

## Биодеградированные рассеянные битумы в породах хатыспытской свиты венда (неопротерозоя) на северо-востоке Сибирской платформы

Д.С. Мельник<sup>1,2\*</sup>, Т.М. Парфенова<sup>1,2</sup>, В.И. Рогов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Исследовано органическое вещество хатыспытской свиты венда (неопротерозоя). Анализ методами газожидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии показал, что на хроматограммах во фракциях насыщенных углеводородов пяти образцов фиксируются высокие «нафтеносные горбы», повышенные пики стеранов и терпанов на фоне алканов  $C_{27+}$ , в распределении нормальных алканов доминируют высокомолекулярные  $C_{21-26}$ , на хроматограммах обнаружены 12- и 13-монометилалканы, на масс-хроматограммах по  $m/z$  191 и 177 идентифицированы деметилированные терпаны. Впервые установлено, что в породах хатыспытской свиты присутствуют рассеянные битумы с биодеградированными углеводородами. Они выявлены в карбонатных и карбонатно-кремневых породах. В битумах также обнаружены 8,14-секогопаны, устойчивые к биодеградации, гаммацеран.

Особенности состава и распределения углеводородов показали, что их источником было автохтонное органическое вещество хатыспытской свиты, одной из потенциально нефтепроизводивших толщ на северо-востоке Сибирской платформы. Установлено, что состав и содержание углеводородов битумов контролируются вкладом первичных организмов (эукариот и прокариот), обитавших в вендских морях, изменяющимися окислительно-восстановительными условиями накопления и преобразования осадков, сравнительно низким температурным воздействием, высокой степенью биологического окисления в гипергенезе.

Распределение рассеянных битумов в разрезе показывает, что их скопления могут быть обнаружены не только в перекрывающих отложениях, но и в самой хатыспытской свите.

**Ключевые слова:** органическая геохимия, нефтепроизводившие породы, рассеянные битумы, насыщенные углеводороды-биомаркеры, биодеградация, хатыспытская свита, венд (неопротерозой), Сибирская платформа

**Для цитирования:** Мельник Д.С., Парфенова Т.М., Рогов В.И. (2020). Биодеградированные рассеянные битумы в породах хатыспытской свиты венда (неопротерозоя) на северо-востоке Сибирской платформы. *Георесурсы*, 22(2), с. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.37-44>

### Введение

В 30-х годах XX века проводились масштабные геологоразведочные работы в пределах Оленекского поднятия. Описаны битумопоявления в кавернах и поровом пространстве пород туркутской, кессюсинской свит и верхнепалеозойских отложений (Гусев, 1950). С 1950-х годов известно, что на склонах Оленекского поднятия распространены породы хатыспытской свиты венда (неопротерозоя) (Журавлев, Сороков, 1954). В настоящее время возраст хатыспытской свиты (ее нижней границы) может быть оценен на основе палеонтологических данных и составляет ~553-558 млн лет (Grazhdankin, 2004; Rogov et al., 2012; Rogov et al., 2013; Soldatenko et al., 2019). Однако геохимические данные показывают, что возраст хатыспытской свиты также может быть и более молодым ~545 млн лет (Kaufman, 2019). Таким образом, хатыспытская свита имеет вендский возраст и перекрывается туркутской свитой немакит-далдынского возраста, которая содержит скелетные остатки *Cambrotubulus decurvatus* (Карлова, 1987). Туркутская свита в свою

очередь перекрывается стратиформными брекчиями, которые являются продуктами разрушения туфобрекчий с возрастом 543.9 млн лет (Bowring et al., 1993; Рогов и др., 2015). Хатыспытская свита – уникальный объект для изучения эдиакарской биоты, обстановок ее обитания и захоронения (Rogov et al., 2012; Nagovitsin et al., 2015; Cui et al., 2016 и др.).

В 1960-х годах было показано, что породы хатыспытской свиты обогащены органическим веществом (ОВ) (Натапов, 1962). Уже более 50 лет их рассматривают в качестве нефтепроизводивших на северо-востоке Сибирской платформы (Баженова и др., 1981; Каширцев, 1988; 2004; Конторович и др., 1995, 2000; Парфенова и др., 2010). И сегодня вопрос о роли хатыспытской свиты как возможного источника нефти и газа в осадочных бассейнах арктического сектора РФ остается актуальным (Ступакова и др., 2017; Каширцев и др., 2018, 2019). Исследователями установлено, что среди преимущественно известняков и доломитов хатыспытских отложений, обедненных и обогащенных ОВ, встречаются карбонатно-кремневые породы и горючие сланцы, они реализовывали генерационный потенциал и являются одним из основных источников битумов Оленекского и Восточно-Анабарского полей (Каширцев,

\* Ответственный автор: Дмитрий Сергеевич Мельник  
E-mail: [melniks@ipgg.sbras.ru](mailto:melniks@ipgg.sbras.ru)

© 2020 Коллектив авторов

1988; Парфенова и др., 2010; Каширцев и др., 2018, 2019; Мельник и др., 2019 и др.).

Настоящая работа направлена на изучение закономерностей распределения битумопроявлений в породах разреза хатыспытской свиты и особенностей геохимии их углеводородов-биомаркеров.

### Материалы и методы исследования

Коллекция пород хатыспытской свиты была отобрана из естественных обнажений пород неопротерозоя на р. Хорбусуонка и ее притоках (рис. 1), и ранее изучалась геологами (Rogov et al., 2012; Nagovitsin et al., 2015; Cui et al., 2016). В рамках исследования органической геохимии (по проекту РНФ-17-17-01241) 43 образца были переданы в лабораторию геохимии нефти и газа в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Образцы пород дробили до частиц размера <math><0,25\text{ мкм}</math>. Для получения нерастворимого остатка (НО) пробы растворяли в 10% соляной кислоте. Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) определяли на экспресс-анализаторе АН-7529, сжигая навески нерастворимого остатка в токе кислорода. Битумоид экстрагировали хлороформом с использованием центрифуги, затем ртутью очищали от элементарной серы и делили на фракции на хроматографической колонке. Рассчитывалось содержание битумоида в породе ( $b_{кл}$ ), битумоидный коэффициент ( $\beta$ ) и групповой состав битумоидов. Насыщенные фракции битумоидов проанализированы на газожидкостном хроматографе Agilent 5890 series II с кварцевой капиллярной колонкой 30 м\*0,25 мм с фазой НР-5 и газом-носителем – гелием. Терпановые и стерановые углеводороды (УВ) исследованы с применением хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent (газовый



Рис. 1. Схема отбора образцов

хроматограф серии 6890, масс-селективный детектор – 5973N). Идентификация индивидуальных соединений проводилась с использованием данных библиотеки масс-спектров NIST 02. Первые результаты геохимического исследования представлены на научных конференциях (Мельник и др., 2019; Melnik et al., 2019).

Для пяти проб (рис. 2) выявлены повышенные значения битумоидного коэффициента, молекулярные признаки биодеградации насыщенных УВ хлороформенных экстрактов. Известно, что биологическое окисление УВ

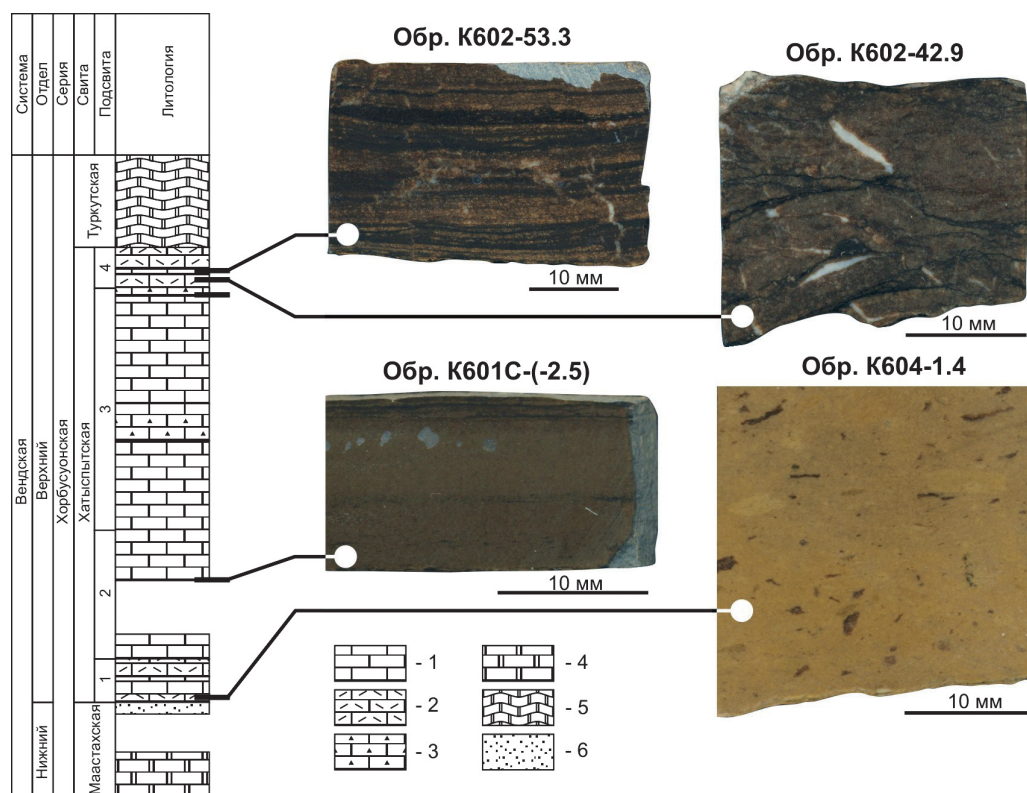


Рис. 2. Литолого-стратиграфическая характеристика хатыспытской свиты по (по Nagovitsin et al., 2015, с изменениями). 1 – известняки, 2 – обломочные известняки, 3 – кремнистые известняки/известковые силициты, 4 – доломиты, 5 – доломиты с биаламитовой текстурой, 6 – песчаники.

микроорганизмами возможно только для природных битумов, распространенных в открытых порах (кавернах, трещинах) на контакте с водой (Peters et al., 2005). В первую очередь на этом основании сделан вывод о том, что изучались микропроявления битумов. Их присутствие установлено в известняках (обр. K604-1.4; K602-42.9), кремнистых известняках (обр. K601C-(-2.5); K602-53.3) и известковых силицитах (обр. K602-38.2) (рис. 2). Дополнительное исследование шлифов под петрографическим микроскопом Carl Zeiss AxioScore A1 показало наличие в породах микротрещин и каверн, заполненных перераспределенным органическим веществом (рис. 3). Далее в статье приведены и обсуждаются только характеристики пород, содержащих рассеянные биодegradированные битумопроявления, и компонентов их органического вещества.

### Результаты и обсуждение

Установлено, что битумы распространены не только в базальных и кровельных горизонтах хатыспытской свиты, но и в средних частях ее разреза (рис. 2). Содержание НО в породах составляет 4-57% (среднее – 19%). Концентрации  $C_{орг}$  равны 0,07-0,87% (табл. 1). Выход битумоида варьирует от 0,009 до 0,125%. Наиболее обогащенным ОВ является известковый силицит. Известно, что в среднем по разрезу хатыспытской свиты содержание  $C_{орг}$  сохраняется на уровне 0,3-2,0%, иногда повышаясь до 4-6% в известняках и до 12-14% в горючих сланцах (Натапов, 1962; Каширцев, 2004; Парфенова и др., 2010; Cui et al., 2016; Мельник и др., 2019). Величины битумоидного коэффициента изменяются в пределах 8,5-11,3%. Как правило, значения  $\beta$  для автохтонных (сингенетичных) битумоидов хатыспытской свиты ниже (Каширцев, 1988; Парфенова и др., 2010; Мельник и др., 2019). По групповому составу битумы отличаются (табл. 1). Обычно, в максимальных содержаниях присутствуют смолы. В среднем насыщенные УВ составляют 22%, ароматические соединения – 13%, их сумма – 35%, сумма смол и асфальтенов превышает 60%. Для автохтонных битумоидов, в целом, характерно большее содержание насыщенных УВ, и меньшее – ароматических, содержание смол и асфальтенов фиксируется примерно на том же уровне (Каширцев, 1988; Парфенова и др., 2010; Мельник и др., 2019; Melnik et al., 2019). Высокие содержания смол и асфальтенов в групповом составе позволяют относить большинство исследованных битумов к асфальтам, один (обр. K601C-(-2.5) – к мальтам (Баженова и др., 1981).

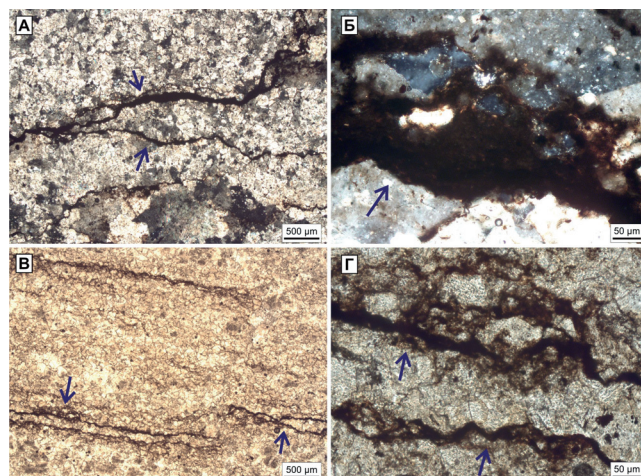


Рис. 3. Типовое распределение битумопроявлений в микротрещинах пород хатыспытской свиты. Фотографии шлифов, сделанные под микроскопом в проходящем свете: А, Б – образца K602-42.9 (известняк); В, Г – образца K602-53.3 (известняк кремнистый)

Рассмотрим характеристику насыщенных углеводородов битумов.

Распределение нормальных алканов, как правило, характеризуется максимумом на  $n-C_{23-25}$ . Отношение  $n-C_{27}/n-C_{17}$  изменяется в пределах 0,5-1,6. Такая закономерность была отмечена ранее для некоторых образцов битумоидов хатыспытской свиты. Обычно в составе их алканов преобладают  $n-C_{17-20}$  (Конторович и др., 1995; Каширцев, 2004; Парфенова и др., 2010; Мельник и др., 2019). На газожидкостных хроматограммах насыщенных фракций битумов видны высокие «нафтеновые горбы» (Петров, 1984) и аномально высокие пики стеранов и терпанов на фоне алканов (рис. 4). Отношения изопреноидов Pr/Ph варьируют от 0,3 до 1,0 (табл. 2). Значения Pr/ $n-C_{17}$  и Ph/ $n-C_{18}$  битумоидов в среднем выше и составляют 0,34-0,37 и 0,39-0,51, соответственно, отношение суммы нормальных алканов к сумме изопреноидных понижено (среднее – 12,7) по сравнению с автохтонными битумоидами (Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2016; Мельник и др., 2019). Среднее значение коэффициента нечетности нормальных алканов (CPI, табл. 2) для УВ битумов, как и для нормальных алканов автохтонных битумоидов (Парфенова и др., 2010; Melnik et al., 2019), равно 1,1.

На хроматограммах насыщенных фракций битумов обнаружены 12- и 13-монометилалканы в низких концентрациях (рис. 4). Впервые они отмечены в нескольких

Образец		K604-1.4	K601C-(-2.5)	K602-38.2	K602-42.9	K602-53.3
НО, %		8	10	57	4	14
$C_{орг}$ , %		0,07	0,18	0,87	0,23	0,33
$b_{хл}$ , %		0,009	0,02	0,125	0,034	0,045
$\beta$ , %		9,1	8,5	10,8	11,3	10,3
Содержание в битуме, %	Насыщенные УВ	20,3	48,2	15,1	15,2	11,9
	Ароматические УВ	1,4	5,0	16,7	23,9	16,5
	$\Sigma$ УВ	21,6	53,2	31,8	39,0	28,4
	$\Sigma$ смол	78,4	46,8	59,3	54,5	61,1
	Асфальтены	не определены	не определены	8,9	6,5	10,5

Табл. 1. Геохимическая характеристика пород и рассеянных битумов хатыспытской свиты.

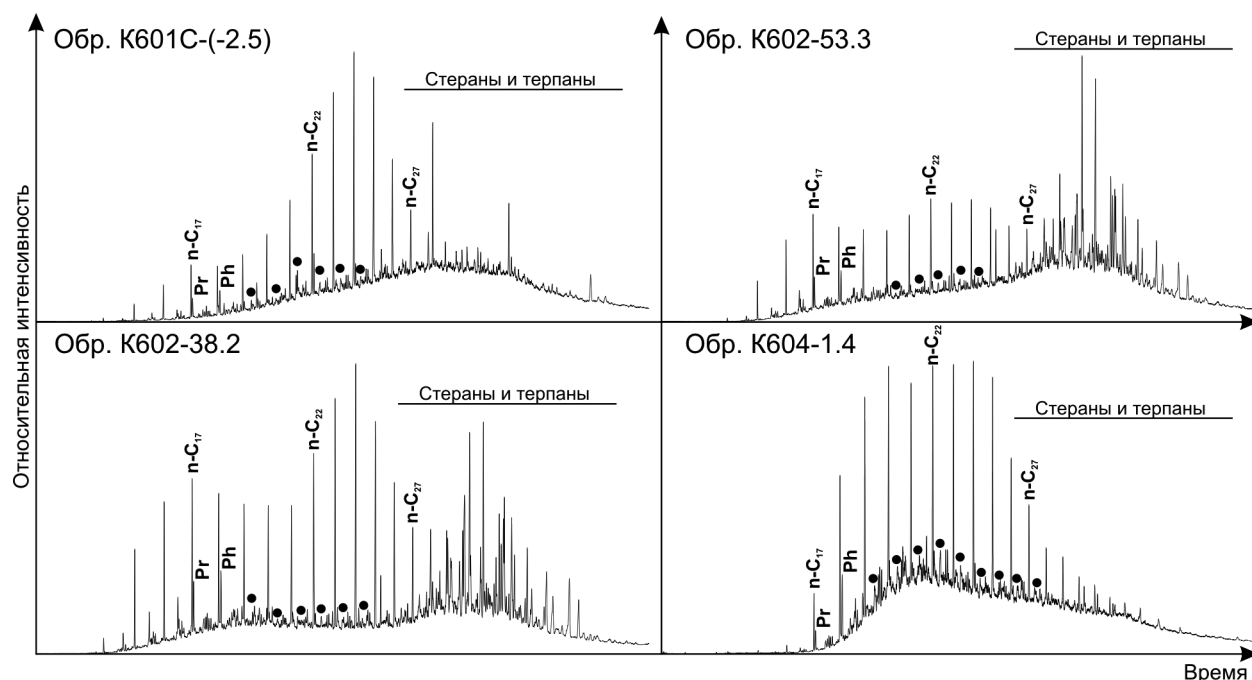


Рис. 4. Газожидкостные хроматограммы насыщенных фракций битумов из пород хатыспытской свиты. n-Ci – нормальные алканы, Pr – пристан, Ph – фитан, черные точки – 12- и 13-монометилалканы и их низкомолекулярные гомологи.

Образец		K604-1.4	K601C-(-2.5)	K602-38.2	K602-42.9	K602-53.3
Алканы	Pr/Ph	0,31	0,78	0,91	0,83	0,96
	Pr/n-C <sub>17</sub>	0,36	0,37	0,35	0,35	0,34
	Ph/n-C <sub>18</sub>	0,41	0,51	0,43	0,39	0,44
	n-C <sub>27</sub> /n-C <sub>17</sub>	1,6	1,2	0,6	0,7	0,5
	$\sum n-C/\sum iso-C$	9,5	13,8	12,9	16,3	10,8
	CPI*	1,2	1,5	1,0	1,0	1,1
Стераны	C <sub>29</sub> /C <sub>27</sub>	1,0	1,3	2,4	2,9	2,6
	20S/(20S+20R)	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
	$\beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2
Терпаны	Ts/Tm	0,8	0,9	0,5	0,4	0,4
	Гопаны C <sub>29</sub> /C <sub>30</sub>	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9
	Гопаны C <sub>35</sub> /C <sub>34</sub>	0,8	0,9	1,3	0,9	0,9
	Моретан C <sub>32</sub> S/R	0,9	0,5	1,4	1,2	1,1
	Ga, %	0,02	0,5	7,2	7,3	6,4

Табл. 2. Характеристика углеводородов насыщенных фракций битумов хатыспытской свиты. Примечание: \* – Carbon preference index.  $CPI=0,5*((C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33})/(C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}+C_{34}))+((C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33})/(C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}))$  (Peters et al., 2005).

образцах автохтонных битумоидов (Мельник и др., 2019). Ранее, анализируя единичные пробы, эти углеводороды докембрийского ОВ (Петров, 1984; Peters et al., 2005) диагностировать не удавалось (Конторович и др., 1995; Каширцев, 2004; Парфенов и др., 2010 и др.).

Проанализированы стераны по масс-хроматограммам m/z 217, 218 и 231. Установлено, что для битумов, как и для автохтонных битумоидов, наблюдается два типа распределения стеранов. Содержание холестеранов меняется в интервале 21-35% (на сумму C<sub>27</sub>-C<sub>30</sub>), метилхолестеранов – 16-27%, этилхолестеранов – 35-59%, пропилхолестеранов – 1-4%. Отношение C<sub>29</sub>/C<sub>27</sub> изменяется от 1,0-1,3 до 2,4-2,9. Установлено присутствие 4-метилстигмастана (по m/z 217 и 231) – биомаркера динофлагеллят (Peters et al., 2005). Этот УВ ранее обнаружен в битумоиде и пиролизате образца породы хатыспытской свиты

(Duda et al., 2016). Одной из задач проекта РНФ был поиск биомаркеров древних губок, однако ни 24-изопротилхолестан (Peters et al., 2005), ни 26-метилстигмастан (Zumberge et al., 2018) не были идентифицированы. Соотношение изомеров этилхолестана C<sub>29</sub> 20S/(20S+R) сохраняется на уровне 0,4-0,5. Величины отношения диастеранов к регулярным стеранам ( $\beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ ) варьируют от 0,15 до 0,55 (табл. 2).

Среди терпанов на хроматограммах по m/z 191 изучены трицикланы, тетрацикланы, гопаны, гомогопаны, моретаны и гаммацеран (рис. 5). Выявлено, что преобладают гопаны и гомогопаны (до 81%). Отношение гопанов Ts/Tm в среднем составляет 0,6; C<sub>29</sub>/C<sub>30</sub> – 0,9. Установлено два типа распределения гомогопанов (C<sub>35</sub>>C<sub>34</sub>, C<sub>32</sub>≥C<sub>31</sub> и C<sub>31</sub>>C<sub>32</sub>>C<sub>33</sub>>C<sub>34</sub>>C<sub>35</sub>), а значения гомогопанового индекса C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub> (Vaz Dos Santos et al., 1998; Каширцев, 2004)

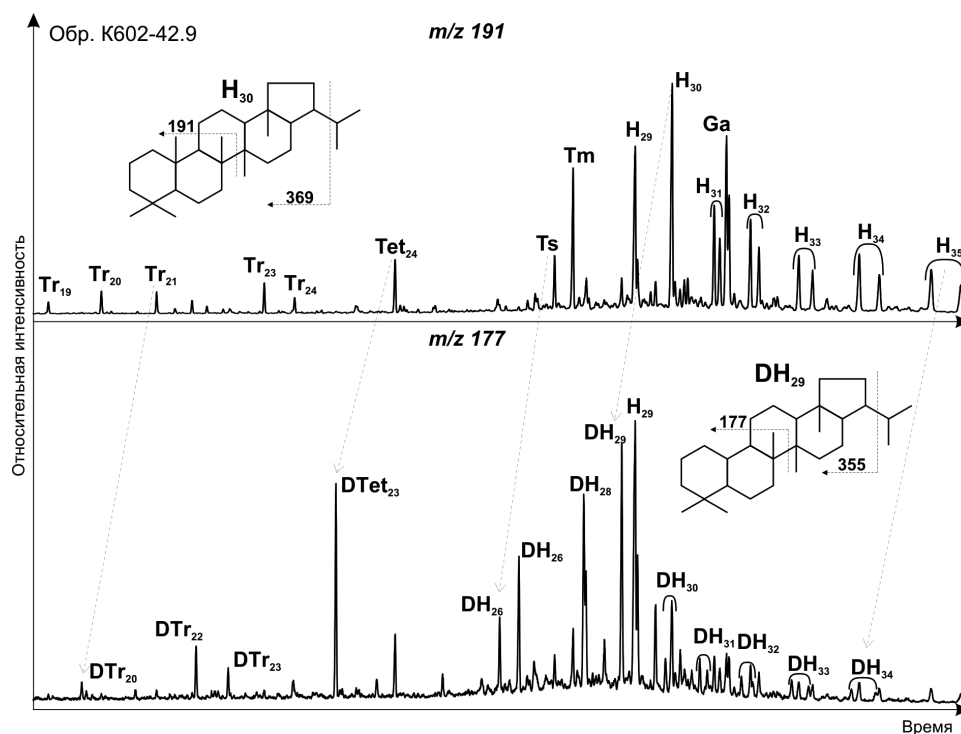


Рис. 5. Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 и 177 насыщенной фракции битума из породы хатыспытской свиты. Ts – триснорнеогопан, Tm – трисноргопан,  $Tr_i$  – трицикланы,  $Tet_{24}$  – тетрациклан,  $H_i$  – гопаны и гомогопаны; деметилированные терпаны:  $DTr_i$  – трицикланы,  $DTet_{23}$  – тетрациклан,  $DH_i$  – гопаны и гомогопаны; Ga – гаммацеран.

изменяется от 0,8 до 1,3. Трицикланы фиксируются на уровне от 12-13 до 22-28% на сумму терпанов. Среди них преобладают гомологи  $C_{21}$  и  $C_{23}$ , значения трицикланового индекса ( $2 \cdot \sum C_{19-20} / \sum C_{23-26}$ ) варьируют в пределах 0,3-1,1 (среднее – 0,7). Содержание моретанов, как правило, не превышает 5% на сумму терпанов, а соотношение изомеров моретана  $C_{32}$ S/R в среднем составляет 1,0. Гаммацеран обнаружен как в высоких концентрациях (7,3% на сумму терпанов), так и в низких (0,02%).

Ближние распределения и соотношения УВ установлены для алканов, стеранов и терпанов автохтонных битумидов хатыспытской свиты (Каширцев, 2004; Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2016; Каширцев и др., 2018; Мельник и др., 2019; Melnik et al., 2019). Это указывает, что их источником было ОВ хатыспытских отложений.

Пониженные значения отношения гопанов  $C_{35}/C_{34}$  до 0,8 и содержания гаммацерана (меньше 1%) битумов указывают на то, что исходное ОВ накапливалось в субвосстановительных условиях, повышенные ( $C_{35}/C_{34}$  до 1,3 и Ga до 7%) – в аноксических обстановках. В вендском морском бассейне условия седиментации и диагенеза менялись. Распределения алканов, изопреноидов, терпанов и стеранов битумов показывают, что основой биоматериала для ископаемого ОВ послужили археи, водоросли, бактерии (Петров, 1984; Peters et al., 2005).

В насыщенных фракциях исследуемых битумов на масс-хроматограммах по  $m/z$  177 были впервые идентифицированы не только деметилированные гопаны и гомогопаны, но и тетрацикланы и трицикланы (рис. 5). Известно, что они элюируются раньше регулярных терпанов, так как их молекулярная масса меньше на 14 единиц. Их наличие свидетельствует о высокой степени биодеградации УВ (Петров, 1984; Каширцев, 1988; Peters et al., 2005). По молекулярной массе равной 414 и фрагмент-ионам  $m/z$

123 и 193 идентифицирован 8,14-секогопан, устойчивый к биологическому окислению УВ (Peters et al., 2005).

Известно, что первыми бактериальному окислению подвергаются нормальные алканы, затем изопреноиды, после этого гопаны и гомогопаны, в конце тетрацикланы и трицикланы (Петров, 1984; Каширцев, 1988; Peters et al., 2005). В насыщенных фракциях исследованных нами проб обнаружены и деметилированные терпаны, и алканы. Это, вероятно, свидетельствует о смешении битумов разных этапов генерации и заполнения порового пространства. Битумы, образованные в результате первого этапа, подверглись сильному бактериальному окислению, в их насыщенных фракциях остались деметилированные терпаны. Последующая генерация и миграция привели к вторичному обогащению битумов алканами и изопреноидами. На газожидкостных хроматограммах (рис. 4) можно видеть, что соотношение алканов и терпанов в битумах существенно отличается, что указывает на разную интенсивность повторных процессов заполнения пор битумами и их биодеградация.

Ранее был изучен атомно-молекулярный состав битумов из пород туркутской свиты венда и кессюсинской серии отложений венда и кембрия Оленекского поднятия. Особенности состава их углеводородов (высокое содержание гаммацерана, распределение стеранов с доминированием этилхолестанов, отсутствие 12- и 13-монометилалканов) позволили сделать вывод, что их источником было ОВ хатыспытской свиты (Конторович и др., 1995, 2000; Каширцев, 2004; Парфенова и др., 2010 и др.). Недавно, характеристика битумов (нефтей), генерированных обогащенными ОВ породами венда, была дополнена сведениями по геохимии ароматических биомаркеров (Каширцев и др., 2018). Таким образом, сибирскими исследователями показано, что природные

битумы венда и нижнего кембрия Восточно-Анабарского и Центрально-Оленекского скоплений обязаны своим происхождением реализации генерационного потенциала пород хатыспытской свиты. Материалы авторов настоящей работы дополняют прежние результаты и демонстрируют расширенный комплекс молекулярных параметров, характеризующий битумы, генетически связанные с автохтонным ОВ хатыспытской свиты (Мельник и др., 2019; Melnik et al., 2019): новое распределение стеранов с близкими концентрациями холестанов и этилхолестанов; присутствие 12- и 13-монометилалканов в низких концентрациях; низкое содержание гаммацера и другие. Залежи нефтей или битумов, генетически связанных с автохтонным ОВ хатыспытской свиты, могут быть найдены в осадочных бассейнах на арктической территории Восточной Сибири.

## Заключение

Выполненное геохимическое исследование органического вещества пород хатыспытской свиты венда позволило сделать следующие выводы.

1. В породах хатыспытской свиты присутствуют рассеянные битумопроявления – прямые признаки нефтеносности. Особенности состава углеводородов битумов в основном унаследованы от ОВ нефтепроизводивших пород хатыспытской свиты. Значения соотношений гопанов  $Ts/Tm$  на уровне 0,6, индекса  $CPI - 1,1$ , изомеров этилхолестана  $C_{29}20S/(20S+R) - 0,5$  позволяют оценивать зрелость битумов и исходного ОВ на уровне начального мезокаатагенеза.

2. Выявленные особенности геохимии насыщенных биомаркеров указывают на то, что битумы хатыспытской свиты биодеградированы в гипергенезе. Групповой состав битумов и состав УВ их насыщенных фракций является результатом смешения битумов нескольких этапов генерации, первичной миграции и биологического окисления.

3. Местонахождение рассеянных битумов в разных частях разреза хатыспытской свиты Оленекского поднятия показывает, что при благоприятных геологических условиях скопления нефти (битумов) могут быть обнаружены не только в вышележащих вендских и кембрийских отложениях, как это отмечалось ранее, но и в разрезе хатыспытской свиты.

## Благодарности/Финансирование

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ (№ 0331-2019-0022 и 0266-2019-0006) и гранта РФФИ 17-17-01241.

## Литература

Баженова Т.К., Белецкая С.Н., Беляева Л.С., Биккенина Д.А., Гурко Н.Н., Ивановская А.В., Ипатов Ю.И., Кичуева У.О., Макаров К.К., Неручев С.Г., Парларова Г.М., Рогозина Е.А., Рудавская В.А., Соловьева И.Л., Файзуллина Е.М., Шапиро А.И., Шиманский В.К., Шуменкова Ю.М., Арефьев О.А., Гуляева Н.Д., Кулибакина И.Б., Работнов В.Т., Прохоров В.С., Шадский И.П. (1981). Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Л.: Недра, 211 с.

Гусев А.И. (1950). Геология, угленосность и нефтеносность низовьев реки Оленек. Труды НИИ геологии Арктики МинГео СССР, 1, 101 с.

Журавлев В.С., Сороков Д.С. (1954). Литолого-стратиграфическое подразделение кембрийских отложений Оленекского сводового поднятия. Сборник статей по геологии Арктики. Выпуск 3: Труды научного исследовательского института геологии Арктики, 43, с. 27-48.

Карлова Г.А. (1987). Первые находки скелетной фауны в туркутской свите Оленекского поднятия. Доклады Академии наук, 292(1), с. 204-205.

Каширцев В.А. (1988). Природные битумы северо-востока Сибирской платформы. Якутск, 103 с.

Каширцев В.А. (2004). Генетические семейства верхнедокембрийских и кембрийских нефтей (нафтидов) на востоке Сибирской платформы. Геология и геофизика, 45(7), с. 895-900.

Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Головкин А.К., Никитенко Б.Л., Зуева И.Н., Чалая О.Н. (2018). Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фанерозойских отложений и в нефтях Сибирской платформы. Геология и геофизика, 59(10), с. 1720-1729. <https://doi.org/10.15372/GiG20181013>

Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Моисеев С.А., Черных А.В., Новиков Д.А., Бурштейн Л.М., Долженко К.В., Рогов В.И., Мельник Д.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н. (2019). Прямые признаки нефтегазоносности и нефтематеринские отложения Суханского осадочного бассейна Сибирской платформы. Геология и геофизика, 60(10), с. 1472-1487.

Конторович А.Э., Каширцев В.А., Филп Р.П. (1995). Биогапаны в отложениях докембрия северо-востока Сибирской платформы. Доклады РАН, 345(1), с. 106-110.

Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Тимошина И.Д., Махнева Е.А. (2000). Семейство верхнедокембрийских нефтей Сибирской платформы. Доклады РАН, 370(1), с. 92-95.

Мельник Д.С., Парфенова Т.М., Рогов В.И. (2019). Геохимия насыщенных углеводородов-биомаркеров рассеянного органического вещества хатыспытской свиты неопротерозоя (северо-восток Сибирской платформы). Мат. 2-й Всерос. науч. конф.: Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири. Новосибирск, с. 96-99.

Натапов Л.М. (1962). Отложения типа доломитовой формации на северо-востоке Сибирской платформы. Советская геология, 11, с. 110-112.

Парфенова Т.М., Кочнев Б. Б., Наговицин К.Е., Иванова Е.Н., Каширцев В.А., Конторович А.Э. (2010). Геохимия органического вещества хатыспытской свиты (венд, северо-восток Сибирской платформы). Мат. Всерос. науч. конф.: Успехи органической геохимии. Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 265-268.

Петров Ал.А. (1984). Углеводороды нефти. Москва: Наука, 263 с.

Рогов В.И., Карлова Г.А., Марусин В.В., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Гражданкин Д.В. (2015). Время формирования первой биостратиграфической зоны венда Сибирской гипостратотипе. Геология и геофизика, 56(4), с. 735-747. <https://doi.org/10.15372/GiG20150408>

Ступакова А.В., Сулова А.А., Большакова М.А., Сауткин Р.С., Санникова И.А. (2017). Бассейновый анализ для поиска крупных и уникальных месторождений в Арктике. Георесурсы, спецвыпуск, с. 19-35. <https://doi.org/10.18599/grs.19.4>

Bowring S.A., Grotzinger J.P., Isachsen C.E., Knoll A.H., Pelechaty S.M., Kolosov P. (1993) Calibrating rates of Early Cambrian evolution. Science, 261, pp. 1293-1298. <https://dx.doi.org/10.1126/science.11539488>

Cui H., Grazhdankin D.V., Xiao S., Peek S., Rogov V.I., Bykova N.V., Sievers N.E., Liu X.-M., Kaufman A.J. (2016). Redox-dependent distribution of early macro-organisms: Evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 461, pp. 122-139. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.08.015>

Duda J.-P., Thiel V., Reitner J., Grazhdankin D. (2016). Opening up a window into ecosystems with Ediacara-type organisms: preservation of molecular fossils in the Khatyspyt Lagerstätte (Arctic Siberia). Palaeontologische Zeitschrift, 90(4), pp. 659-671. <https://doi.org/10.1007/s12542-016-0317-5>

Grazhdankin D. (2004) Patterns of distribution in the Ediacaran biotas: facies versus biogeography and evolution. Paleobiology, 30, pp. 203-221. [http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373\(2004\)030<0203:PODITE>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373(2004)030<0203:PODITE>2.0.CO;2)

Kaufman A.J. (2019) The Ediacaran-Cambrian transition: A resource-based hypothesis for the rise and fall of the ediacara biota. Chemostratigraphy across major chronological boundaries, Geophysical Monograph 240, First Edition, pp. 115-142. <https://doi.org/10.1002/9781119382508.ch7>

Melnik D., Parfenova T., Grazhdankin D., Rogov V. (2019). Deposition of the Khatyspyt facies, Northeastern Siberia. 29th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG-2019). Abstracts. Gothenburg, Sweden. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902903>

Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. (2015). Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. Precambrian Research, 270, pp. 226-245. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.012>

Peters K.E., Walters C.C., Moldovan J.M. (2005). The biomarker guide. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1155 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868>

Rogov V.I., Marusin V., Bykova N.V., Goy Y., Nagovitsin K.E., Kochnev B.B., Karlova G., Grazhdankin D.V. (2012). The oldest evidence of bioturbation on Earth. *Geology*, 40, pp. 395-398. <https://doi.org/10.1130/G32807.1>

Rogov V.I., Marusin V., Bykova N.V., Goy Y., Nagovitsin K.E., Kochnev B.B., Karlova G., Grazhdankin D.V. (2012). The oldest evidence of bioturbation on Earth: Reply. *Geology*, 41(5), p. 290. <https://doi.org/10.1130/G32807.1>

Soldatenko Y., Albani A.E.I., Ruzina M., Fontane C., Nesterovsky V., Paquette J.-L., Meunier A., Ovtcharova M. (2019). Precise U-Pb age constraints on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine. *Scientific Reports*, 9, Article number 1675. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38448-9>

Vaz Dos Santos E.N., Hayes J.M., Takaki T. (1998). Isotopic biogeochemistry of the Neocomian lacustrine and Upper Aptian marine-evaporitic sediments of the Potiguar Basin, Northeastern Brazil. *Organic Geochemistry*, 28(6), pp. 361-381. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00007-2)

Zumberge J.A., Love G.D., Cardenas P., Sperling E.A., Gunasekera S., Rohrsen M., Grosjean E., Grotzinger J.P., Summons R.E. (2018). Demosponge steroid biomarker 26-methylstigmastane provides evidence for Neoproterozoic animals. *Nature Ecology & Evolution*, 2(11), pp. 1709-1714. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0676-2>

Статья поступила в редакцию 18.10.2019;

Принята к публикации 05.03.2020;

Опубликована 30.06.2020

## Сведения об авторах

*Дмитрий Сергеевич Мельник* – младший научный сотрудник лаборатории проблем геологии, разведки и разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; аспирант геолого-геофизического факультета, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3

E-mail: [MelnikDS@ipgg.sbras.ru](mailto:MelnikDS@ipgg.sbras.ru)

*Татьяна Михайловна Парфенова* – канд. геол.-мин. наук, заместитель директора, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; старший преподаватель, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3

*Владимир Игоревич Рогов* – научный сотрудник лаборатории палеонтологии и стратиграфии докембрия, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3

IN ENGLISH

## Biodegraded bitumens dispersed in Vendian (Neoproterozoic) rocks of the Khatyspyt Formation, Northeastern Siberia

D.S. Melnik<sup>1,2\*</sup>, T.M. Parfenova<sup>1,2</sup>, V.I. Rogov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

\*Corresponding author: Dmitrii S. Melnik, e-mail: [melnikds@ipgg.sbras.ru](mailto:melnikds@ipgg.sbras.ru)

**Abstract.** The organic matter of the Vendian (Neoproterozoic) Khatyspyt Formation was investigated. The new data obtained from the GC and GC-MS analyses include: high UCM humps and heightened peaks of steranes and terpanes against the backdrop of C27+ alkanes on chromatograms of saturated hydrocarbons fractions of five samples; predominance of C21-C26 in n-alkanes distribution; the presence of 12- and 13-monomethylalkanes on chromatograms and demethylated terpanes on filtered chromatograms (m/z 191 and 177). Besides, dispersed bitumens with biodegraded hydrocarbons have been for the first time identified in carbonate and carbonate-siliceous rocks of the Khatyspyt Formation. Also 8,14-sekohopanes resistant to biodegradation and gammacerane were established.

The revealed features of the composition and distribution of hydrocarbons showed that their source was the autochthonous (syngenetic) organic matter of the Khatyspyt Formation, one of the potential hydrocarbon source rock of Northeastern Siberia. The composition and content of bitumen are found to be controlled by the inputs of primary organisms (eukaryotes and prokaryotes) which lived in Vendian seas, by changing redox conditions of sediment deposition and transformation, as well as by relatively little effect of temperature and high degree of biological oxidation in hypergenesis.

The patterns of bitumen distribution throughout the section show, that besides the overlying deposits, their accumulations can be discovered in the Khatyspyt Formation.

**Keywords:** organic geochemistry, potential source rock, dispersed bitumens, saturated hydrocarbons (biomarkers), biodegradation, Khatyspyt Formation, Vendian (Neoproterozoic), Siberian Platform

**Recommended citation:** Melnik D.S., Parfenova T.M., Rogov V.I. (2020). Biodegraded bitumens dispersed in Vendian (Neoproterozoic) rocks of the Khatyspyt Formation, Northeastern Siberia. *Georesursy = Georesources*, 22(2), pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.37-44>

## References

Bazhenova T.K., Beletskaya S.N., Belyaeva L.S., Bikkenina D.A., Gurko N.N., Ivanovskaya A.V., Ipatov Yu.I., Kichueva U.O., Makarov K.K., Neruchev S.G., Parparova G.M., Rogozina E.A., Rudavskaya V.A., Solov'eva I.L., Faizullina E.M., Shapiro A.I., Shimanskii V.K., Shumenkova Yu.M., Aref'ev O.A., Gulyaeva N.D., Kulibakina I.B., Rabotnov V.T., Prokhorov V.S., Shadskii I.P. (1981). Organic geochemistry of the Paleozoic and Pre-Paleozoic Siberian platform and oil and gas potential. Leningrad: Nedra, 211 p. (In Russ.)

Bowring S.A., Grotzinger J.P., Isachsen C.E., Knoll A.H., Pelechaty S.M., Kolosov P. (1993) Calibrating rates of Early Cambrian evolution. *Science*, 261, pp. 1293-1298. <https://dx.doi.org/10.1126/science.11539488>

Cui H., Grazhdankin D.V., Xiao S., Peek S., Rogov V.I., Bykova N.V., Sievers N.E., Liu X.-M., Kaufman A.J. (2016). Redox-dependent distribution of early macro-organisms: Evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 461, pp. 122-139. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.08.015>

Duda J.-P., Thiel V., Reitner J., Grazhdankin D. (2016). Opening up a window into ecosystems with Ediacara-type organisms: preservation of molecular fossils in the Khatyspyt Lagerstätte (Arctic Siberia).

*Palaontologische Zeitschrift*, 90(4), pp. 659-671. <https://doi.org/10.1007/s12542-016-0317-5>

Grazhdankin D. (2004) Patterns of distribution in the Ediacaran biotas: facies versus biogeography and evolution. *Paleobiology*, 30, pp. 203-221. [http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373\(2004\)030<0203:PODITE>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373(2004)030<0203:PODITE>2.0.CO;2)

Gusev A.I. (1950). Geology, coal content and oil content of the lower reaches of the Olenek River. *Proceedings of the Institute of Arctic Geology of the Ministry of Geology of the USSR*, 1, 101 p. (In Russ.)

Karlova G.A. (1987). The first finds of skeletal fauna in the Turkut suite of the Olenek uplift. *Doklady Akademii nauk*, 292(1), pp. 204-205. (In Russ.)

Kashirtsev V.A. (1988). Natural bitumen of the northeast of the Siberian platform. Yakutsk, 103 p. (In Russ.)

Kashirtsev V.A. (2004). Genetic families of Late Precambrian and Cambrian oils (naphthides) in the east of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 7, pp. 846-851.

Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Golovko A.K., Nikitenko B.L., Zueva I.N., Chalaya O.N. (2018). Phenanthrene biomarkers in the organic matter of Precambrian and Phanerozoic deposits and in the oils of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 59(10), pp. 1720-1729. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20181013>

Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Moiseev S.A., Chernykh A.V., Novikov D.A., Burshtein L.M., Dolzhenko K.V., Rogov V.I., Melnik D.S., Zueva I.N., Chalaya O.N. (2019). Direct signs of oil and gas potential and source deposits of the Sukhan sedimentary basin of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 60(10), pp. 1472-1487. (In Russ.)

Kaufman A.J. (2019) The Ediacaran-Cambrian transition: A resource-based hypothesis for the rise and fall of the ediacara biota. *Chemostratigraphy across major chronological boundaries, Geophysical Monograph 240, First Edition*, pp. 115-142. <https://doi.org/10.1002/9781119382508.ch7>

Kontorovich A. E., Kashirtsev V. A., Filp R. P. (1995). Biogopans in Precambrian sediments of the northeast of the Siberian platform. *Doklady RAN*, 345(1), p. 106-110. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Melenevskii V.N., Timoshina I.D., Makhneva E.A. (2000). Group of Upper Precambrian oils of the Siberian platform. *Doklady RAN*, 370(1), pp. 92-95. (In Russ.)

Melnik D., Parfenova T., Grazhdankin D., Rogov V. (2019). Deposition of the Khatyspyt facies, Northeastern Siberia. *29th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG-2019)*. Abstracts. Gothenburg, Sweden. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902903>

Melnik D.S., Parfenova T.M., Rogov V.I. (2019). Geochemistry of saturated hydrocarbon biomarkers of dispersed organic matter of the Khatyspyt Formation of the Neoproterozoic (northeast of the Siberian Platform). *Proc. 2nd All-Russ. sci. conf.: Actual problems of the geology of oil and gas of Siberia*. Novosibirsk, pp. 96-99. (In Russ.)

Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. (2015). Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. *Precambrian Research*, 270, pp. 226-245. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.012>

Natapov L. M. (1962). Deposits of the Domanik formation type in the northeast of the Siberian platform. *Sovetskaya geologiya*, 11, p. 110-112. (In Russ.)

Parfenova T. M., Kochnev B. B., Nagovitsin K. E., Ivanova E. N., Kashirtsev V. A., Kontorovich A. E. (2010). Geochemistry of organic matter of the Khatyspyt Formation (Vendian, northeast of the Siberian Platform). *Proc. Sci. Conf.: Advances Organic Geochemistry*. Novosibirsk: INGG SO RAN, pp. 265-268. (In Russ.)

Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005). The biomarker guide. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1155 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868>

Petrov A.I.A. (1984). Hydrocarbons of oil. Moscow: Nauka, 263 p. (In Russ.)

Rogov V.I., Karlova G.A., Marusin V.V., Kochnev B.B., Nagovitsin K.E., Grazhdankin D.V. (2015). The formation time of the first biostratigraphic zone of the Vendian of the Siberian hypostratotype. *Russian Geology*

and *Geophysics*, 56(4), pp. 735-747. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20150408>

Rogov V.I., Marusin V., Bykova N.V., Goy Y., Nagovitsin K.E., Kochnev B.B., Karlova G., Grazhdankin D.V. (2012). The oldest evidence of bioturbation on Earth. *Geology*, 40, pp. 395-398. <https://doi.org/10.1130/G32807.1>

Rogov V.I., Marusin V., Bykova N.V., Goy Y., Nagovitsin K.E., Kochnev B.B., Karlova G., Grazhdankin D.V. (2012). The oldest evidence of bioturbation on Earth: Reply. *Geology*, 41(5), p. 290. <https://doi.org/10.1130/G32807.1>

Soldatenko Y., Albani A.E.I., Ruzina M., Fontane C., Nesterovsky V., Paquette J.-L., Meunier A., Ovtcharova M. (2019). Precise U-Pb age constraints on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine. *Scientific Reports*, 9, Article number 1675. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38448-9>

Stoupakova A.V., Suslova A.A., Bolshakova M.A., Sautkin R.S., Sannikova I.A. (2017). Basin analysis for the search of large and unique fields in the Arctic region. *Georesursy = Georesources*, Special issue, pp. 19-35. <http://doi.org/10.18599/grs.19.4>

Vaz Dos Santos E.N., Hayes J.M., Takaki T. (1998). Isotopic biogeochemistry of the Neocomian lacustrine and Upper Aptian marine-evaporitic sediments of the Potiguar Basin, Northeastern Brazil. *Organic Geochemistry*, 28(6), pp. 361-381. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00007-2)

Zhuravlev V.S., Sorokov D.S. (1954) The litho-stratigraphic unit of the Cambrian sediments of the Olenek uplift. *Proc. of the Institute of Arctic geology*, 43, pp. 27-48. (In Russ.)

Zumberge J.A., Love G.D., Cardenas P., Sperling E.A., Gunasekera S., Rohrsen M., Grosjean E., Grotzinger J.P., Summons R.E. (2018). Demosponge steroid biomarker 26-methylstigmastane provides evidence for Neoproterozoic animals. *Nature Ecology & Evolution*, 2(11), pp. 1709-1714. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0676-2>

#### About the Authors

**Dmitrii S. Melnik** – Junior Researcher, Laboratory of the problems of geology, exploration and development of hard-to-recover oil, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student, Novosibirsk State University  
3, Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

E-mail: MelnikDS@ipgg.sbras.ru

**Tatyana M. Parfenova** – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy Director for Research, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Senior Lecturer, Novosibirsk State University  
3, Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

**Vladimir I. Rogov** – Researcher of the Precambrian paleontology and stratigraphy laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
3, Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Manuscript received 18 October 2019;

Accepted 5 March 2020;

Published 30 June 2020