

УДК 550.46(282.257.21)

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ГИДРОТЕРМАХ ПАУЖЕТСКОГО РАЙОНА: СОСТАВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ДРУГИМИ ОБЪЕКТАМИ

© 2024 г. В. Н. Компаниченко^а, *, В. А. Потурай^а, **

^аИнститут комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
ул. Шолом-Алейхема, 4, Биробиджан, 679016 Россия

*e-mail: kompanv@yandex.ru; **e-mail: poturay85@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 13.05.2024 г.

Исследован состав органического вещества (ОВ) средней летучести в конденсате пароводяной смеси (КПС) из глубоких эксплуатационных скважин Паужетского геотермального месторождения. Методами твердофазной экстракции и хромато-масс-спектрометрии в исследуемом КПС установлено 17 органических соединений, среди которых 14 компонентов относятся к алифатическим и ароматическим углеводородам (УВ). Именно эти компоненты резко преобладают в Паужетской гидротермальной системе и в ряде других геотермальных месторождений на Камчатке, составляя более 60 %. По особенностям молекулярно-массового распределения предельных УВ, высокой температуре Паужетского месторождения (более 108 °С на устьях скважин) и отсутствию явно биогенных компонентов их происхождение связывается с термогенными процессами, которые заключаются в преобразовании органических остатков под действием высоких температур и давления. Остальные соединения гораздо меньше распространены и представлены, в основном, кислородсодержащими компонентами (кетоны, альдегиды, спирты). Сходство спектра органических соединений в КПС из Паужетского и Узонского геотермальных районов отчасти может быть связано с их экстрагированием из вулканогенно-осадочных толщ, содержащих захороненное органическое вещество.

Ключевые слова: конденсат пароводяной смеси, органическое вещество, углеводороды, молекулярно-массовое распределение, генезис

DOI: 10.31857/S0016752524080036, **EDN:** IZJEUJ

ВВЕДЕНИЕ

Паужетское геотермальное месторождение расположено в пределах Курило-Камчатской островной дуги на сочленении трех основных вулканических поясов Камчатки (Апрелков, 1971). Изучение этого района началось в советское время, когда был осуществлен комплекс исследований, включающий геологические, геофизические и гидрогеологические изыскания, целью которых было установление условий формирования этой гидротермальной системы, картирование термоконтролирующих гидрогеологических структур, изучения бальнеологических свойств растворов и т.д. (Пийп, 1937; Иванов, 1961; Аверьев, 1966; и др.). В то время здесь была построена первая в СССР ГеоЭС мощностью 11 МВт (Феофилактов, 2022). Исследования Паужетского месторождения были продолжены и после этого, когда были получены новые важные данные по этому району (Сугробов и др., 2016; Рычагов, 2017; Феофилактов, 2022). На сегодняшний день, Паужетское геотермальное месторождение и одноименная гидротермальная

система являются одними из наиболее изученных на Камчатке.

Данные о содержаниях органического вещества в гидротермах Паужетского района разрозненные. Еще в прошлом веке для Нижне-Кошелевских источников приводились содержания 0.3 мг/л органического вещества (ОВ), экстрагируемого хлороформом (Бескровный, Кудрявцева, 1977). В 70-х годах группа ученых во главе с Л. М. Мухиным изучала наличие и концентрации аминокислот в термальных растворах и конденсатах пароводяной смеси в контексте проблемы зарождения жизни в нескольких геотермальных районах Камчатки, в том числе и в Паужетском (Мухин и др., 1979). Всего в горячих источниках ими было установлено 12 аминокислот биогенного генезиса, представлявших продукты жизнедеятельности термофильных микроорганизмов. Однако в стерильном конденсате пароводяной смеси из скважин Паужетского месторождения ими была обнаружена простейшая аминокислота глицин, что позволило авторам высказать предположение о ее абиогенном генезисе и возможности ее участия в возникновении первичных форм жизни в гидротермальной среде

на ранней Земле. Стоит отметить исследования ОВ в других гидротермальных системах Камчатки, которые не затрагивали напрямую Паужетский геотермальный район, но позволили увидеть картину особенностей состава ОВ и его распределения в конденсате пароводяной смеси (КПС) и высокотемпературных термальных водах, а также в нефтепроявлениях вблизи выходов горячих источников (Бескровный, Лебедев, 1971; Галимов и др., 2015; Исидоров и др., 1991; Калинин, 1975; Коноплева и др., 2018; Конторович и др., 2011; Фурсенко и др., 2014; Швец, Селецкий, 1968; Vazhenova et al., 1998; Simoneit et al., 2009). Например, в нефтепроявлениях кальдеры Узон было установлено преобладание четных низкомолекулярных *n*-алканов над нечетными (Галимов и др., 2015). В контексте исследования стерильных КПС Паужетского района представляют интерес данные по ОВ в высокотемпературных КПС Лос Умерос в Мексике (Sanchez-Avila et al., 2021), где также было установлено доминирование четных углеводородов (УВ), связанное авторами с процессами гидротермального изменения/разложения ОВ и термогенным генезисом *n*-алканов.

Таким образом, к настоящему времени имеются некоторые данные по составу аминокислот и общему содержанию ОВ в гидротермах данного района. Однако в стороне от изучения осталась наиболее многочисленная группа — органические соединения средней летучести, которая представляет значительный интерес и широко представлена в природе. Именно эти компоненты изучались нами на основе анализа проб стерильного КПС, отобранных из скважин Паужетского месторождения, результаты исследования которых приводятся в настоящей работе.

Так как в работе речь пойдет об ОВ в высокотемпературном стерильном КПС, следует отметить, что известны два основных механизма не биогенного происхождения ОВ в гидротермальных системах — термогенные и абиогенные процессы. К термогенным процессам относятся как термическое разложение высокомолекулярных органических компонентов (белков, липидов, ДНК) на более простые, так и перегруппировка соединений в условиях высоких температур и давления (конденсация, расщепление, гидролиз, окисление, гидрирование и др.) (Konn et al., 2015; Rushdi, Simoneit, 2006). Абиогенные процессы — это химические реакции синтеза ОВ из неорганических молекул. В основном, они сводятся к восстановлению оксидов углерода водородом. Это имеет место преимущественно в высокотемпературных гидротермальных системах на дне океанов в результате процессов серпентинизации (Сорохтин и др., 2018; Aubrey et al., 2009; Cleaves et al., 2009; Fu et al., 2015; Holm, Charlou, 2001; Taran et al., 2010). Кроме этого, присутствие водорода именно в Камчатских гидротермальных системах может быть результатом взаимодействия с вулканами среднего состава. Для района Кошелевского

вулкана, к которому приурочено Паужетское геотермальное месторождение, есть данные по анализу газовой фазы в естественных газовых и парогазовых выходах. Водород есть почти во всех пробах с максимальным количеством до 3.54 % в объеме газовой фазы (Литасов, 1991).

На сегодняшний день нет надежных критериев определения генезиса УВ. Тем не менее, в качестве определенных маркеров происхождения ОВ используют данные по молекулярно-массовому распределению *n*-алканов. $\Sigma n-C_{10}-C_{14}$ — эти гомологи не являются типичными для живых организмах. По мнению (Шульга, Пересыпкин, 2012), *n*-алканы $n-C_{10}-C_{14}$ гидротермальной биотой не синтезируются. Гомологи $n-C_{15}$, $n-C_{17}$, $n-C_{19}$ синтезируются гидробионтами. *n*-алканы с длиной углеродной цепи до $n-C_{22}$ и доминированием нечетных гомологов характерны для бактерий. Углеводород $n-C_{25}$ синтезируется цианобактериями и при максимальном его содержании можно говорить о цианобактериальном происхождении *n*-алканов. Характерные “растительные” гомологи — $n-C_{25}$, $n-C_{27}$, $n-C_{29}$, $n-C_{31}$, синтезируются как часть эпикуткулярного воска листьев наземных растений (Hunt, 1979; Wang et al., 2019). Кроме этого, для расшифровки молекулярно-массового распределения *n*-алканов применяется ряд критериев (proxies), таких как CPI, ACL, OEP (Bray, Evans, 1961; Umoh et al., 2021; Wang et al., 2019). ACL (Average Chain Length) — средневзвешенное значение различных длин углеродных цепей (показывающий преобладание *n*-алканов в определенной области, в зависимости от длины углеродной цепи). Индексы нечетности OEP (odd-to-even predominance) — отношение нечетных гомологов к ближайшим четным. $OEP < 1$ и > 1 говорит о доминирующем биогенном источнике ОВ, а близкое к единице значение может свидетельствовать о высокой степени преобразования ОВ (в частности, в результате процессов термодиссоциации). Подробно об используемых критериях и формулы их расчета можно посмотреть в работе (Потурай, Компаниченко, 2019). При рассмотрении вопроса о происхождении ОВ также учитывается наличие или отсутствие характерных биогенных соединений в исследуемых водах — например, стероидов, наличие которых в Паужетских КПС не установлено, что, возможно, связано с действием высоких температур в геотермальном резервуаре, при которых высокомолекулярные соединения разрушаются до низкомолекулярных компонентов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологическое строение Паужетского района

Паужетский геотермальный район (более точно — Паужетско-Камбально-Кошелевский, согласно уточнению С. Н. Рычагова (Рычагов и др., 2009)) входит в состав Южно-Камчатской геотермальной

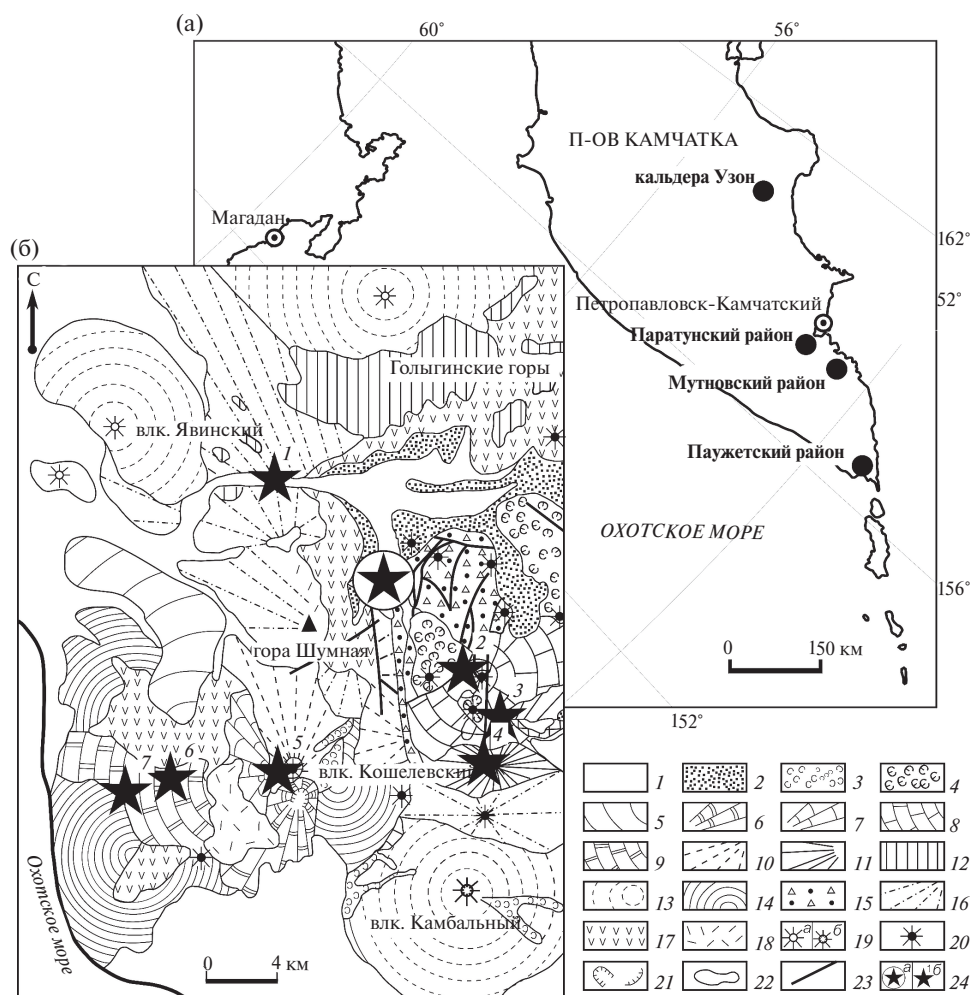


Рис. 1. Обзорная карта с местом расположения Паужетской гидротермальной системы (а) и схематическая геологическая карта Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района (б), по (Феофилактов и др., 2021), с изменениями: 1–3 — голоценовые отложения: 1 — аллювиальные, пролювиальные и ледниковые, 2 — пирокластические пемзовые, 3 — базальты и андезибазальты действующих вулканов и отдельные потоки лав; 4–6 — верхнеплейстоцен-голоценовые отложения: 4 — дацитовые и риолитовые экструзивные куполы и их лавовые потоки, 5 — андезиты Восточно-Кошелевского вулкана, 6 — андезибазальты Центрально-Кошелевского вулкана; 7, 8 — верхнеплейстоценовые отложения: 7 — андезиты вулкана Валентин, 8 — андезибазальты вулкана Черные Скалы; 9–12 — среднеплейстоценовые отложения: 9 — андезиты Западно-Кошелевского вулкана, 10 — базальты Древне-Кошелевского вулкана, 11 — андезибазальты Камбального хребта, 12 — игнимбриты и спекшиеся туфы риодацитов и риолитов Голыгинского хребта; 13 — ниже-средне-плейстоценовые вулканы базальтового и андезибазальтового составов; 14 — ниже-плейстоценовые лавы и туфы базальтов и андезибазальтов; 15, 16 — верхнеплиоцен-средне- и нижнеплейстоценовые отложения: 15 — вулканогенно-осадочные породы паужетской свиты, 16 — лавы и туфы древних вулканов; 17 — миоценовые, преимущественно вулканогенные, нерасчлененные отложения; 18 — рыхлые отложения различного генезиса и возраста; 19–21 — вулканические морфоструктуры: 19 — конусы вулканов (а — простые, б — с вершинным кратером), 20 — шлаковые конусы, мелкие моногенные вулканы и экструзии, 21 — кальдеры и остатки бортов кальдер; 22 — литологические границы; 23 — разрывные тектонические нарушения; 24 — крупные термоявления: а — Паужетское геотермальное месторождение, б — остальные термоявления (1 — Первые Горячие Ключи; 2–4 — группы термальных полей Камбального хребта: 2 — Северо-Камбальная, 3 — Центрально-Камбальная, 4 — Южно-Камбальная; 5, 6 — термоаномалии Кошелевского вулканического массива: 5 — Верхне-Кошелевская, 6 — Нижне-Кошелевская; 7 — Сивучинские термальные источники).

провинции (Аверьев, 1966) и находится в зоне Курило-Камчатской островной дуги на сочленении трех основных вулканических поясов Камчатки (Апрелков, 1971). Его географическое положение и схематическая геологическая карта показаны на рис. 1. В строении месторождения принимают

участие вулканогенно-осадочные, вулканические и интрузивные породы основного, среднего и кислого состава, возраст которых определяется в интервале от миоцена до плейстоцена (Феофилактов, 2022). Верхняя часть разреза сложена потоками лав андезидацитов и андезибазальтов, образованных на

этапе формирования тектоно-магматического поднятия Камбального хребта, а также туфами и туф-фитами верхнепаужетской подсытки и верхнечетвертичными отложениями Паужетского грабена. Выделяется несколько термальных полей в пределах месторождения: Восточно-, Верхне-, Южно- и Нижне-Паужетское (Феофилактов и др., 2021; Феофилактов, 2022).

Паужетская гидротермальная система относится к вододоминирующему типу. Термальные воды нейтральные до слабощелочных. Типичный состав воды — хлоридно-натровый. Общая минерализация равна 3–3.2 г/л в горячих источниках и 2.6–3.7 г/л в скважинах. Основными газами являются N_2 и CO_2 (Феофилактов, 2022). Температура растворов нижнего водоносного горизонта достигает 220 °С. С 1966 года работает Паужетская геотермальная электростанция. Глубокий пароводяной резервуар вскрыт несколькими десятками скважин (рис. 2). Глубина большинства из них колеблется от 600 до 1200 метров. Температура на устьях скважин составляет от 108 до 151 °С, давление от 1.7 до 5.1 бар. Пар и водный конденсат разделяются в устьях скважин, пар приводит в движение турбины Паужетской станции, а горячая вода свободно стекает вниз, образуя горячие водопады

и гейзеритовые отложения, представленные водонасыщенным аморфным кварцем. В конце пути потоки конденсата достигают реки, превращая ее в необычный, достаточно горячий поток.

В настоящей работе приводятся результаты исследования двух эксплуатационных скважин — № ГК-3 и № 103 (рис. 2). Пробы отбирались на устьях скважин и представляли собой стерильный КПС. Скважина № ГК-3 дает на выходе слабощелочной КПС (рН около 7.7), глубина ее составляет 1200 м, максимальная температура на отметке 800 м — 228 °С, давление на устье колеблется в пределах от 1.5–2 до 4–5 бар. Скважина № 103 представлена также КПС, глубиной 626 м, температура на отметке 620 м — 202 °С, давление на устье 4.3–5.1 бар. Однократное измерение температуры пароводяной смеси на устьях в исследуемых скважинах в период отбора проб показало 108 °С в скважине ГК-3 (под давлением 1.7 бар) и 124 °С в скважине 103 (под давлением 5.1 бар).

Методика исследования

В ходе исследования проводился анализ органических компонентов в КПС, отобранных из двух эксплуатационных скважин Паужетского месторождения. Разделение жидкой и паро-газовой

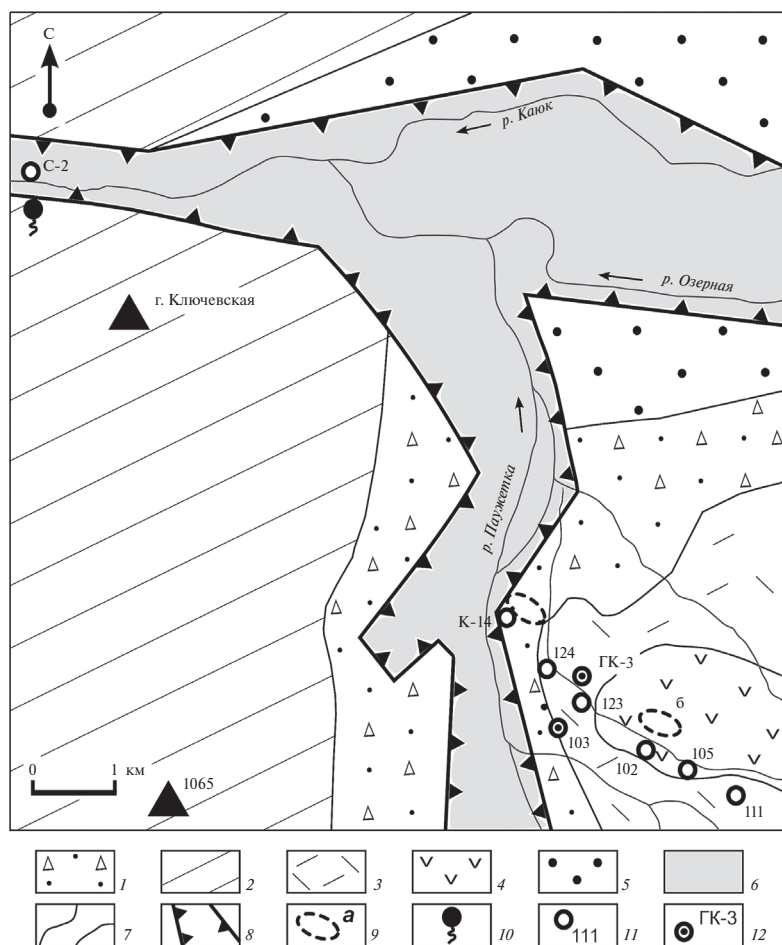


Рис. 2. Схематическая геологическая карта района Паужетской гидротермальной системы, по (Феофилактов и др., 2021), с изменениями и дополнениями: 1 — Паужетская свита; 2 — магматический комплекс г. Ключевской; 3, 4 — лаво-экструзивные комплексы Камбального вулканического хребта: 3 — дациты и риолиты, 4 — андезиты и андезибазальты; 5 — пемзовые отложения верхнечетвертичного возраста; 6 — аллювиальные валунно-галечные отложения; 7 — литологические границы; 8 — границы грабенов (Озерновского и Паужетского); 9 — основные термальные поля: а — Верхне-Паужетское, б — Восточно-Паужетское; 10 — Первые Горячие Ключи (Пионерлагерь); 11 — глубокие геотермальные скважины и их номера; 12 — геотермальные скважины, из которых производился отбор проб для анализа ОВ.

фазы происходило в сепараторе. Жидкая фаза (конденсат) сливалась в бутылки из темного стекла емкостью 1 л, промытые хромовой смесью, метанолом и дистиллированной водой для последующего анализа через специальный кран в сепараторе. На месте отбора проводилась твердофазная экстракция для концентрирования микропримесей ОВ в малом объеме растворителя. Были использованы модифицированные картриджи (сорбент был извлечен из стандартного пластикового картриджа и помещен в самодельный стеклянный футлярчик). Качественный анализ проводился методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии (Soniassy et al., 1994) на Shimadzu GCMS-QP2010S в лаборатории г. Хабаровска (КЦЭМиП, аналитик — В.Л. Рапопорт). Подробное описание методики приводится в работах (Компаниченко и др., 2016; Потурай, 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего в КПС исследуемых скважин Паужетского района установлено 17 органических соединений, которые относятся к 9 гомологическим рядам (табл. 1). Максимальные относительные концентрации показывают гомологические ряды нормальных алканов (44.1–48.4 %), сквалена (13.9–36.6 %) и ароматических УВ, включая галогенсодержащие и биароматические УВ (12.1–20.3 %). Остальные ряды органических компонентов (изоалканы,

кетоны, альдегиды и спирты) в сумме занимают 2.9–21.7 %. По площадям пиков в единицах прибора в скважине 103 установлено больше органического вещества (качественно — по количеству соединений и количественно) — 917694, чем в скважине ГК-3—715029.

В исследуемых КПС найдено 9 алифатических УВ. Из них 7 низкомолекулярных н-алканов состава $n-C_{10}-C_{17}$. Максимальный пик на хроматограмме обеих скважин принадлежит н-додекану ($n-C_{12}$), который занимает 11.5–13.3 % от состава ОВ (105713 в скважине 103 и 95256 в скважине ГК-3 в единицах прибора). Состав н-алканов в Паужетских КПС практически идентичен. Были установлены только низкомолекулярные гомологи состава $n-C_{10}-C_{17}$. Высокомолекулярные гомологи найдены не были. Кроме н-алканов, к установленным алифатическим УВ относятся изоалкан, найденный только в скважине № 103, и сквален, зафиксированный в значительных относительных концентрациях в обеих скважинах. К сожалению, точную структуру изоалкана распознать не удалось, однако, по времени удерживания вещества (8.348 мин) он находится в низкомолекулярной области (C_{9-10}). К ароматическим УВ, установленным в исследуемых КПС, относятся собственно ароматические УВ (арены) — диэтил- и триметилбензолы, галогенсодержащие соединения (трихлорбензол) и нафталин.

Таблица 1. Идентифицированные компоненты в экстракте КПС из скважин Паужетской гидротермальной системы

Гомологический ряд	№ п/п	Наименование компонента	Скв. ГК-3		Скв. 103	
			доля, %	площадь пика*	доля, %	площадь пика*
1. Н-алканы	1	декан	11	78572	9	82166
	2	додекан	13.3	95256	11.5	105713
	3	тридекан	2.9	20499	3.3	29663
	4	тетрадекан	8.6	61615	6.9	63332
	5	пентадекан	5.1	36994	5.7	52016
	6	гексадекан	4.6	32759	3.5	32459
	7	гептадекан	2.9	19989	4.2	38950
2. Изоалканы	8	изоалкан	—	—	2.4	20934
3. Ароматические УВ	9	1,3-диэтилбензол	2.1	15581	—	—
	10	диэтилбензол	—	—	2.4	20924
	11	триметилбензол	—	—	3.1	28631
4. Cl-ароматические УВ	12	трихлорбензол	8.6	61390	13	120787
5. Биароматические УВ	13	нафталин	1.4	10086	1.8	15979
6. Кетоны	14	2-гептадеканон	—	—	9.2	84685
7. Альдегиды	15	октадеканаль	—	—	4.8	44776
8. Спирты	16	2-ундеценол-1	2.9	20252	5.3	49173
9. Каротиноиды (терпены)	17	сквален	36.6	262036	13.9	127506
Итого			100	715029	100	917694

*Площадь пика указана в единицах прибора; “—” — компонент не установлен.

К остальным органическим веществам, найденным в КПС из скважин Паужетского месторождения, относятся кислородсодержащие органические соединения, занимающие от 3 до 19 % от состава ОВ. Они представлены спиртом (2-ундеценол-1), кетоном (2-гептадеканон) и альдегидом (октадеканаль).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общая характеристика органического вещества Паужетского месторождения

Как уже отмечалось, температура исследуемого КПС Паужетского района в период опробования составляла 108–124 °С. При такой температуре конденсат является практически стерильным, то есть лишенным жизни. Хотя на сегодняшний день известны гипертермофильные микроорганизмы, выживающие при температурах до 122 °С, но найдены они в районах “черных курильщиков” на дне океана в условиях высокого гидростатического давления (Kazem, Lovley, 2003). Кроме этого, в подповерхностных областях температура Паужетской гидротермальной системы гораздо выше 124 °С, что исключает существование в нем микроорганизмов. Следовательно, ОВ, установленное в ней, должно иметь не биогенное происхождение.

Максимальных относительных концентраций в исследуемых водах достигают алифатические и ароматические УВ. Среди алифатических УВ доминируют нормальные алканы, молекулярно-массовое распределение которых используется для определения происхождения ОВ в водном объекте. Так как ниже будут представлены результаты сравнительного анализа состава ОВ Паужетского месторождения с другими термопроявлениями на Камчатке, целесообразно рассмотреть молекулярно-массовое распределение *n*-алканов и рассчитанные геохимические индексы вкпе с другими данными по Камчатке, поэтому более подробно, молекулярно-массовое распределение *n*-алканов будет проанализировано в следующем разделе.

К алифатическим УВ относится и сквален — каротиноид, предшественник тритерпеноидов, и промежуточное звено в биосинтезе бактериальных гопаноидов, что указывает на его возможное биогенное происхождение, так как он мог попасть в термальную зону из нисходящей ветви гидротермальной системы, где более низкие температуры и соответственно, возможно участие микроорганизмов. Температура кипения этого соединения выше, чем температура на устье скважины и в глубинном резервуаре, поэтому он мог сохраниться в конденсате пароводяной смеси. Однако не исключается вклад термокаталитических процессов в происхождение сквалена, учитывая отсутствие микроорганизмов в самом гидротермальном резервуаре (производство

микробного метана и других низкомолекулярных УВ возможно только до температур 122 °С (Etiope, Sherwood Lollar, 2013; Reeves, Fiebig, 2020; Takai et al., 2008)) и литературные данные (García-Sánchez et al., 2022; Simoneit et al., 2009).

Ароматические соединения — это доминирующие органические вещества в термальных водах, т.к. гидротермальные условия благоприятны для образования низкомолекулярных ароматических УВ (Sanchez-Avila et al., 2021; Tassi et al., 2015). Воды с температурой более 65 °С содержат различные арены. При повышении температуры воды ОВ разлагается и содержание ароматических УВ увеличивается. Арены доминируют при пороге 80 °С (Szabo, Varga, 2019). Следует отметить, что ароматические УВ не являются типичными компонентами для живых организмов, так как многие из этих соединений токсичны, поэтому нет достаточных оснований для того, чтобы считать их биогенными. В исследуемых термальных водах ароматические УВ, вероятно, образовались в результате термогенных процессов. Например, арены могут быть получены в результате термического реструктурирования и распада многих органических компонентов (каротин, аминокислоты, жирные кислоты и др.) (Hunt, 1979; Szabo, Varga, 2019). Нафталин может формироваться в результате преобразования осадочного ОВ (Fekete et al., 2012; Nye et al., 2020).

Конкретные химические реакции, протекающие в термогенном преобразовании исходного ОВ в ароматические УВ, не ясны. Можно предполагать, что в основном это такие реакции, как дегидратация, декарбонилирование, декарбоксилирование и некоторые другие. Кроме этого, в исследуемых КПС был установлен хлорбензол (8.6–13 %), который мог бы быть расценен как загрязнитель, так как галогенсодержащие органические соединения содержатся в пестицидах и не синтезируются живыми организмами. Однако, скважины, из которых производился отбор проб, расположены в водоохранной зоне, вдали от возможных источников загрязнения, а посуда, используемая при отборе, промыта хромовой смесью, метанолом и дистиллированной водой. Галогенпроизводные органические соединения могут образовываться в процессе горения при лесных пожарах. В этом случае они могли бы усваиваться растениями из загрязненного воздуха и затем попадать в природные воды после деструкции. Однако пока нет определенных данных о содержании галогенсодержащих УВ в растительных тканях. Следовательно, галогенсодержащие УВ могут иметь ксенобиотическое происхождение (Randazzo et al., 2022). Учитывая положение изучаемых объектов в Камчатском геотермальном регионе, в качестве наиболее вероятного источника галогенсодержащих УВ следует рассматривать вулканические извержения или геотермальные процессы (Исидоров и др., 1991; Gribble, 2005). Хлор является распространенным

компонентом вулканогенных гидротерм Камчатки, что предполагает его участие в той или иной форме в синтезе органических соединений.

Кислородсодержащие органические соединения, к которым в исследуемых КПС относятся спирт, альдегид и кетон, занимают подчиненное значение. Как правило, эти соединения являются промежуточными или побочными продуктами процессов аэробного разложения ОВ и его остатков. Они широко представлены в биосфере (Mustafa et al., 2017; Randazzo et al., 2022).

Сравнительный анализ ОВ Паужетского района и ОВ других геотермальных районов Камчатки

Кроме Паужетского месторождения, нами были осуществлены исследования состава ОВ в высокотемпературных гидротермальных системах Мутновского, Паратунского и Узонского геотермальных районов на Камчатке (Компаниченко и др., 2016; Потурай, 2023; Kompanichenko, 2017; Kompanichenko et al., 2010, 2015). В качестве сравнения были выбраны следующие объекты:

— конденсат пароводяной смеси Мутновского района из скважины № 4Е Дачного термального поля (глубина скважины 1600 м, температура и давление на устье 175 °С и 8.1 бара соответственно, pH 4). Данные по температуре в забое данной скважины отсутствуют, но есть замеры температуры в двух водогенерирующих горизонтах в соседней скважине № 30, выполненные группой

А. В. Кирюхина (Кирюхин и др., 2006): 217–228 °С на глубине 825 метров и 231–233 °С на глубине 950 метров;

— конденсат пароводяной смеси из фонтанирующей скважины № 3 Северо-Мутновского термального поля (глубина скважины 1800 м, температура на выходе 97 °С, pH 9);

— термальная вода из скважины № ГК-9 Северного участка Паратунского района (глубина скважины 1080 м, температура на устье 82.5 °С, pH 8);

— термальная вода из скважины № К-4 Восточного термального поля Узонского района (глубина скважины 16 м, температура на устье 98.5 °С, pH 6–7).

Классы органических соединений и их процентное соотношение в описанных термальных водах представлены на рис. 3.

Как видно из приведенных на диаграмме данных, состав ОВ в высокотемпературных КПС Паужетского района имеет схожие черты с составом ОВ других геотермальных объектов Камчатки. В целом, хорошо заметно преобладание алифатических и ароматических УВ (более 60 % в пробах) над остальными соединениями, в то время как биогенные соединения (кислородсодержащие УВ) имеют подчиненное значение. Преобладание алифатических и ароматических УВ может указывать на термогенное происхождение ОВ в исследуемых объектах.

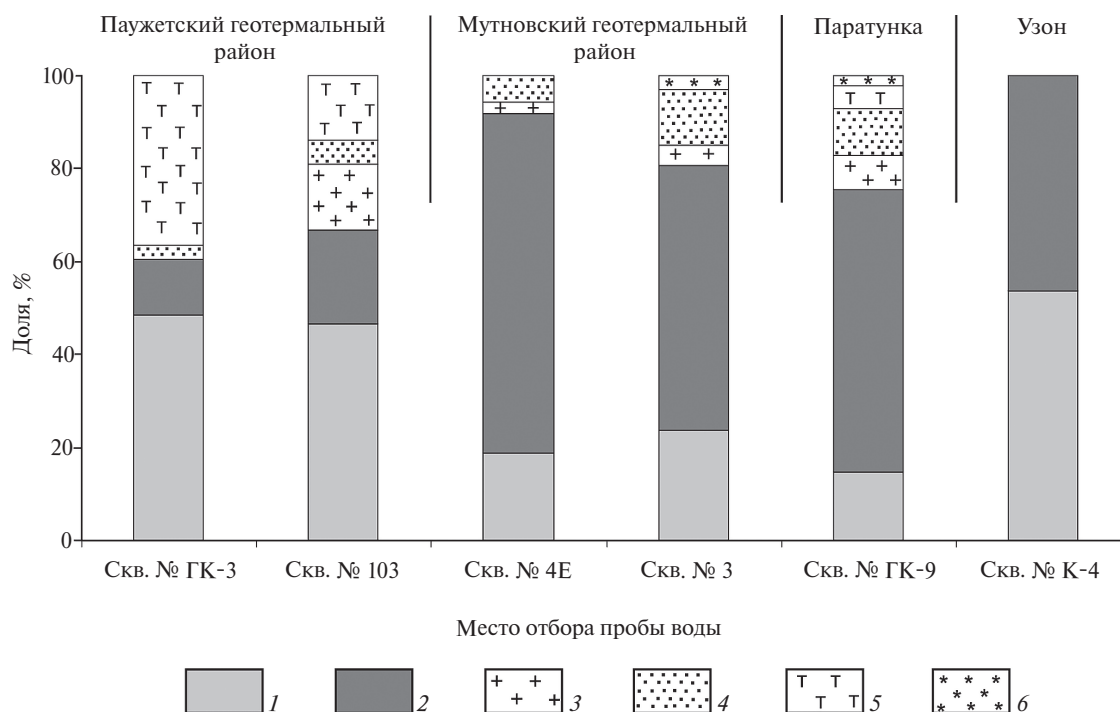


Рис. 3. Гомологические ряды органических соединений в исследуемых гидротермальных системах п-ова Камчатка: 1 — Алифатические УВ (алканы, изоалканы); 2 — Ароматические и гетероароматические УВ; 3 — альдегиды и кетоны; 4 — спирты; 5 — терпены; 6 — карбоновые кислоты и их эфиры.

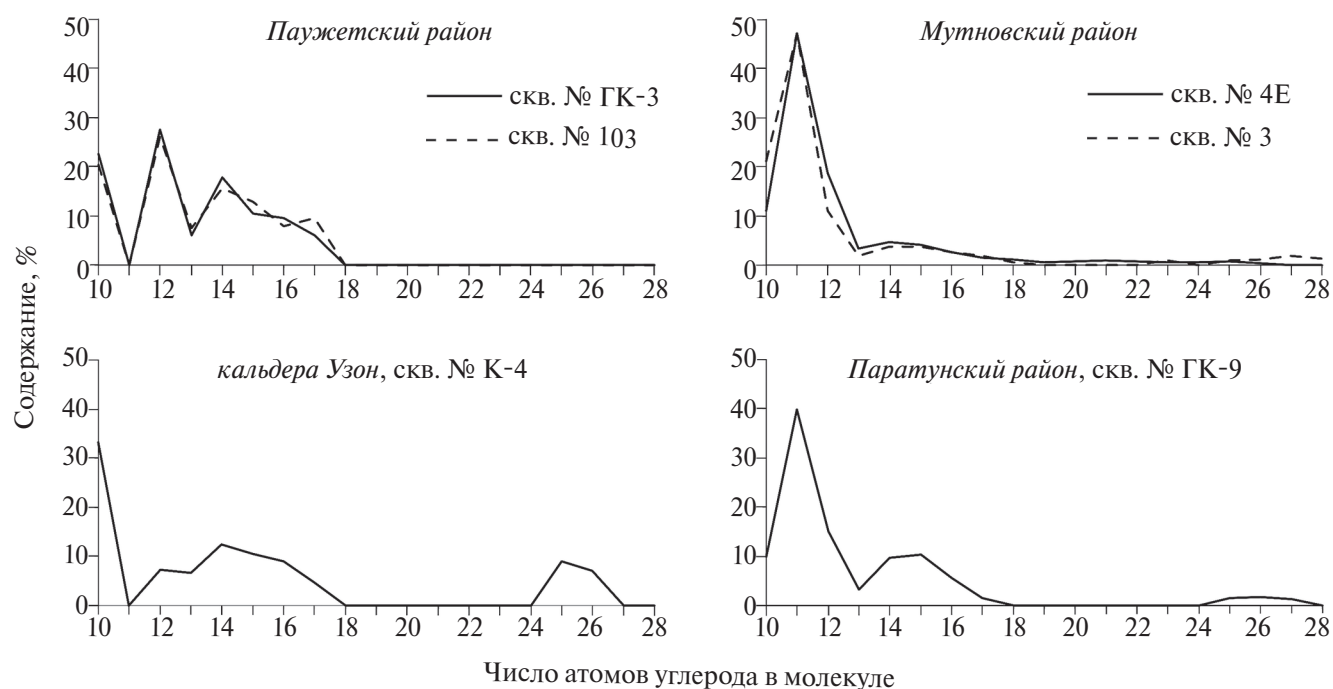


Рис. 4. Графики молекулярно-массового распределения предельных углеводородов в гидротермальных флюидах п-ова Камчатка.

На рис. 4 приведены графики молекулярно-массового распределения нормальных алканов в Паужетских КПС, а также других геотермальных месторождений на Камчатке. В них также зафиксировано резкое преобладание низкомолекулярных гомологов, однако высокомолекулярные УВ, хоть и в малой концентрации, но были здесь установлены, в отличие от Паужетского района.

В табл. 2 приведены данные по молекулярно-массовому распределению *n*-алканов и рассчитанные геохимические индексы в Паужетских КПС, а также в других геотермальных районах Камчатки. Группа *n*-алканов $n\text{-C}_9\text{--C}_{14}$ занимает в среднем 70 %, при этом резко преобладают четные гомологи (доля нечетных гомологов 11–13 %). В низкомолекулярной области предельных УВ при бактериальном синтезе доминируют нечетные УВ, так как они синтезируются бактериями. Превалирование четных *n*-алканов в нехарактерной для гидротермальной биоты области $n\text{-C}_9\text{--C}_{14}$ и $\text{ACL } 12.9\text{--}13.2$ в Паужетских КПС может указывать на термогенное происхождение ОВ. При этом такое же распределение *n*-алканов характерно для термальной воды из скважины К-4 Узонского геотермального района, в то время как во флюиде из Мутновского и Паратунского районов зафиксировано слабое преобладание нечетных гомологов в этой области. Индексы ОЕР близки к единице, за исключением ОЕР₁₇ в скважине № 103, значение которого 2.2, что может указывать на бактериальный вклад в происхождение *n*-алканов состава $n\text{-C}_{15}\text{--C}_{17}$ здесь.

При рассмотрении данных, приведенных на рисунках 3 и 4, заметно сходство состава ОВ в КПС Паужетского района и кальдеры Узон, в то время как результаты анализа соответствующих проб из Мутновского и Паратунского районов демонстрируют существенные отличия. Сравнение всех этих объектов по температурным и гидрохимическим параметрам показало, что последние не могут являться причиной таких различий между паужетским и узонским ОВ, с одной стороны, и мутновскими с паратунскими, с другой. Например, температура на устьях скважин в Паратунском и Мутновском районах сильно отличается (82.5 °С в ГК-9, 97 °С в скважине № 3, и 175 °С в скважине № 4Е) при сходном составе проанализированного ОВ. В то же время температуры в глубинных водогенерирующих зонах паужетских и мутновских терм, заметно отличающихся по органике, примерно одинаковы и составляют 220–230 °С. Еще более показательным является различие в химизме КПС при сходстве спектра органических соединений из двух скважин Мутновского района: в скважине 4Е термы имеют кислый состав (рН 3.5–4), а в скважине 3 — щелочной (рН 9).

Более вероятная причина такой дифференциации в спектре органических соединений заключается в составе вмещающих пород. В Мутновском и Паратунском районе они представлены вулканогенными породами средне-основного состава и их туфами. В кальдере Узон за последние 30–40 тысяч лет накапливались осадочные толщи озерного генезиса, включающие прослой с высоким

Таблица 2. Молекулярно-массовое распределение н-алканов в исследуемом гидротермальном флюиде

Критерии распределения Proxies	Паужетка		Мутновка		Паратунка, ГК-9	Узон, К-4
	ГК-3	103	4Е	3		
C_{max}	C_{12}	C_{12}	C_{11}	C_{11}	C_{11}	C_{10}
Σ н- C_9 – C_{14} , %	74	69.6	85.1	84.9	77.8	59.6
нч/ч C_9 – C_{14}	0.1	0.2	1.4	1.4	1.2	0.1
Σ C_9 – C_{22} , %	100	100	97.6	93.7	95.3	83.9
нч/ч C_9 – C_{22}	0.3	0.6	1.4	1.4	1.4	0.3
Σ н- C_{15} , C_{17} , C_{19} % фитопланктон, водоросли	16.5	22.5	6.3	5.7	11.8	10.6
ОЕР ₁₅	0.7	1	1	1	1.1	0.9
ОЕР ₁₇	1.2	2.2	0.9	1.2	0.8	1.1
ОЕР ₁₉	—	—	0.8	—	—	—
ОЕР ₂₃	—	—	0.9	—	—	—
ОЕР ₂₅	—	—	1.3	1.7	1.5	1.2
ОЕР ₂₇	—	—	—	1.2	1.2	—
ACL	12.9	13.2	12.4	12.4	12.9	14.6

Примечания. “—” — индекс рассчитать не удалось, из-за отсутствия необходимых гомологов в экстракте.

содержанием захороненного органического вещества. Рядом исследователей было подтверждено биогенное происхождение присутствующих здесь микропроявлений нефти, возраст которой составляет около 1 тысячи лет (Bazhenova et al., 1998; Simoneit et al., 2009). Галимов с соавторами (Галимов и др., 2015) отмечает преобладание в нефти низкомолекулярных четных алканов над нечетными, что характерно и для паужетских терм. Как и на Узоне, среди вмещающих пород в Паужетской гидротермальной системе присутствуют вулканогенно-осадочные толщи (паужетская свита). Возможно, что экстрагированный из нее органический материал оказал влияние на состав органики в местных термальных водах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты нашего исследования органического вещества средней летучести в конденсате пароводяной смеси из эксплуатационных скважин Паужетского геотермального месторождения показывают наличие 17 органических соединений. Максимальных относительных концентраций достигают алифатические (9 соединений, 60.4–85 %) и ароматические (5 компонентов, 13.9–36.6 %) УВ. Ароматические УВ представлены аренами, трихлорбензолом и нафталином, происхождение которых связано, вероятно, с термогенными процессами преобразования органических остатков под действием высоких температур и давления. Среди алифатических УВ установлены нормальные (7 гомологов, 44.1–48.4 %) и изо-алканы (1 соединение, 2.9 %) и сквален, достигающий 36.6 %. На долю остальных компонентов (кетоны, альдегиды и спирты) приходится 2.9–19.3 %.

Среди н-алканов зафиксированы только низкомолекулярные гомологи, молекулярно-массовое распределение которых свидетельствует о преимущественно термогенном происхождении основной части н-алканов в исследуемой гидротермальной системе (ACL 12.9–13.2; ОЕР₁₅ 0.7–1). Исключение представляет только КПС из скважины № 103, где некоторая часть н-алканов состава н- C_{15} – C_{17} имеет, вероятно, бактериальное происхождение (ОЕР₁₇ 2.2).

Результаты сравнительного анализа ОВ в Паужетском КПС и в ряде других гидротермальных систем Камчатки, показали значительное сходство состава, которое выражается в преобладании алифатических и ароматических УВ термогенного происхождения, над другими компонентами (более 60 %). При этом состав предельных УВ, в котором наблюдается доминирование четных низкомолекулярных гомологов в конденсате Паужетского геотермального района, подобен распределению н-алканов в термальной воде из кальдеры Узон. С учетом немногочисленности выполненных анализов, высказанное предположение о возможном влиянии экстрагированного из вулканогенно-осадочных толщ органического материала на состав органики в паужетских и узонских термах следует рассматривать как предварительное.

Авторы признательны ведущему инженеру Краевого центра экологического мониторинга и прогнозирования ЧС г. Хабаровска Владимиру Львовичу Рапопорту за помощь в выполнении анализов. Авторы благодарят научного редактора статьи Андрея Юрьевича Бычкова и рецензентов, чьи конструктивные замечания позволили улучшить текст статьи.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института комплексного анализа

региональных проблем ДВО РАН и финансировалось за счет средств его бюджета.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьев В. В. (1966) Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью. Современный вулканизм. М.: Наука, 118–128.
- Апрелков С. Е. (1971) Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки. *Геотектоника*. (2), 105–111.
- Бескровный Н. С., Кудрявцева Т. П. (1977) Особенности органического вещества гидротермальных систем геодинамических поясов на примере Камчатки. Формирование водорастворенного комплекса подземных вод нефтегазоносных бассейнов. (396), 121–136.
- Бескровный Н. С., Лебедев Б. А. (1971) Нефтепроявление в кальдере вулкана Узон. *ДАН СССР*. **201** (4), 953–956.
- Галимов Э. М., Севастьянов В. С., Карпов Г. А., Камалеева А. И., Кузнецова О. В., Коноплева И. В., Власова Л. Н. (2015) Углеводороды из вулканического района. Нефтепроявления в кальдере вулкана Узон на Камчатке. *Геохимия* (12), 1059–1068.
- Galimov E. M., Sevast'yanov V. S., Kamaleeva A. I., Kuznetsova O. V., Konopleva I. V., Vlasova L. N., Karpov G. A. (2015) Hydrocarbons from a volcanic area. Oil seeps in the Uzon caldera, Kamchatka. *Geochem. Int.* **53** (12), 1019–1027.
- Иванов В. В. (1961) Основные геологические условия и геохимические процессы формирования термальных вод областей современного вулканизма. *Гидротермальные процессы и минералообразование в областях активного вулканизма*. М.: Изд-во АН СССР, 53–68.
- Исидоров В. А., Зенкевич И. Г., Карпов Г. А. (1991) Летучие органические соединения в парогазовых выходах некоторых вулканов и гидротермальных систем Камчатки. *Вулканология и сейсмология*. (3), 19–25.
- Калинко М. К. (1975) Генезис микронепфтепроявлений кальдеры вулкана Узон (Восточная Камчатка). *Преобразования органического вещества в современных и ископаемых осадках и основные этапы генерации свободных углеводородов*. М.: ВНИГНИ, 50–58.
- Кирюхин А. В., Москалев Л. К., Поляков А. Ю., Чернев И. И. (2006) Изменение термогидродинамического и газогидрохимического режима резервуара в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения. *Всероссийское совещание по подземным водам востока России*. Иркутск: ИрГТУ, 267–271.
- Компаниченко В. Н., Потурай В. А., Карпов Г. А. (2016) Органические соединения в термальных водах Мутновского района и кальдеры Узон. *Вулканология и сейсмология*. (5), 35–50.
- Коноплева И. В., Власова Л. Н., Немченко Т. Н. (2018) Исследование генезиса нефтей Восточной Камчатки по углеводородам-биомаркерам. *Геохимия*. (7), 709–717.
- Konopleva I. V., Vlasova L. N., Nemchenko T. N. (2018) Genesis of oils in Eastern Kamchatka: evidence from hydrocarbon biomarkers. *Geochem. Int.* **56** (7), 735–742.
- Конторович А. Э., Бортникова С. Б., Карпов Г. А., Каширцев В. А., Костырева Е. А., Фомин А. Н. (2011) Кальдера вулкана Узон (Камчатка) — уникальная природная лаборатория современного нафтидогенеза. *Геология и геофизика* **52** (8), 986–990.
- Литасов Н. Е. (1991) Вулкан Кошелева. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 2 (Отв. ред. Федотов С. А., Масуренков Ю. П.). М.: Наука, 384–393.
- Мухин Л. М., Бондарев В. Б., Вакин Е. А. Ильюхина И. И., Калиниченко В. И., Милехина Е. И., Сафонова Э. Н. (1979) Аминокислоты в гидротермах Южной Камчатки. *ДАН СССР*. **244** (4), 974–977.
- Пийп Б. И. (1937) Термальные ключи Камчатки (Под ред. Заварицкого А. Н.). М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 268 с.
- Потурай В. А. (2023) Органическое вещество в термальных водах Паратунского геотермального района (Камчатка). *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. **334** (8), 98–109.
- Потурай В. А., Компаниченко В. Н. (2019) Состав и распределение предельных углеводородов в термальных водах и пароводяной смеси Мутновского геотермального района и кальдеры Узон (Камчатка). *Геохимия*. (1), 79–88.
- Poturay V. A., Kompanichenko V. N. (2019) Composition and distribution of saturated hydrocarbons in the thermal waters and vapor-water mixture of the Mutnovskii geothermal field and Uzon caldera, Kamchatka. *Geochem. Int.* **57** (1), 74–82.
- Рычагов С. Н. (2017) Начало освоения геотермальной энергии на Камчатке и перспективы ее использования. *История науки и техники*. (7), 45–51.
- Рычагов С. Н., Давлетбаев Р. Г., Ковина О. В. (2009) Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка). *Вулканология и сейсмология*. (2), 39–56.
- Сорохтин Н. О., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. (2018) Глубинный цикл углерода и формирование абиогенных углеводородов. *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. **329** (8), 156–173.

- Сугробов В. М., Карпов Г. А., Рычагов С. Н. (2016) 50 лет со дня пуска Паужетской геотермальной электрической станции. Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 443–448.
- Феофилактов С. О. (2022) Блоковая структура Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка): новая геолого-геофизическая модель. Дис. ... канд. Геол.-мин. Наук. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 161 с.
- Феофилактов С. О., Рычагов С. Н., Логинов В. А., Букатов Ю. Ю., Нуждаев И. А., Клементьев М. А., Денисов Д. К. (2021) Глубинное строение района Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка). *Вулканология и сейсмология*. (1), 40–56.
- Фурсенко Е. А., Каширцев В. А., Конторович А. Э., Фомин А. Н. (2014). Геохимия нефтидов из локализованных на суше гидротермальных источников и вопросы их генезиса (Узон, Йеллоустон, Новая Зеландия). *Геология и геофизика*. **55** (5–6), 918–930.
- Швец В. М., Селецкий Ю. Б. (1968) Органические вещества в термальных водах Южной Камчатки. *ДАН СССР*. **182** (2), 441–444.
- Шульга Н. А., Пересыпкин В. И. (2012) О генезисе углеводородов в гидротермальных отложениях полей Лост Сити и Рэйнбоу (Срединно-Атлантический хребет). *ДАН*. **445** (2), 196–199.
- Aubrey A., Cleaves H., Bada J. (2009) The role of submarine hydrothermal systems in the synthesis of amino acids. *Origins Life Evol. Biosphere*. **39**, 91–108.
- Bazhenova O. K., Arefiev O. A., Frolov E. B. (1998) Oil of the volcano Uzon caldera, Kamchatka. *Org. Geochem*. **29** (1–3), 421–428.
- Bray E. E., Evans E. D. (1961) Distribution of n-paraffines as a clue to recognition of source beds // *Geochim Cosmochim Acta*. **22** (1), 2–15.
- Cleaves H. J., Aubrey A. D., Bada J. L. (2009) An evaluation of critical parameters for abiotic peptide synthesis in submarine hydrothermal systems. *Origins Life Evol. Biosphere*. **39**, 109–126.
- Etiopie G., Sherwood Lollar B. (2013) Abiotic methane on earth. *Reviews of Geophysics*. **51**, 276–299.
- Fekete J., Sajgó C., Kramarics Á., Eke Z., Kovács K., Kárpáti Z. (2012) Aquathermolysis of humic and fulvic acids: Simulation of organic matter maturation in hot thermal waters. *Org. Geochem*. **53**, 109–118.
- Fu Q., Socki R. A., Niles P. B. (2015) Evaluating reaction pathways of hydrothermal abiotic organic synthesis at elevated temperatures and pressures using carbon isotopes. *Geochim Cosmochim Acta*. **154**, 1–17.
- García-Sánchez B. E., Vara-Castro G. M., Kretzschmar Th., Sanchez-Avila J. I. (2022) Organic compounds in surface and groundwaters in the surrounding of a Mexican geothermal reservoir; case study Los Humeros, Puebla. *Appl. Geochem*. **147**, 105442.
- Gribble G. W. (2005) Halogenuros organicos. *Investigacion y ciencia*. **346**, 78–84.
- Holm N. G., Charlou J. L. (2001) Initial indications of abiotic formation of hydrocarbons in the Rainbow ultramafic hydrothermal system, Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planet Sci. Lett.* **191**, 1–8.
- Hunt J. M. (1979) Petroleum geochemistry and geology. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 617 p.
- Kazem K., Lovley D. R. (2003) Extending the Upper Temperature Limit for Life. *Science*. **301** (5635), 934.
- Kompanichenko V. N. (2017) Thermodynamic Inversion: Origin of Living Systems. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 275p.
- Kompanichenko V. N., Poturay V. A., Rapoport V. L. (2010) Organic matter in hydrothermal systems on the Russian Far East in the context of prebiotic chemistry. *Origins Life Evol. Biosphere*. **40** (6), 516–517.
- Kompanichenko V. N., Poturay V. A., Shlufman K. V. (2015) Hydrothermal systems of Kamchatka as the model for prebiotic environment. *Origins Life Evol. Biosphere*. **45** (1–2), 93–103.
- Konn C., Charlou J. L., Holm N. G., Mousis O. (2015) The Production of Methane, Hydrogen, and Organic Compounds in Ultramafic-Hosted Hydrothermal Vents of the Mid-Atlantic Ridge. *Astrobiology*. **15** (5), 381–399.
- Mustafa M. F., Liu Y., Duan Z., Guo H., Xu S., Wang H., Lu W. (2017) Volatile compounds emission and health risk assessment during composting of organic fraction of municipal solid waste. *J. Hazard. Mater.* **327**, 35–43.
- Nye J. J., Shock E. L., Hartnett H. E. (2020) A novel PARAFAC model for continental hot springs reveals unique dissolved organic carbon compositions. *Org. Geochem*. **141**, 103964.
- Randazzo A., Folino A., Tassi F., Tatàno F., Rosa S., Gambioli A. (2022) Volatile organic compounds from green waste anaerobic degradation at lab-scale: evolution and comparison with landfill gas. *Detritus*. **19**, 63–74.
- Reeves E. P., Fiebig J. (2020) Abiotic synthesis of methane and organic compounds in Earth's lithosphere. *Elements*. **16** (1), 25–31.
- Rushdi A. I., Simoneit B. R. T. (2006) Abiotic condensation synthesis of glyceride lipids and wax esters under simulated hydrothermal conditions. *Origins Life Evol. Biosphere*. **36**, 93–108.
- Sanchez-Avila J. I., García-Sánchez B. E., Vara-Castro G. M., Kretzschmar T. (2021) Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field. *Geothermics*. **89**, 101980.
- Simoneit B. R. T., Deamer D. W., Kompanichenko V. N. (2009) Characterization of hydrothermally generated oil from the Uzon caldera, Kamchatka. *Appl. Geochem*. **24**, 303–309.
- Soniassy R., Sandra P., Schlett C. (1994) Water analysis: Organic micropollutants. Germany: Hewlett-Packard Company, 278 p.
- Szabo I., Varga C. (2019) Finding possible pharmacological effects of identified organic compounds in medicinal

- waters (BTEX and phenolic compounds). *International J. Biometeorology*. **64** (6), 989–995.
- Takai K., Nakamura K., Toki T., Tsunogai U., Miyazaki M., Miyazaki J., Hirayama H., Nakagawa S., Nunoura T., Horikoshi K. (2008) Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *PNAS*. **105**, 10949–10954.
- Taran Y. A., Inguaggiato S., Varley N. R., Cienfuegos E. (2010) Geochemistry of H₂ and CH₄-enriched hydrothermal fluids of Socorro island, Revillagigedo archipelago, Mexico. Evidences for serpentinization and abiogenic methane. *Geofluids*. **10**, 42–55.
- Tassi F., Venturi S., Cabassi J., Capecchiacci F., Nisi B., Vaselli O. (2015) Volatile organic compounds (VOCs) in soil gases from Solfatara crater (Campi Flegrei, southern Italy): geogenic source(s) vs. Biogeochemical processes. *Appl. Geochem.* **56**, 37–49.
- Umoh U. U., Li L., He J., Chen L., Dong L., Jia G., Lahajnar N., Massoth G., Schwarz-Schampera U. (2021) Unusual aliphatic hydrocarbon profiles at hydrothermal vent fields of the Central and Southeast Indian Ridges and Mid-Indian Basin. *Deep-Sea Research Part II*. **194**, 104996.
- Wang B., Yang J., Jiang H., Zhang G., Dong H. (2019) Chemical composition of n-alkanes and microbially mediated n-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity. *Chem. Geol.* **524**, 37–48.

ORGANIC MATTER IN HYDROTHERMS OF THE PAUZHETSKY REGION: COMPOSITION AND COMPARATIVE ANALYSIS WITH OTHER SITES

© 2024 V. N. Kompanichenko^a, * (<https://orcid.org/0000-0002-4208-1932>),
V. A. Poturay^a, ** (<https://orcid.org/0000-0002-3357-1737>)

^aInstitute for Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS,
Sholom-Aleyhem street, 4, Birobidzhan, 679016 Russia
*e-mail: kompanv@yandex.ru; **e-mail: poturay85@yandex.ru

The composition of medium volatile organic matter (OM) in the steam-water mixture condensate (SWC) from deep production wells of the Pauzhetsky geothermal field was investigated. Using solid-phase extraction and chromatography-mass spectrometry, 17 organic compounds, including 14 aliphatic and aromatic hydrocarbon (HC), were identified in the studied SWC. These components are highly dominant in the Pauzhetsky hydrothermal system and a number of other geothermal fields in Kamchatka, averaging more than 60 per cent. Due to the peculiarities of the molecular weight distribution of the limiting HCs, the high steam-water mixture condensate temperature (more than 108 °C at the wellhead) and the absence of obviously biogenic components, their origin is attributed to thermogenic processes, which consist in the transformation of organic residues under the action of high temperatures and pressures. The remaining compounds are much less common and are mainly represented by components containing oxygen (ketones, aldehydes, alcohols). The similarity of the spectrum of organic compounds in the Pauzhetka and Uzon CPS may be partly due to their extraction from volcanogenic-sedimentary layers containing buried organic matter.

Keywords: steam-water mixture condensate, organic matter, hydrocarbons, molecular weight distribution, genesis