиях возможна *биodeградация* нефтей, характеризующаяся преобладанием изъятия из состава нефти первичных компонентов, в отличие от предшествующих процессов обогащения нефти новообразованными биосинтезированными соединениями (биотрансформации) в анаэробных условиях. В результате в биodeградируемых нефтях остается не потребляемый бактериями алканоциклический и ароматический остаток, а линейные и разветвленные алканы уничтожаются с образованием изотопно-легкого метана и воды. Таким образом, нефти любого типа могут перерождаться при биodeградации в нефти типа Б<sup>1</sup> [10].

### **Изопреноидные и порфириновые хемофоссилии**

Наибольшей определенностью происхождения среди других молекул-биомаркеров обладают изопреноидные хемофоссилии. Их происхождение доказывает не только уникальная упорядоченная внутримолекулярная структура, но и оптическая активность.

Абиогенное происхождение этих молекул очень маловероятно и без синхронного образования семейства побочных родственных продуктов невозможно. Однако в отношении происхождения этих хемофоссилий необходимо учитывать другие обстоятельства. При их относительно малых количествах в нефти они могут оказаться посторонней, инородной для нефти примесью, и тогда их происхождение и происхождение содержащей их нефти будут заведомо разными. Вполне обоснованы предположения о заимствовании нефтями небольшого количества биомаркеров из рассеянного органического вещества пород. Вероятно, это предположение справедливо для некоторых стеранов.

Цепочечные (ациклические) изопреноидные хемофоссилии наиболее тесно связаны с остальными соединениями нефти. Их абсолютное содержание по массе в нефтях, относимых А.А. Петровым к группе А<sup>2</sup>, доходит до 15% от содержания других углеводородов и закономерно согласовано с общей массой углеводородов.

Первоначально все изопреноиды связывали с высшими растениями. Фитан и пристан считались происходящими от фитола хлорофилла. Их происхождение неразрывно связывали с порфиринами, которые также считали остатками хлорофилла растений. Однако содержание порфиринов и фитана с пристаном в нефти никак не скоррелировано. В микроорганизмах-археях содержание фитана много больше, чем в растениях. Линейные тетратерпеноиды, состоящие из двух фитанолов, состыкованных «голова к голове», были обнаружены в мембранах термофильных архей, с ними вместе находятся дитерпеновые фитаноловые диэфиры. В наибольших количествах бифитаны находят во фракции углеводородов, получаемой при разрушении эфирных связей в керогене осадочных пород. В свободную фракцию должны попадать фрагменты бифитанов, расчлененные по слабому «голова к голове» звену, либо отдельные фитаны. В итоге эти соединения должны образовать смесь пристана и фитана и изопреноидов тяжелее фитана вплоть до сестертерпенов, содержащих 25 атомов углерода. При этом не все, а только метанобразующие археи имеют в своем составе никель, содержащий порфирин F<sub>430</sub> в качестве необходимого фермента.

Подводя итог, можно добавить, что поступающий в залежь химически неравновесный углеводородный флюид, содержащий такие окислители как СО или СО<sub>2</sub> и водородные и углеводородные восстановители, может быть не только исходным компонентом для дальнейшего формирования нефтяных углеводородов, но и достаточной пищей для архей, а в смеси с более сильными окислителями, содержащимися в подземных водах, и для бактерий [10].

#### **Биотрансформация углеводородных флюидов микроорганизмами – флюидотрофами и синтез биомассы из нефтегенерирующего флюида**

Разнообразные процессы трансформации углеводородных флюидов при формировании скоплений углеводородов сопровождаются и биотрансформацией углеводородных флюидов микроорганизмами – флюидотрофами. Выше было обосновано, что основные хемофоссилии, относящиеся к изопреноидному, тритерпеноидному и порфириновому рядам, извлекаемые из углеводородов нефтяных месторождений, синтезируются микроорганизмами подземной биосферы (см. рис. 2 и 3). Наша реконструкция базировалась, во-первых, на анализе трофических (пищевых и метаболических) особенностей микроорганизмов; во-вторых, на вертикальной зональности состава нефтей в многопластовых месторождениях и, в-третьих, на закономерностях изменения изотопного состава хемофоссилий в нефтях. Данная реконструкция была геохимико-биохимической, но ей не хватало микробиологических данных. В последние годы такие данные появились и они органично дополняют и подкрепляют предложенную выше реконструкцию.

1. В работах зарубежных микробиологов были описаны два вида бактерий, синтезирующих гопан и его гомологи в анаэробных условиях нефтяных резервуаров [11]. Анаэробный синтез гопана до этого подвергался сомнению, хотя из приводимых нами данных по геохимии был очевиден.

2. Экспериментальными работами Г.Н. Гордадзе и его сотрудников была доказана возможность формирования углеводородов и биомаркеров из отмершей биомассы микроорганизмов после термального воздействия, причем в зависимости от таксономического состава микроорганизмов, поставляющих биомассу, существенно различались и биомаркеры [1–3].

3. Был проведен сиквенс метагеномов микроорганизмов из нефтедобывающих и нефтеразведочных скважин Томской и Тюменской областей [12]. Эти результаты показали многообразие микробиальных сообществ подземной биосферы и, в частности,

микроокислительные сообщества зубактерий и анаэробные сообщества архебактерий. Ранее существование отдельных, чисто архебактериальных сообществ предсказывалось нами по геохимии биомаркеров, но прямых доказательств не было.

4. Наиболее важным открытием, подтверждающим нашу гипотезу, является выделение Е.А. Бонч-Осмоловской культуры архебактерий-метаногенов из наиболее глубоких горизонтов Самотлорского месторождения, непосредственно связанного с формированием нефтей А<sub>2</sub>. Геологическая позиция биотопа этих микроорганизмов доказывает флюидотрофный характер их питания [13]. Посевы аборигенных микроорганизмов, проведенные в лаборатории Бонч-Осмоловской, показали присутствие именно активного сообщества микроорганизмов-архей на предполагаемой по хемофоссилиям глубине в Самотлорском месторождении. Как указывалось выше, секвенирование метагенома из скважин Западной Сибири выявило резкое различие сообществ микроорганизмов-бактерий окислителей нефти и микроорганизмов-архей геофлюидотрофов, что строго согласуется с положением хемофоссилий согласно нашей схеме. Реконструкция жизнедеятельности микробиального сообщества микроорганизмов-архей – ключ к оценке подтока неравновесного геофлюида в нефтяные резервуары. Отсутствие притока в залежи неравновесных флюидов лишает флюидотрофов питания и микроорганизмы переходят в состояние анабиоза. Накопление в резервуарах линейных изопреноидов, в том числе, тяжелее С<sub>20</sub> (фитана) – признак жизнедеятельности флюидотрофного микробиоценоза. Микробиальные биомаркеры могут быть индикаторами динамики и масштаба поступления углеводородных потоков в коллекторы месторождений.

**Связь изотопного состава углерода нефтяных биомаркеров и углерода углеводородных молекул, представляющих основную массу нефти относительно  $\beta^{13}$ -фактора**

В рамках интерпретации хемофоссилий как следов подземных микроорганизмов получают стройное объяснение многие особенности распределения биомаркеров. Важнейший из них (феномен Э.М. Галимова) – закономерное изменение изотопного состава биомаркеров. Этот феномен заключается в закономерной корреляции расчетного бета-фактора молекул-хемофоссилий, вычисленного для молекулярной структуры этих молекул и их изотопного, по углероду, состава (см. рис. 1). Если интерпретировать хемофоссилии с позиции их синтеза в наземных организмах, то этот феномен доказывал бы единство захороненной отмершей биомассы наземных организмов с остальным



веществом нефти (иногда говорят: единство биомаркеров с «телом нефти»). Еще раз рассмотрим график. Особенности изотопного состава биомаркеров (изопреноидов и порфиринов), показанные на графике, указывают на генетическое единство биомаркеров и окружающих их углеводородов (*n*-алканов, нафтен, ароматических углеводородов). Это не позволяет предполагать, что биомаркеры были заимствованы углеводородами нефти из рассеянного органического вещества окружающих пород. В рамках новой интерпретации этот феномен получает альтернативное объяснение, не связанное с наземным биосинтезом и захоронением отмершей биомассы в виде рассеянного органического вещества. Если мы предполагаем, что представленные хемофоссилии синтезировались подземными микроорганизмами *in-situ* из исходного флюида, то при таком биосинтезе бета-фактор хемофоссилий будет согласован с остальным веществом нефти. В этой интерпретации феномен, открытый Э.М. Галимовым, подтверждает подземную жизнедеятельность микроорганизмов и протекание процессов биотрансформации углеводородных флюидов. С другой стороны, такая закономерность четко согласуется с синтезом биомаркеров микроорганизмами – флюидотрофами в процессе их жизнедеятельности в резервуарах (в ходе заполнения резервуаров неравновесным углеводородным флюидом).

Помимо генетического, реконструкция подземных микробиоценозов имеет и еще одно неожиданное практическое значение. В последние десятилетия усиливается интерес к подземным хранилищам газа, причем не только углеводородных газов, но и водорода. В Западной Европе он рассматривается как аккумулятор для временного хранения избытков электроэнергии. В этой связи становится актуальной реконструкция систем питания микроорганизмов подземной биосферы, которые являются поедателями и биотрансформаторами газов (флюидотрофами), циркулирующих в подземных резервуарах.

Знание особенностей подземных микробиальных сообществ позволяет разрабатывать эффективные методы подавления нежелательной жизнедеятельности бактерий-газотрофов антибактериальными средствами. Изложенные результаты получены на основании расшифрованного по биомаркерам механизма симбиотического потребления микроорганизмами подземной биосферы неравновесных геофлюидов на нижних этажах многопластовых месторождений.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой*

промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

### Литература

1. Гордадзе Г.Н., Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Первалова А.А. и др. Образование углеводородов нефти из биомассы прокариот. Сообщение. 1. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы архей *Thermoplasma* sp // Нефтехимия. 2018. Т. 58, № 2. С. 137–141. <https://doi.org/10.7868/S0028242118020041>
2. Гордадзе Г.Н., Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Первалова А.А. и др. Образование углеводородов нефти из биомассы прокариот. Сообщение 2. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы бактерий *Geobacillus jurassicus*, выделенных из нефти // Нефтехимия. 2018. Т. 58, № 6. С. 657–664. <https://doi.org/10.1134/S0028242118060035>
3. Гордадзе Г.Н., Гируц М.В., Пошибаева А.Р., Кошелев В.Н. Особенности формирования регулярных изопренанов C<sub>10</sub>–C<sub>20</sub> нефти // Нефтехимия. 2016. Т. 56, № 5. С. 443–447. <https://doi.org/10.7868/S0028242116050075>
4. Sofer Z. Stable carbon isotope compositions of crude oils: application to source deposition environments and petroleum alteration // AAPG Bull. 1984. Vol. 68. P. 31–49.
5. Galimov E.M. Isotope organic geochemistry // Organic Geochemistry. 2006. Vol. 37. P. 1200–1262. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.04.009>
6. Галимов Э.М. Кому нужны лунные камни? Выступления, интервью, научно-популярные публикации. 50 лет в науке. М.: КРАСАНД, 2012. 578 с.
7. Pedersen J., Backer-Owe K., Karlsen D., Lie J. The geochemistry of two unusual oils from the Norwegian North Sea: implications for new source rock and play scenario // Petroleum Geoscience. 2006. Vol. 12. P. 85–96. <https://doi.org/10.1144/1354-079305-658>
8. Чудецкий М.Ю. Использование микробиальных биомаркеров для реконструкции образования нефтегазовых залежей // Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы развития: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, 12–14 ноября 2013 года, г. Москва. М.: ГЕОС, 2013. С. 283–285.
9. Dibrova D.V., Chudetsky M.Y., Galperin M.Y., Mulkidjanian A.Y. The role of energy in the emergence of biology from chemistry origins of life and evolution of biospheres // The Journal of the International Astrobiology Society. 2012, Oct. Vol. 42, No. 5. P. 459–468.

10. Чудецкий М.Ю. Особенности геохимии нефтяных залежей, необъяснимые без учета жизнедеятельности микроорганизмов подземной биосферы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3(22). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art42>

11. Machel H.G., Foght J. Products and depth limits of microbial activity in petroliferous subsurface settings // Microbial sediments / Ed. by R.E. Riding., S.M. Awramik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. P. 105–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2_13)

12. Гаврилов С.Н., Франк Ю.А., Кадников В.В. и др. Характеристика микробного сообщества западносибирского глубинного термального горизонта по результатам пятилетнего мониторинга // Ежегодная научная конференции Федерального исследовательского центра «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, 14–16 февраля 2017 года, г. Москва: Тез. докл. М., 2017. С. 37.

13. Бонч-Осмоловская Е.А. Высокотемпературные глубинные микробиальные сообщества – возможный аналог древнейших экосистем // Проблемы происхождения жизни: Сб. ст. М.: ПИН РАН, 2009. С. 52–57.

## Isotopic composition of isoprenoid chemophosils in oil and its genetic interpretation

**M.Yu. Chudetsky**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: [chudetsky@mail.ru](mailto:chudetsky@mail.ru)

**Abstract.** The paper analyzes the phenomenon of correlation of changes in the carbon isotopic composition of biomarkers and the calculated beta factor of these fossilized molecules with all other hydrocarbon oil molecules. If we interpret chemofossils from the position of their synthesis in terrestrial organisms, then this phenomenon would prove the unity of chemofossils biomarkers with the rest of the oil substance. In the framework of the concept of the formation of chemofossils by the microorganisms of the underground biosphere, this phenomenon receives an alternative explanation, not related to terrestrial biosynthesis, but reflecting the patterns of biotransformation of hydrocarbon fluids in metabolic processes in anaerobic microbiocenoses.

**Keywords:** isotopic composition, microbial communities, underground biosphere, biomarkers, fluids, degassing.

**Citation:** Chudetsky M.Yu. Isotopic composition of isoprenoid chemophosils in oil and its genetic interpretation // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art8> (In Russ.).

### References

1. Gordadze G.N., Poshibaeva A.R., Giruts M.V. et al. Formation of petroleum hydrocarbons from prokaryote biomass: 1. Formation of petroleum biomarker hydrocarbons from thermoplasma archaea biomas // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58, No. 3. P. 186–189. <https://doi.org/10.1134/S096554411803009X>
2. Gordadze G.N., Poshibaeva A.R., Giruts M.V. et al. Formation of petroleum hydrocarbons from prokaryote biomass: 2. Formation of petroleum hydrocarbon biomarkers from biomass of *Geobacillus jurassicus* bacteria isolated from crude oil // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58, No. 12. P. 1005–1012. <https://doi.org/10.1134/S0965544118120034>
3. Gordadze G.N., Giruts M.V., Poshibaeva A.R., Koshelev V.N. The formation features of C<sub>10</sub>–C<sub>20</sub> regular petroleum isoprenanes // Petroleum Chemistry. 2016. Vol. 56, No. 8. P. 672–676. <https://doi.org/10.1134/S0965544116080077>
4. Sofer Z. Stable carbon isotope compositions of crude oils: application to source deposition environments and petroleum alteration // AAPG Bull. 1984. Vol. 68. P. 31–49.
5. Galimov E.M. Isotope organic geochemistry // Organic Geochemistry. 2006. Vol. 37. P. 1200–1262. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.04.009>

6. *Galimov E.M.* Who needs moonstones? Speeches, interviews, popular science publications. 50 years in science. Moscow: KRASAND, 2012. 578 p. (In Russ.).
7. *Pedersen J., Backer-Owe K., Karlsen D., Lie J.* The geochemistry of two unusual oils from the Norwegian North Sea: implications for new source rock and play scenario // *Petroleum Geoscience*. 2006. Vol. 12. P. 85–96. <https://doi.org/10.1144/1354-079305-658>
8. *Chudetsky M.Yu.* The use of microbial biomarkers for reconstructing the formation of oil and gas deposits // *Unconventional hydrocarbon resources: distribution, genesis, forecasts, development prospects: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*, November 12–14, 2013, Moscow. Moscow: GEOS, 2013. P. 283–285. (In Russ.).
9. *Dibrova D.V., Chudetsky M.Y., Galperin M.Y., Mulkidjanian A.Y.* The role of energy in the emergence of biology from chemistry origins of life and evolution of biospheres // *The Journal of the International Astrobiology Society*. 2012, Oct. Vol. 42, No. 5. P. 459–468.
10. *Chudetsky M.Yu.* Features of the geochemistry of oil deposits, inexplicable without taking into account the vital activity of microorganisms in the underground biosphere // *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018. Iss. 3(22). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art42> (In Russ.).
11. *Machel H.G., Foght J.* Products and depth limits of microbial activity in petroliferous subsurface settings // *Microbial sediments* / Ed. by R.E. Riding., S.M. Awramik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. P. 105–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2_13)
12. *Gavrilov S.N., Frank Yu.A., Kadnikov V.V. et al.* Characterization of the microbial community of the West Siberian deep thermal horizon based on the results of five-year monitoring // *Annual Scientific Conference of the Fundamentals of Biotechnology Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences*, February 14–16, 2017, Moscow: Abstracts. Moscow, 2017. P. 37. (In Russ.).
13. *Bonch-Osmolovskaya E.A.* High temperature deep microbial communities – a possible analogue of ancient ecosystems // *Origin of life issues: Collected papers*. Moscow: PIN RAS, 2009. P. 52–57. (In Russ.).