

УДК 547.912(571.51)+553.98

ПРОКАРИОТЫ КАК ИСТОЧНИК НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ-БИОМАРКЕРОВ

© 2021 г. А. А. Юсупова¹, М. В. Гируц¹, Г. Н. Гордадзе^{1,*}

Представлено академиком РАН А.Э. Конторовичем 27.11.2020 г.

Поступило 27.11.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принято к публикации 11.12.2020 г.

Представлены закономерности распределения алифатических и циклических нефтяных углеводородов-биомаркеров в различных индивидуальных прокариотах и их сообществах, в частности: индивидуальных бактериях — *Arthrobacter* sp. RV, *Pseudomonas aeruginosa* RM, *Spirulina (Arthrospira) platensis*, индивидуальных бактериях, выделенных из нефтяного месторождения Даган (КНР) — *Geobacillus jurassicus* и *Shewanella putrefaciens*, индивидуальных археях (*Thermoplasma* sp.), микробных сообществах, выделенных из источника Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон (Камчатка, Россия) и реликтов циано-бактериальных матов, выделенных из карбонатных пород-коллекторов нижнего кембрия месторождения Ичединское (Восточная Сибирь). Показано, что исследуемые бактерии и археи вносят различный вклад в образование углеводородов-биомаркеров нефти. В частности, показано, что нефтепроявление Нефтяной площадки кальдеры Узон (Камчатка) и докембрийская нефть месторождения Ичединское (Восточная Сибирь) образовались из прокариот.

Ключевые слова: происхождение нефти, углеводороды-биомаркеры, n-алканы, изопренаны, стераны, терпаны, прокариоты, бактерии, археи

DOI: 10.31857/S2686739721030130

В образовании углеводородов (УВ) нефти основное внимание уделяется животным, растениям и грибам (эукариотам). Прокариотам (бактериям и археям) уделяется роль лишь в начальном этапе преобразования биомассы эукариот [1, 2].

Известно, что кероген (нерастворимое органическое вещество — геобиополимер) породы содержит все углеводородные фрагменты, которые находятся в нефтях [3–5]. Как показали наши исследования, аналогично эукариотам, в растворимой части и продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы прокариот также образуются нефтяные алифатические и циклические УВ-биомаркеры [6–8].

Моделирование процессов нефтеобразования из прокариот имеет большое теоретическое значение с точки зрения происхождения нефти, а также практическое — с точки зрения поисков нефтяных месторождений и возобновления запасов нефти [3].

Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа распределения нефтяных УВ-биомаркеров на молекулярном уровне как в растворимой части, так и в продуктах термолитиза нерастворимой части (керогена) различных прокариот (бактерий и архей) и их сообществ.

В качестве объектов исследования были выбраны:

1. Индивидуальные бактерии — *Arthrobacter* sp. RV, *Pseudomonas aeruginosa* RM, *Spirulina (Arthrospira) platensis* (сине-зеленая прокариотическая микроводоросль (цианобактерия), интенсивно развивающаяся в богатых карбонатами и гидрокарбонатами тропических и субтропических водах) [8].

2. Индивидуальные бактерии, выделенные из нефтяного месторождения Даган (КНР) — *Geobacillus jurassicus*¹ и *Shewanella putrefaciens* [7, 9].

3. Индивидуальные археи (*Thermoplasma* sp.) и микробные сообщества, выделенные из источника Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон (Камчатка, Россия) [5].

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

*E-mail: gordadze@rambler.ru

¹ Бактерии были предоставлены зав. лабораторией Нефтяной микробиологии института микробиологии им. С.Н. Виноградского Т.Н. Назиной.

Таблица 1. Геохимическая характеристика в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части различных прокариот по n-алканам и изопренам в нефтях и нефтепроявлении

Обр. №	Образец	прис-тан/фитан		пристан/n-C ₁₇		фитан/n-C ₁₈		(пристан+ фитан)/(n-C ₁₇ + n-C ₁₈)		K ¹ _{нечет.}		K ² _{нечет.}	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Индивидуальные бактерии													
1	<i>Arthrobacter</i> sp. RV	0.50	1.0	0.50	0.04	1.00	0.08	0.75	0.05	0.56	1.49	1.5	1.16
2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> RM	0.42	0.83	0.45	0.06	0.86	0.13	0.66	0.08	0.44	1.48	1.54	1.50
3	<i>Spirulina platensis</i>	1.10	0.38	0.05	0.15	0.53	21.00	0.09	0.55	2.76	2.77	1.45	4.21
Индивидуальные бактерии, выделенные из нефтяного месторождения Даган (КНР)													
4	<i>Geobacillus jurassicus</i>	0.81	0.98	0.24	0.60	0.09	0.41	0.12	0.49	0.17	0.53	0.17	1.36
5	<i>Shewanella putrefaciens</i>	0.92	0.94	0.58	0.56	0.50	0.60	0.53	0.58	0.52	0.87	1.44	2.69
6	Нефть м-ния Даган	1.05		1.33		1.58		1.44		0.87		3.36	
Индивидуальные археи и микробные сообщества, выделенные из источника Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон													
7	<i>Thermoplasma</i> sp.	0.71	0.82	0.60	0.85	0.28	1.04	0.36	0.95	0.82	0.77	1.67	1.21
8	Микробные сообщества (среднее)	0.51	0.59	1.58	0.78	1.95	1.10	1.82	1.06	0.80	0.75	1.74	1.41
9	Нефтепроявления	0.53		1.35		1.46		1.53		0.71		1.63	
Реликты циано-бактериальных матов (ЦБМ), выделенные из коллектора нижнего кембрия (осинский горизонт)													
10	Реликты ЦБМ	0.75	0.81	0.29	0.34	0.70	0.55	0.44	0.43	1.59	1.09	1.36	1.42
11	Нефть осинского горизонта	0.83		0.39		0.74		0.52		1.42		1.19	

Примечание. **1** – растворимая часть, **2** – термоллиз; $K^1_{нечет.} = (n-C_{13} + n-C_{15} + n-C_{17} + n-C_{19} + n-C_{21}) / (n-C_{14} + n-C_{16} + n-C_{18} + n-C_{20} + n-C_{22})$; $K^2_{нечет.} = (n-C_{25} + n-C_{27} + n-C_{29} + n-C_{31} + n-C_{33}) / (n-C_{26} + n-C_{28} + n-C_{30} + n-C_{32} + n-C_{34})$.

4. Реликты циано-бактериальных матов (ЦБМ), выделенные из коллектора нижнего кембрия (осинский горизонт) Восточной Сибири [10–15].

Для всех вышеуказанных бактерий и архей изучали закономерности распределения нефтяных углеводородов-биомаркеров (n-алканов, изопренов, стеранов и терпанов) в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части. Биомассу исследуемых бактерий лиофилизировали при температуре 25°C, давлении $10 \cdot 10^{-7}$ МПа, в течение 24 ч. Экстракцию лиофильной биомассы исследуемых бактерий проводили при комнатной температуре n-гексаном, предварительно перегнанным на ректификационной колонке. Растворимую часть бактерии отбирали через 40 и 60 ч. Экстракцию проводили до полного исчезновения экстрагируемых веществ. Термоллиз нерастворимой части биомассы бактерий и асфальтенов проводили в одинаковых условиях, при температуре 330°C в запаянной ампуле.

Анализ углеводородов проводили методами газожидкостной хроматографии (ГЖХ) и хромато-масс-спектрометрии (ГХМС).

В табл. 1 представлена геохимическая характеристика в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части различных прокариот по n-алканам. Здесь же представлены результаты анализа УВ нефтей м-ния Даган (КНР) и нижнекембрийской нефти осинского горизонта (Восточная Сибирь) и нефтепроявлений кальдеры вулкана Узон (Камчатка).

Прежде всего необходимо отметить, что во всех случаях, как в растворимой части, так и в продуктах термоллиза нерастворимой части прокариот наблюдается гомологический ряд n-алканов состава C₁₀–C₄₀ (гомологический ряд n-алканов характерен для всех нефтей). Вместе с тем их относительное содержание во всех случаях значительно отличается между собой. Так, в образце № 4 *Geobacillus jurassicus* наблюдаются anomalно высокие значения четных n-алканов состава C₁₆–

C_{38} (такие высокие значения не наблюдаются ни в одной нефти мира). А в термолизате этого образца превалируют только четные n -алканы C_{16} , C_{18} , C_{20} над нечетными C_{15} , C_{17} и C_{19} . В нефти м-ния Даган, из которой были выделены бактерии *Geobacillus jurassicus*, значительно преобладают нечетные n -алканы над четными. Превалирование низкомолекулярных четных n -алканов над нечетными характерно и для других прокариот. Коэффициент нечетности варьирует в пределах 0.17–0.80, за исключением *Spirulina platensis* (обр. № 3) $K^{\text{нечет.}} = 2.76$ и образца № 10, где $K^{\text{нечет.}} = 1.59$ (табл. 1).

Интересно отметить, что величина генетического показателя пристана к фитану во всех образцах довольно низкая и варьирует в пределах 0.38–1.10. Такая низкая величина характерна для нефтей морского генезиса. Кроме того, за исключением *Arthrobacter* sp. RV (обр. № 1) и *Pseudomonas aeruginosa* RM (обр. № 2) во всех случаях наблюдается образование нерегулярного непредельного изопрена – сквалена (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракоза-2,6,10,14,18,22-гексаен), гидрированный аналог которого – сквалан (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракозан) находится в некоторых нефтях морского генезиса.

В отличие от распределения n -алканов и изопренов в растворимой части *Arthrobacter* sp., *Pseudomonas aeruginosa* и *Geobacillus jurassicus* (обр. 1, 2, 4 соответственно) циклические УВ-биомаркеры – стераны и терпаны не образуются. Нефтяные циклические УВ-биомаркеры образуются в продуктах термолиза нерастворимой части всех изученных прокариот, но их относительное содержание во всех случаях отличается между собой.

В табл. 2 и 3 представлена геохимическая характеристика в растворимой части и продуктах термолиза нерастворимой части различных прокариот по стеранам и терпанам соответственно. Здесь же представлены результаты анализа УВ нефтей м-ния Даган (КНР) и нижнекембрийской (осинский горизонт) нефти (Восточная Сибирь) и нефтепроявления кальдеры вулкана Узон (Камчатка).

Из табл. 2 и 3 видно, что аналогично изопренам распределения регулярных стеранов C_{27} , C_{28} , C_{29} также напоминают нефти морского генезиса. Величина отношения диа/регулярных стеранов в обр. 2, 3, 5 варьируют в пределах 0.46–0.58, что характерно для нефтей, генерированных в глинистых толщах, а в обр. 1, 4, 7, 8 и 10 варьирует в пределах 0.16–0.33, что характерно для нефтей, генерированных в карбонатных толщах. Следовательно, можно предположить, что высокие значения диастеранов обусловлены не каталитическим воздействием глинистых толщ, а тем, что в глинистых толщах изначально присутствует такое сообщество прокариот, которое генерирует их в боль-

шем количестве по сравнению с карбонатными толщами. Согласно коэффициенту зрелости $K^{2зр}$ обр. 1, 2, 3, 5, 10 отличаются более высокой зрелостью по сравнению с обр. 4, 7, 8 ($K^{2зр} = 0.65–0.82$ против 0.27–0.51). К аналогичным выводам можно прийти и по величинам отношений геохимических показателей терпанов.

Предположения об участии архей в образовании нефти были отмечены в работах [16–19], изучению же нефтепроявлений кальдеры вулкана Узон посвящены работы [20–24]. Считается, что нефтепроявления Узона являются так называемой “молодой нефтью” [23]. Первоначально предполагалось, что нефть Узона образовалась за счет абиогенного синтеза, а позднее было высказано предположение, что она образовалась за счет переработки липидов высшей наземной растительности и простейших водорослей [20]. В работе [24] высказано предположение, что в образовании этой нефти принимали участие прокариоты, обитающие на кальдере вулкана Узон.

Наши исследования по термолизу нерастворимой части микробных сообществ, выделенных из Нефтяной площадки кальдеры вулкана Узон (Камчатка) [25], экспериментально подтвердили ранее высказанные предположения по участию прокариот микробного сообщества в образовании углеводородов-биомаркеров. К такому выводу мы пришли на основании изучения распределения углеводородов-биомаркеров в растворимой части и продуктах термолиза прокариот, выделенных в месте нефтепроявлений.

Микробные сообщества из источника Нефтяной площадки кальдеры вулкана Узон (Камчатка) были отобраны при разных температурах от 35 до 65°C. Методом высокопроизводительного секвенирования (16S рРНК) был изучен состав микробных сообществ. Микробное разнообразие всех изученных образцов практически одинаковое, но отличаются их относительные содержания. Так, содержание архей колеблется в пределах 0.5–5% (из них *Thermoplasmatales* колеблется в пределах 67–99%), представители *Acidithiobacillus* (*Gamma*proteobacteria) колеблются в пределах 30–88%, *Candidatus Methylacidiphilum* (*uncultured Verucomicrobiae*) варьирует в пределах 9–65%. Также присутствуют бактерии *Thiomonas*, *Sulfobacillus* (*Clostridiales*) и *Deltaproteobacteria* (Sva0485)².

Величины геохимических показателей по n -алканам, изопренам, стеранам и терпанам как в растворимой части, так и в продуктах термолиза нерастворимой части микробных сообществ очень близки к таковым в нефтепроявлениях Нефтяной площадки, за исключением индивиду-

² Образцы были предоставлены руководителем отдела биологии экстремофильных микроорганизмов института микробиологии им. С.Н. Виноградского членом-корреспондентом РАН Е.А. Бонч-Осмоловской.

Таблица 2. Геохимическая характеристика в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части различных прокариот по стеранам в нефтях и нефтепроявлении

Обр. №	Образец	Регулярные стераны						диа/рег		K _{зр} ¹		K _{зр} ²	
		C ₂₇ /C ₂₉		C ₂₈ /C ₂₉		C ₂₇ :C ₂₈ :C ₂₉							
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Индивидуальные бактерии													
1	<i>Arthrobacter</i> sp. RV	—	1.64	—	1.18	—	43:31:26	—	0.33	—	0.50	—	0.65
2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> RM	—	1.66	—	1.07	—	44:29:27	—	0.49	—	0.46	—	0.68
3	<i>Spirulina platensis</i>	0.95	0.81	0.86	0.88	34:31:35	30:33:37	0.50	0.46	0.51	0.49	0.62	0.65
Индивидуальные бактерии, выделенные из нефтяного месторождения Даган (КНР)													
4	<i>Geobacillus jurasicus</i>	—	1.11	—	0.84	—	41:31:37	—	0.28	—	0.39	—	0.51
5	<i>Shewanella putrefaciens</i>	1.43	1.30	1.00	0.86	42:29:29	41:27:32	0.64	0.58	0.45	0.40	0.72	0.68
6	Нефть м-ния Даган (КНР)	0.87		1.04		30:36:34		0.18		0.35		0.57	
Индивидуальные археи и микробные сообщества, выделенные из источника Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон													
7	<i>Thermoplasma</i> sp.	0.87	0.54	0.68	0.69	34:27:39	24:31:45	0.20	0.31	0.43	0.30	0.69	0.59
8	Микробные сообщества (среднее)	0.97	0.57	0.88	0.92	34:30:36	23:37:40	0.12	0.16	0.29	0.30	0.27	0.27
9	Нефтепро-явления	0.82		0.74		32:29:39		0.15		0.32		0.27	
Реликты циано-бактериальных матов (ЦБМ), выделенные из коллектора нижнего кембрия (осинский горизонт)													
10	Реликты ЦБМ	0.25	0.27	0.29	0.31	16:19:65	17:20:63	0.14	0.22	0.51	0.48	0.79	0.76
11	Нефть осинского горизонта	0.24		0.26		15:20:65		0.23		0.52		0.82	

Примечание. 1 – растворимая часть, 2 – термоллиз; $K_{зр}^1 = \alpha S / (\alpha S + \alpha R)$, $K_{зр}^2 = \alpha \beta \beta / (\alpha \beta \beta + \alpha R)$, диа/рег (диахолестаны 10 α 13 β 17 α 20S и 20R C₂₇), C₂₇:C₂₈:C₂₉ – регулярные стераны.

альных архей *Thermoplasma* sp. Судя по всему, вклад индивидуальных архей *Thermoplasma* sp. (обр. № 7), которые выделены из микробных сообществ источника Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон, в образование нефтепроявления Нефтяной площадки по распределению n-алканов, изопренанов, стеранов и терпанов незначителен, так как, как было указано выше, они находятся в сообществе в минорном количестве (от 0.5 до 5%).

В растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части реликтов циано-бактериальных матов, выделенных из коллектора осинского горизонта нижнего кембрия (Восточная Сибирь), наблюдается образование нефтяных алифатических и циклических УВ-биомаркеров и их распределение практически идентично таковым в нефтях этого м-ния (табл. 1–3). Таким образом, однозначно доказано непосредственное участие прокариот (реликтов ЦБМ) в образо-

Таблица 3. Геохимическая характеристика в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части различных прокариот по терпанам в нефтях и нефтепроявлении

Обр. №	Образец	Ts/Tm		Г ₂₉ /Г ₃₀		Г ₂₇ :Г ₂₉ :Г ₃₀ :Г ₃₁		три/пента		тетра/три	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Индивидуальные бактерии											
1	<i>Arthrobacter</i> sp. RV	—	0.45	—	0.92	—	22:27:30:21	—	1.04	—	0.33
2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> RM	—	0.60	—	1.05	—	28:28:25:19	—	1.70	—	0.34
3	<i>Spirulina platensis</i>	0.86	1.11	0.60	0.36	18:20:34:28	13:17:48:22	0.42	0.19	0.45	0.50
Индивидуальные бактерии, выделенные из нефтяного месторождения Даган (КНР)											
4	<i>Geobacillus jursasicus</i> ¹⁾	—	1.05	—	0.59	—	16:21:36:27	—	0.14	—	0,83
5	<i>Shewanella putrefaciens</i> ¹⁾	0.64	0.73	0.74	0.76	27:24:32:17	23:25:34:18	1.50	1.22	0.27	0.27
6	Нефть м-ния Даган (КНР)	0.84		0.39		12:19:49:20		0.09		0.37	
Индивидуальные археи и микробные сообщества, выделенные из источника											
Нефтяная площадка кальдеры вулкана Узон											
7	<i>Thermoplasma</i> sp. ²⁾	0.85	0.77	0.77	0.60	17:24:32:27	16:22:36:26	0.34	0.08	0.52	0.75
8	Микробные сообщества (среднее)	0.11	0.19	0.83	0.87	25:30:37:8	21:27:37:15	0.15	0.21	2.2	1.64
9	Нефтепроявления	0.15		0.86		23:29:38:10		0.18		2.2	
Реликты циано-бактериальных матов (ЦБМ), выделенные из коллектора нижнего кембрия (осинский горизонт)											
10	Реликты ЦБМ	1.28	1.08	0.92	0.67	37:20:22:21	25:16:24:10	6.92	3.08	0.30	0.34
11	Нефть осинского горизонта	1.39		0.82		30:16:20:34		6.48		0.34	

Примечание. 1 – растворимая часть, 2 – термоллиз; Ts – 22,29,30-трисноргопан – 17 α -метил, 18 α ; Tm – 22,29,30-трисноргопан – 18 α -метил, 17 α ; Г – гопан – C₃₀ – 17 α , 21 β ; Три – трициклический терпан C₂₃ – 13 β , 14 α , Тетра – тетрациклический терпан C₂₄ – 13 β , 14 α , Пента – гопан C₃₀.

вании нижнекембрийской нефти (осинский горизонт) [10].

ВЫВОДЫ

В результате изучения закономерностей распределения УВ-биомаркеров – n-алканов, изопренанов, стеранов и терпанов в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части (керогена) исследуемых прокариот найдено их нефтяное распределение. Общее между прокариотами то, что распределение УВ-биомаркеров в растворимой части и продуктах термоллиза нерастворимой части исследованных прокариот напоминает нефти морского генезиса.

В образовании нефтепроявлений Нефтяной площадки кальдеры вулкана Узон принимали участие микробные сообщества (прокариоты).

Нефть осинского горизонта (нижний кембрий, Восточная Сибирь) образовалась из реликтов ЦБМ, находящихся в коллекторе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН Е.А. Бонч-Осмоловской и д.б.н., Т.Н. Назиной за предоставленные образцы прокариот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dedyukhina E.G., Ladygina N., Vainshtein M.B. A Review on Microbial Synthesis of Hydrocarbons // A Process Biochemistry. 2006. V. 41. Iss. 5. P. 1001–1014.
2. Туссо Б.П., Вельте Д.Х. Образование и распространение нефти. М., Мир, 1981, 501 с.

3. Behar F., Vanderbroucke M. Representation Chimique de la Structure des Kerogenes et des Asphaltenes en Fonction de leur Origin et de leur Degre D'evolution // Revue de IFP. 1986. V. 41. № 2. P. 173–188.
4. Гордадзе Г.Н. Углеводороды в нефтяной геохимии. Теория и практика. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2015. 559 с.
5. Гордадзе Г.Н., Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Перевалова А.А., Кошелев В.Н. Образование углеводородов нефти из биомассы прокариот. Сообщение 1. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы архей *Thermoplasma* sp. // Нефтехимия. 2018. Т. 58. № 2. С. 135–139.
6. Гордадзе Г.Н., Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Гаянова А.А., Семенова Е.М., Кошелев В.Н. 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.
7. Юсупова А.А., Гируц М.В., Семенова Е.М., Гордадзе Г.Н. Образование углеводородов нефти из биомассы прокариот. Сообщение 3. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы бактерий *Shewanella putrefaciens* и асфальтенов, выделенных из нефти // Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 6. С. 1–10.
8. Брянцева Ю.В., Дробецкая И.В., Харчук И.А. Характеристика цианобактерии *Spirulina (Arthrospira) platensis* // Экология моря. 2005. Т. 70. С. 24–30.
9. Nazina T.N., Sokolova D.S., Grigoryan A.A., Shestakova N.M., Mikhailova E.M., Poltarus A.B., Tourova T.P., Lysenko A.M., Osipov G.A., Belyaev S.S. *Geobacillus jurassicus* sp. nov., a New Thermophilic Bacterium Isolated from a High-temperature Petroleum Reservoir, and the Validation of the *Geobacillus* Species // Systematic and Applied Microbiology. 2005. № 28. P. 43–53.
10. Гордадзе Г.Н., Гируц М.В., Пошибаева А.Р., Постникова О.В., Пошибаев В.В., Антипова О.А., Рудаковская С.Ю., Кошелев В.Н., Мартынов В.Г. Карбонатные коллекторы как нефтематеринские толщи // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018. Т. 4 (11). С. 575–592.
11. Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Тимошина И.Д., Махнева Е.А. Семейства верхнедокембрийских и кембрийских нефтей Сибирской платформы // ДАН. 2000. Т. 370. № 1. С. 92–95.
12. Баженова Т.К., Дахнова М.В., Жеглова Т.П. Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего-среднего кембрия Сибирской платформы. Под ред. А.И. Варламова, А.П. Афанасенкова. М.: ВНИГНИ, 2014. 128 с.
13. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества нефтепроизводивших пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 7. С. 901–910.
14. Каширцев В.А., Конторович А.Э., Ким Н.С., Чалая О.Н., Зуева И.Н. Стераны в неопротерозойских нефтях Непско-Ботуобинской антеклизы Сибирской платформы и Южно-Оманского соленосного бассейна Аравийской платформы // Нефтехимия. 2015. Т. 55 (3). С. 197–205.
15. Парфенова Т.М., Меленевский В.Н., Коровников И.В. Геохимия органического вещества пород сэктэнской свиты нижнего и среднего кембрия (чекуровская антиклиналь, северо-восток Сибирской платформы) // Геология нефти и газа. 2016. № 6. С. 97–106.
16. Конторович А.Э., Каширцев В.А., Данилова В.П., Костырева Е.А., Ким Н.С., Меленевский В.Н., Москвин В.И., Парфенова Т.М., Тимошина И.Д., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. Молекулы-биомаркеры в ископаемом органическом веществе и нафтидах докембрийских и фанерозойских пород Сибири // ВНИГРИ, СПб. 2009. 108 с.
17. Конторович А.Э., Костырева Е.А., Сараев С.В., Меленевский В.Н., Фомин А.Н. Геохимия органического вещества кембрия Предъенисейской субпровинции (по результатам бурения скважин Восток-1 и Восток-3) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 737–750.
18. Конторович А.Э., Костырева Е.А., Родякин С.В., Сотнич И.С., Ян П.А. Геохимия битумоидов баженовской свиты // Геология нефти и газа. 2018. № 2. С. 79–88.
19. Конторович А.Э., Буриштейн Л.М., Никитенко Б.Л., Рыжкова С.В., Борисов Е.В., Еришов С.В., Костырева Е.А., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Пономарева Е.В., Фомин М.А., Ян П.А. Маргинальный фильтр волжско-раннеберриасского Западно-Сибирского морского бассейна и его влияние на распределение осадков // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 3. С. 199–210.
20. Калинин М.К. Генезис микронепфтепроявлений кальдеры вулкана Узон (Восточная Камчатка) // Преобразование органического вещества в современных и ископаемых осадках и основные этапы генерации свободных углеводородов. 1975. Тр. ВНИГНИ, вып. 175. М., С. 50–58.
21. Конторович А.Э., Бортникова С.Б., Карпов Г.А., Каширцев В.А., Костырева Е.А., Фомин А.Н. // Кальдера вулкана Узон (Камчатка) – уникальная природная лаборатория современного нафтидогенеза // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 986–990.
22. Галимов Э.М., Севастьянов В.С., Карпов Г.А., Камалева А.И., Кузнецова О.В., Коноплева И.В., Власова Л.Н. // Углеводороды из вулканического района. Нефтепроявления в кальдере вулкана Узон на Камчатке // Геохимия. 2015. № 12. С. 1059–1068.
23. Варфоломеев С.Д., Карпов Г.А., Синал Г.-А., Ломакин С.М., Николаев Е.Н. Самая молодая нефть земли // ДАН. 2011. Т. 438. № 3. С. 345–347.
24. Фурсенко Е.А., Каширцев В.А., Конторович А.Э., Фомин А.Н. Геохимия нафтидов из локализованных на суше гидротермальных источников и вопросы их генезиса (Узон, Йеллоустон, Новая Зеландия) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55 (5–6). С. 918–930.
25. Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Гаянова А.А., Перевалова А.А., Гордадзе Г.Н. Закономерности распределения углеводородов-биомаркеров в грунтах разных участков Нефтяной площадки кальдеры вулкана Узон (Камчатка) // Мат. науч. конф. “Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и сланца” 14–16.10.2019 г., Сыктывкар. С. 86–87.

PROKARYOTES AS A SOURCE OF PETROLEUM HYDROCARBONS

A. A. Yusupova^a, M. V. Giruts^a, and G. N. Gordadze^{a,#}

^a *Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: gordadze@rambler.ru*

Presented by A.E. Kantorovich September 9, 2020

The regularities of the distribution of aliphatic and cyclic petroleum hydrocarbons-biomarkers in various individual prokaryotes and their communities (individual bacteria *Arthrobacter* sp. RV, *Pseudomonas aeruginosa* RM, *Spirulina (Arthrospira) platensis*; individual bacteria isolated from the Dagan oil field (KNR) *Geobacillus jurassicus* and *Shewanella putrefaciens*, individual archaea *Thermoplasma* sp, microbial communities isolated from the Uzon volcano caldera of Kamchatka, Russia and cyanobacterial mats relicts isolated from carbonate reservoir rocks of the Lower Cambrian of the Ichedinskoye field, Eastern Siberia) are presented. It is shown that the studied bacteria and archaea make different contributions to the formation of oil hydrocarbon-biomarkers of. In particular, it was shown that the oil seep at the Oil Site of the Uzon Caldera (Kamchatka) and the Precambrian oil of the Ichedinskoye deposit (Eastern Siberia) were formed from prokaryotes.

Keywords: origin of oil, hydrocarbons-biomarkers, n-alkanes, isoprenanes, steranes, terpanes, prokaryotes, bacteria, archaea