

ОБРАЗОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТИ ИЗ БИОМАССЫ ПРОКАРИОТ. СООБЩЕНИЕ 4: ОБРАЗОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ-БИОМАРКЕРОВ ИЗ БИОМАССЫ БАКТЕРИЙ *HALOMONAS TITANICAE*, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ НЕФТИ РОМАШКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2022 г. А. А. Юсупова¹, М. В. Гируц¹, Д. С. Вылекжанина¹,
Е. М. Семенова², Г. Н. Гордадзе^{1,*}

¹ Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, 119991 Россия

² Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва, 117312 Россия

*E-mail: gordadze@rambler.ru

Поступила в редакцию 24 января 2022 г.

После доработки 3 февраля 2022 г.

Принята к публикации 23 марта 2022 г.

Исследованы закономерности распределения нефтяных углеводородов-биомаркеров (УВ-биомаркеров) – *n*-алканов, изопренанов, *n*-алкилциклогексанов, стеранов, терпанов и *n*-алкилбензолов – в растворимой части биомассы бактерий и продуктах термоллиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти месторождения (м-ия) Ромашкинское. Показано, что относительное распределение углеводородов-биомаркеров в растворимой части исследуемых бактерий ближе к таковому в нефти месторождения Ромашкинское по сравнению с их распределением в продуктах термоллиза нерастворимой части бактерий. Как в растворимой части, так и в продуктах термоллиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* найдены гомологические ряды *n*-алканов состава C₁₀–C₄₀, изопренанов состава C₁₀–C₂₀, *n*-алкилциклогексанов состава C₁₀–C₃₀, *n*-алкилбензолов состава C₁₀–C₃₀. Среди изопренанов образуется и псевдерегулярный изопренан состава C₁₇, отсутствующий во всех нефтях. Предполагается, что он образуется из нерегулярного изопренена – сквалена, который обнаружен как в растворимой части, так и в продуктах термоллиза нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae*. Среди циклических УВ во всех случаях наблюдается образование тетра- и пентациклических соединений (стеранов и терпанов). Величины генетического показателя – отношения пристан/фитан, а также распределение регулярных стеранов C₂₇–C₂₉ близки к таковым в нефти Ромашкинского месторождения.

Ключевые слова: происхождение нефти, нефтяные углеводороды, *n*-алканы, изопренаны, стераны, терпаны, бактерии *Halomonas titanicae*, сквален

DOI: 10.31857/S002824212202006X, **EDN:** ERHUPH

Представленная работа является продолжением исследований в области моделирования процессов образования нефти из биомассы прокариот [1–7].

В первом сообщении были изучены закономерности распределения насыщенных УВ-биомаркеров (*n*-алканов, изопренанов, стеранов и терпанов), образующихся из биомассы индивидуальных архей *Thermoplasma* sp., выделенных из источника «Нефтяная площадка» кальдеры вулкана Узон (Камчатка, Россия) [4].

В Сообщении 2 [5] и Сообщении 3 [6] были изучены закономерности распределения насыщенных УВ-биомаркеров, образующихся из бактерий, соответственно, *Geobacillus jurassicus* и *Shewanella putrefaciens*, выделенных из биодegradированной нефти м-ния Даган, а также в продуктах термоллиза асфальтенов этой нефти. Было показано, что как в растворимой части, так и в продуктах термоллиза нерастворимой части бактерий *Geobacillus jurassicus* и *Shewanella putrefaciens*, образуются



Схема. Схема исследования бактерий *Halomonas titanicae* ТАТ1 (VKM В-3500D), выделенных из нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426.¹

нефтяные УВ-биомаркеры. Вместе с тем, было отмечено, что, в отличие от растворимой части биомассы бактерий *Shewanella putrefaciens*, в растворимой части бактерий *Geobacillus jurassicus* стераны и терпаны не образуются. В термолизатах нерастворимой части исследуемых бактерий полициклические УВ-биомаркеры образуются в обоих случаях. Относительное распределение алифатических и полициклических УВ-биомаркеров соответствует нефтям морского генезиса низкой степени зрелости. Как в растворимой части, так и в продуктах термолиза нерастворимой части данных бактерий найден неопредельный нерегулярный изопренен сквален (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракоза-2,6,10,14,18,22-гексаен). Таким образом, было показано, что исследуемые бактерии вносят

различный вклад в образование УВ-биомаркеров нефти.

В работе [7] нами экспериментально доказано, что углеводороды, находящиеся в самой «молодой» нефти кальдеры вулкана Узон образовались из микробных сообществ, выделенных из той же Нефтяной площадки.

Настоящее, четвертое сообщение, посвящено бактериям *Halomonas titanicae*, выделенным из нефтяного месторождения Ромашкинское.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования были выбраны бактерии *Halomonas titanicae* ТАТ1 (VKM В-3500D), выделенные из добывающей скважины м-ия Ромашкинское, скв. 26426 [8, 9].

Биомассу исследуемых бактерий лиофилизировали при температуре 25°C, давлении 10×10^{-7} МПа, в течение 24 ч.

Экстракцию лиофилизированной биомассы бактерий *Halomonas titanicae* осуществляли на магнитной мешалке *n*-гексаном, предварительно перегнанным на ректификационной колонке. Экстракцию проводили до полного исчезновения растворимой части. Нерастворимую часть биомассы бактерий подвергали мягкому термолизу при 330°C в стеклянной запаянной ампуле.

Анализ УВ-биомаркеров в растворимой части, продуктах термолиза нерастворимой части биомассы бактерий, а также исходной нефти проводили методами капиллярной газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) и хроматомасс-спектрометрии (ХМС). ГЖХ проводили на приборе Bruker 430-GC с пламенно-ионизационным детектором, программирование температуры от 80 до 320°C – со скоростью подъема 4°/мин. Газ-носитель – водород. Разделение УВ осуществляли на капиллярных колонках с неподвижными фазами HP-1MS и HP-1 (25 м × 0.25 мм × 0.5 мкм). Газ-носитель – гелий.

ХМС-исследование в режиме электронной ионизации осуществляли на приборе Agilent 6890N/5975C. Все спектры были сняты при энергии ионизации 70 эВ и ускоряющем напряжении 3500 В. Температура камеры ионизации составляла 250°C. Использовали режим МВИ с записью следующих характеристических ионов: m/z 71 – для *n*-алканов и изопренанов, m/z 217 и 218 – для стеранов, m/z 191 и 177 – для терпанов. Программиро-

¹ ГЖХ – газо-жидкостная хроматография, ХМС – хроматомасс-спектрометрия.

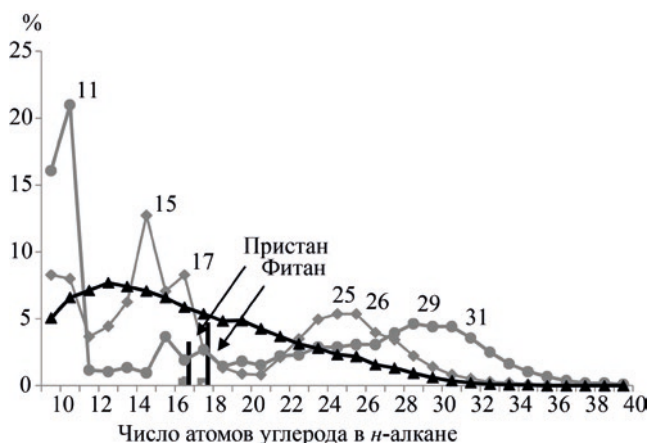


Рис. 1. Распределение *n*-алканов C₁₀–C₄₀ и изопренов *изо*-C₁₉–*изо*-C₂₀ в растворимой части (●), продуктах термоллиза нерастворимой части (◆) биомассы бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское (▲), скв. 26426.

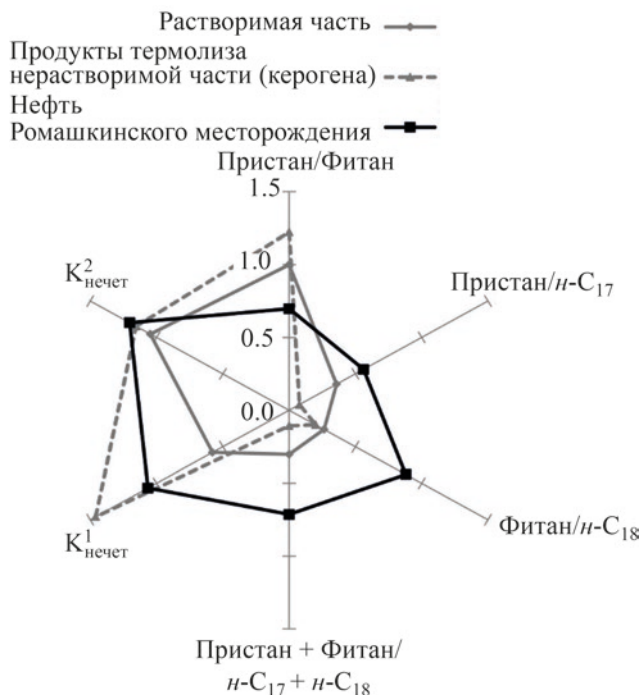


Рис. 2. Сравнительная характеристика *n*-алканов и изопренов растворимой части, продуктов термоллиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426.

вание температуры осуществляли от 70 до 290°C со скоростью подъема 4°/мин. Идентификацию соединений осуществляли путем добавления к исследуемым образцам предполагаемых эталонных соединений, а также с помощью использования библиотеки масс-спектров NIST 2.0.

Выше представлена схема исследования бактерий *Halomonas titanicae* ТАТ1 (VKM В-3500D), выделенных из нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426 (см. схему).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

***n*-Алканы и изопрены.** На рис. 1 представлено распределение *n*-алканов C₁₀–C₄₀ и изопренов *изо*-C₁₉–*изо*-C₂₀ в растворимой части, про-

дуктах термоллиза нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426. В растворимой части, продуктах термоллиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти м-ия Ромашкинское и в исходной нефти образуется гомологический ряд *n*-алканов C₁₀–C₄₀ и изопренов C₁₀–C₂₀. Из табл. 1 и рис. 2 нетрудно заме-

Таблица 1. Сравнительная характеристика растворимой части, продуктов термоллиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти месторождения Ромашкинское, и этой нефти по *n*-алканам и изопренам^а

Образец	Пристан/ фитан	Пристан/ <i>n</i> -C ₁₇	Фитан/ <i>n</i> -C ₁₈	Пристан+фитан/ <i>n</i> -C ₁₇ + <i>n</i> -C ₁₈	K ¹ _{нечет}	K ² _{нечет}	Сквален/ <i>n</i> -C ₂₈
Растворимая часть	1.00	0.36	0.26	0.30	0.58	1.05	1.21
Продукты термоллиза нерастворимой части (керогена)	1.22	0.08	0.20	0.11	1.46	1.15	0.19
Нефть м-ия Ромашкинское	0.70	0.56	0.88	0.71	1.07	1.20	0.12

^а K¹_{нечет} = (*n*-C₁₃ + *n*-C₁₅ + *n*-C₁₇ + *n*-C₁₉ + *n*-C₂₁) / (*n*-C₁₄ + *n*-C₁₆ + *n*-C₁₈ + *n*-C₂₀ + *n*-C₂₂); K²_{нечет} = (*n*-C₂₅ + *n*-C₂₇ + *n*-C₂₉ + *n*-C₃₁ + *n*-C₃₃) / (*n*-C₂₆ + *n*-C₂₈ + *n*-C₃₀ + *n*-C₃₂ + *n*-C₃₄); сквален – 2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракоза-2,6,10,14,18,22-гексаен.



Рис. 3. Распределение *n*-алкилциклогексанов состава C_{10} – C_{30} в растворимой части, продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426.

тить, что наблюдаются близкие величины отношения генетического показателя пристан/фитан. Так, в растворимой части и продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий этот показатель составляет 1.00 и 1.22 соответственно, а в исследуемой нефти – 0.7. Кроме того, во всех случаях бактерии *Halomonas titanicae* генерируют нерегулярный непредельный изопрен сквален (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракоза-2,6,10,14,18,22-гексаен). Величина отношения сквалена к близкокипящему *n*-алкану C_{28} в растворимой части больше и составляет 1.21 против 0.19 и 0.12 в продуктах термолитиза нерастворимой части и в нефти м-ия Ромашкинское, соответственно.

Вместе с тем, относительное распределение *n*-алканов разное. Так, в растворимой части наблюдается значительное превалирование низкомолекулярных *n*-алканов состава C_{10} и C_{11} по сравнению с остальными *n*-алканами, среди которых наблюдается одновременное превалирование *n*-алканов как с четным числом атомов углерода в молекуле (C_{16} , C_{18}), так и с нечетным (C_{29} , C_{31}). В то же время в продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий превалируют как низко-, так и высокомолекулярные *n*-алканы с нечетным числом атомов углерода в молекуле состава C_{15} , C_{17} и C_{25} , соответственно, в отличие от нефти м-ия Ромашкинское, где наблюдается убывающее распределение *n*-алканов с максимумом на C_{13} (рис. 1).



Рис. 4. Распределение *n*-алкилбензолов состава C_{10} – C_{30} в растворимой части, продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426.

***n*-Алкилциклогексаны и *n*-алкилбензолы.** Как в растворимой части, так и в продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти Ромашкинского месторождения, образуются *n*-алкилциклогексаны и *n*-алкилбензолы состава C_{10} – C_{30} . Относительное распределение *n*-алкилциклогексанов в растворимой части и в термолитизатах различно. Вместе с тем, их относительное распределение в растворимой части наиболее близко таковому в исходной нефти (рис. 3).

Что касается относительного распределения *n*-алкилбензолов состава C_{10} – C_{30} , то наблюдается довольно близкое распределение между углеводородами нефти и углеводородами, образующимися из бактерий *Halomonas titanicae* (рис. 4).

Необходимо отметить, что би- и триароматические углеводороды из биомассы бактерий практически не образуются.

Стераны и терпаны. В табл. 2 и 3 и на рис. 5 представлена сравнительная характеристика растворимой части, продуктов термолитиза нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти м-ия Ромашкинское, и этой нефти по стеранам и терпанам. В растворимой части и в продуктах термолитиза нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* наблюдается нефтяное распределение прегнанов и стеранов состава C_{21} – C_{29} , а также терпанов состава C_{19} – C_{35} .

Таблица 2. Сравнительная характеристика растворимой части биомассы бактерий, продуктов термолита нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти месторождения Ромашкинское, и самой нефти по стеранам

Образец	Регулярные стераны			Стераны C ₂₉		
	C ₂₇ /C ₂₉	C ₂₈ /C ₂₉	C ₂₇ :C ₂₈ :C ₂₉	K _{зр} ¹	K _{зр} ²	диа/рег
Растворимая часть	0.91	0.82	33:30:37	0.43	0.69	0.38
Продукты термолита нерастворимой части (керогена)	0.57	0.61	26:28:46	0.29	0.48	0.42
Нефть м-ия Ромашкинское	0.92	0.43	39:18:43	0.48	0.75	0.16

C₂₇:C₂₈:C₂₉ – регулярные стераны C₂₇, C₂₈, C₂₉; K_{зр}¹ = αS/(αS+αR); K_{зр}² = αβ/(αβ+αR); диа/рег (диахолестаны 10α13β17α20S и 20RC₂₇).

Таблица 3. Сравнительная характеристика растворимой части биомассы бактерий, продуктов термолита нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти месторождения Ромашкинское, и самой нефти по терпанам

Образец	Ts/Tm	Ts/(Ts + Tm)	Г ₂₉ /Г ₃₀	M ₃₀ /Г ₃₀	Г ₂₇ :Г ₂₉ :Г ₃₀ :Г ₃₁	Три/пента	Тетра/три	Г ₃₀ /С _{Т29}
Растворимая часть	0.75	0.43	0.60	0.16	16:21:34:29	0.44	0.35	2.78
Продукты термолита нерастворимой части (керогена)	0.90	0.47	0.79	0.16	16:25:31:28	0.39	0.40	1.36
Нефть м-ия Ромашкинское	0.20	0.17	1.23	0.07	13:31:25:30	0.47	0.18	2.85

Ts – 22,29,30-трисноргопан (17α-метил, 18α); Tm – 22,29,30-трисноргопан (18α-метил, 17α); Г₃₀ – гопан – пентациклический терпан, С₃₀ (17α, 21β); Г₂₉ – норгопан (адиантан) – С₂₉ (17α, 21β); три – хейлантан, С₂₁ (13β, 14α); тетра – тетрациклический терпан, С₂₄ (13β, 14α)

Относительное содержание регулярных стеранов C₂₇–C₂₉ и терпанов в растворимой части биомассы бактерий ближе к таковому в исходной нефти. Степень зрелости по стеранам C₂₉ продуктов термолита ниже, чем в нефти: коэффициенты зрелости K_{зр}¹ и K_{зр}² составляют 0.29 и 0.48 против 0.48 и 0.75 в нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426 (табл. 2). В равновесии значения этих коэффициентов составляют 0.55 и 0.78, соответственно [10]. Однако, несмотря на различия, распределение стеранов также напоминает нефти морского генезиса, аналогично распределению регулярных изопренов (рис. 5).

Некоторые различия в относительном распределении углеводородов-биомаркеров, в том числе и величины отношения диа/рег стеранов, в бактерии *Halomonas titanicae* с таковыми в нефтях объясняется тем, что в образование нефти Ромашкинского

месторождения вносили различный вклад не только исследованные бактерии, но и множество других бактерий, которые обитают в этом месторождении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как в растворимой части биомассы бактерий, так и в продуктах термолита нерастворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* образуются те же углеводороды, что и в обычных нефтях, но их относительное содержание значительно отличается от такового в исходной нефти Ромашкинского м-ия, скв. 26426. Установлено, что распределение УВ-биомаркеров в растворимой части биомассы бактерий *Halomonas titanicae* ближе к их распределению в нефти месторождения Ромашкинское по сравнению с таковым в продуктах термолита нерастворимой части биомассы этих бактерий.

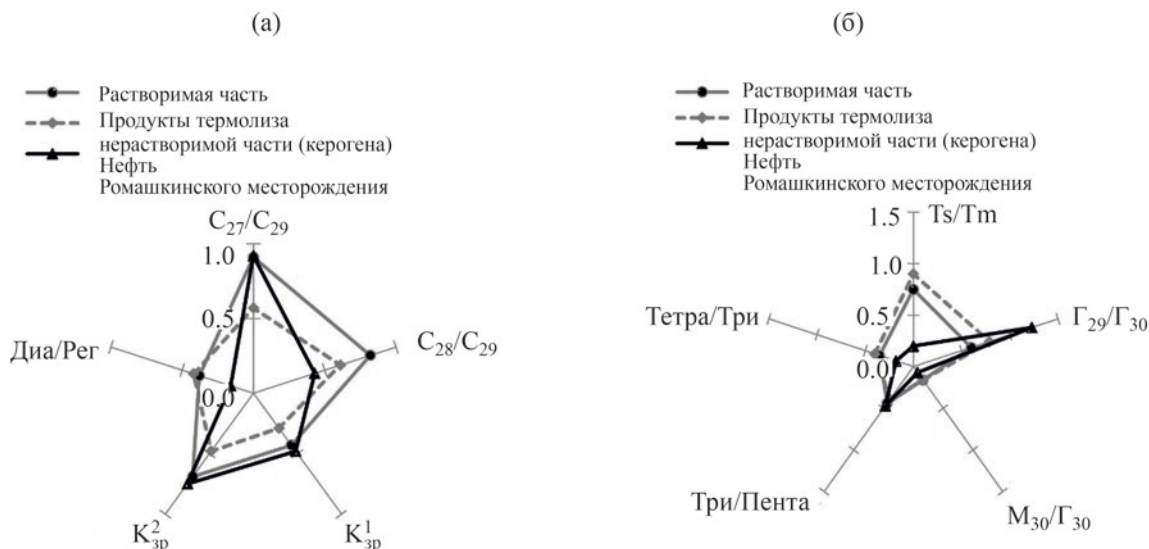


Рис. 5. Сравнительная характеристика стеранов (а) и терпанов (б) растворимой части, продуктов термоллиза нерастворимой части бактерий *Halomonas titanicae* и нефти м-ия Ромашкинское, скв. 26426.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят к.б.н., с.н.с. лаборатории нефтяной микробиологии ФИЦ Биотехнологии РАН Соколову Дяну Шамильвну за предоставленный образец бактерии *Halomonas titanicae*.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юсупова Алина Айдаровна, аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4200>

Гируц Максим Владимирович, д.х.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5057-6532>

Вилекжанина Дарья Сергеевна, магистрант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2629-9699>

Семенова Екатерина Михайловна, к.б.н., н.с., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5299-7656>

Гордадзе Гурам Николаевич, д.г.-м.н., к.х.н., профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5300-3059>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордадзе Г.Н. Углеводороды в нефтяной геохимии. Теория и практика. М.:РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015, 559 с.
2. Строева А.Р., Гируц М.В., Кошелев В.Н., Гордадзе Г.Н. Бактериальный синтез *n*-алканов с нечетным числом атомов углерода в молекуле // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 5. С. 374–377. <https://doi.org/10.7868/S0028242113050092> [Stroeva A.R., Giruts M.V., Koshelev V.N., Gordadze G.N. Bacterial synthesis of *n*-Alkanes with an odd number of carbon atoms in the molecule // Petrol. Chemistry. 2013. V. 53. P. 331–334. <https://doi.org/10.1134/S0965544113050095>].
3. Строева А.Р., Гируц М.В., Кошелев В.Н., Гордадзе Г.Н. Моделирование процессов образования нефтяных углеводородов-биомаркеров путем термоллиза и термокатализа биомассы бактерий // Нефтехимия. 2014. Т. 54. № 5. С. 352–359. <https://doi.org/10.7868/S0028242114050104> [Stroeva A.R., Giruts M.V., Koshelev V.N., Gordadze G.N. Modeling of formation of petroleum biomarker hydrocarbons by thermolysis and thermocatalysis of bacterium biomass // Petrol. Chemistry.. 2014. V. 54. P. 347–354. <https://doi.org/10.1134/S0965544114050107>].
4. Гордадзе Г.Н., Пошибаева А.Р., Гируц М.В., Перевалова А.А., Кошелев В.Н. Образование углеводо-

- родов нефти из биомассы прокариот. Сообщение 1. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы архей *Thermoplasma sp. archaea* // Нефтехимия. 2018. Т. 58. № 2. С. 135–139. <https://doi.org/10.7868/S0028242118020041> [Gordadze G.N., Poshibaeva A.R., Giruts M.V., Perevalova A.A., Koshelev V.N. Formation of petroleum hydrocarbons from prokaryote biomass: 1. Formation of petroleum biomarker hydrocarbons from *Thermoplasma sp. archaea* biomass // Petrol. Chemistry. 2018. V. 58. P. 186–189. <https://doi.org/10.1134/S096554411803009X>].
5. 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. <https://doi.org/10.1134/S0028242118060035> [Gordadze G.N., Poshibaeva A.R., Giruts M.V., Gayanova A.A., Semenova E.M., Koshelev V.N. Formation of petroleum hydrocarbons from prokaryote biomass: 2. Formation of petroleum hydrocarbon biomarkers from biomass of *Geobacillus jurassicus* bacteria isolated from crude oil // Petrol. Chemistry. 2018. V. 58. P. 1005–1012. <https://doi.org/10.1134/S0965544118120034>].
6. 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. <https://doi.org/10.31857/S0028242120060192> [Yusupova A.A., Giruts M.V., Semenova E.M., Gordadze G.N. Formation of petroleum hydrocarbons from prokaryote biomass: 3. Formation of petroleum biomarker hydrocarbons from biomass of *Shewanella putrefaciens* bacteria and asphaltenes isolated from crude oil // Petrol. Chemistry. 2020. V. 60. P. 1216–1225. <https://doi.org/10.1134/S0965544120110195>].
7. Юсупова А.А., Гируц М.В., Гордадзе Г.Н. Прокариоты как источник нефтяных углеводородов-биомаркеров // Доклады РАН. Науки о земле. 2021. Т. 497. № 1. С. 30–36. <https://doi.org/10.31857/S2686739721030130> [Yusupova A.A., Giruts M.V., Gordadze G.N. Prokaryotes as a source of petroleum hydrocarbons // Doklady Earth Sciences. 2021. V. 497. Part 1. P. 211–216. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21030132>].
8. Nazina T.N., Shestakova N.M., Pavlova N.K., Tatar-kin Y.V., Ivoilov V.S., Khisametdinov M.R., Sokolova D.Sh., Babich T.L., Tourova T.P., Poltarau A.B., Belyaev S.S., Ivanov M.V. Functional and phylogenetic microbial diversity in formation waters of a low-temperature carbonate petroleum reservoir. // International Biodeterioration & Biodegradation. 2012. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.07.008>.
9. Grouzdev D.S., Sokolova D.S., Poltarau A.B., Nazina T.N. Draft genome sequence of *Halomonas titanicae* strain TAT1, a hydrocarbon-oxidizing halophilic bacterium isolated from a petroleum reservoir in Russia // Microbiology Resource Announcements. 2020. V. 9. № 48. e01255–20. <https://doi.org/10.1128/MRA.01255-20>
10. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. М.: Наука. 1984. 264 с.