

## Проявления грязевого вулканизма на о. Сахалин: генезис и газогеохимические характеристики

Ренат Белалович ШАКИРОВ

доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией  
ren@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-1202-0351

Наталья Леонидовна СОКОЛОВА

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
natap81@mail.ru, ORCID 0000-0002-2248-6924

Анна Леонидовна ВЕНИКОВА

научный сотрудник  
anett29@mail.ru, ORCID 0000-0002-1445-8579

Никита Сергеевич ПОЛОНИК

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
nikpol@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0002-4726-9459

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

**Аннотация.** Грязевые вулканы способны в значительной степени влиять на состояние окружающей природной среды, формируя специфические ландшафты, поставляя в атмосферу значительные объемы парниковых газов, выступая тем самым как мощный природный фактор преобразования среды и ее параметров. Это уникальные природные системы флюидо-динамического характера, в которых интенсивно происходят процессы переноса вещества и энергии и миграция огромного количества твердых, жидких и газообразных продуктов из недр на поверхность Земли. Грязь, выносимая вулканами, имеет смешанный минеральный состав. Газы, которые играют основную роль в проявлении грязевулканической деятельности, состоят из различных углеводородов, главным образом метана, а также углекислого газа, азота и в небольших количествах сероводорода. В работе показаны основные газогеохимические и геолого-тектонические особенности возникновения и распространения восходящих потоков газонасыщенных флюидов в районах проявления грязевулканической деятельности на о. Сахалин. Исследована природа их происхождения и взаимосвязь с залежами нефти и газа в регионе. Рассмотрено соотношение газовых и геохимических характеристик грязевого вулканизма о. Сахалин. Весь комплекс проведенных исследований по грязевому вулканизму о. Сахалин показывает, что газогеохимические поля природных газов различного генезиса тесно связаны с формированием геохимического ландшафта вмещающих горных пород и осадочных отложений. Наличие на о. Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, современная сейсмотектоническая активность, сложные системы разрывных нарушений представляют этот район как уникальное место для изучения этих особенностей.

**Ключевые слова:** грязевые вулканы, метан, углекислый газ, сейсмотектоническая активность, о. Сахалин.

**Для цитирования:** Шакиров Р.Б., Соколова Н.Л., Веникова А.Л., Полоник Н.С. Проявления грязевого вулканизма на о. Сахалин: генезис и газогеохимические характеристики // Тихоокеанская география. 2026. № 1. С. 55–67. [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2026\\_25\\_4](https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_4).

Original article

## Mud volcanism on Sakhalin Island: genesis and gas-geochemical characteristics

Renat B. SHAKIROV

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory  
ren@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-1202-0351

Natalia L. SOKOLOVA

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior research associate  
natap81@mail.ru, ORCID 0000-0002-2248-6924

Anna L. VENIKOVA

Research associate  
anett29@mail.ru, ORCID 0000-0002-1445-8579

Nikita S. POLONIK

Candidate of Chemical Sciences, Senior research associate  
nikpol@poi.dvo.ru ORCID 0000-0002-4726-9459

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FRB RAS, Vladivostok, Russia

**Abstract.** Mud volcanoes are able to influence significantly the state of the natural environment, forming specific landscapes, supplying significant amounts of greenhouse gases to the atmosphere, thereby acting as a powerful natural factor in the transformation of the environment and its parameters. These are unique natural systems of a fluid-dynamic nature, in which the processes of matter and energy transfer and migration of a huge amount of solid, liquid and gaseous products from the bowels to the surface of the Earth are intensively taking place. The mud carried out by volcanoes has a mixed mineral composition. Gases that play a major role in the manifestation of mud volcanic activity consist of various hydrocarbons, mainly methane, as well as carbon dioxide, nitrogen, and in small amounts, hydrogen sulfide. The paper shows the main gas-geochemical and geological-tectonic features of the occurrence and migration of updrafts of gas-saturated fluids in the areas of mud volcanic activity on Sakhalin Island. The nature of their origin and the relationship with oil and gas deposits in the region were investigated. The correlation of gas and geochemical characteristics of mud volcanism on Sakhalin Island was considered. The entire research complex conducted on the mud volcanism of Sakhalin Island shows that the gas-geochemical fields of natural gases of various genesis are closely related to the formation of the geochemical landscape of the host rocks and sedimentary deposits. The presence of thick sedimentary strata with oil and gas deposits on Sakhalin Island, modern seismotectonic activity, and complex systems of discontinuous faults present the area as a unique place for study these features. The Sakhalin Island and its surrounding territories are interesting from the point of their genesis and natural gas ecological significance of sedimentary basins, gas hydrate accumulations, geothermal and mud volcanic systems, gas-saturated groundwater and marine sediments. Gas release study on Sakhalin Island and the adjacent shelf are of a great importance within the framework of the Far Eastern Marine Carbon monitoring plots consortium.

**Keywords:** mud volcanoes, methane, carbon dioxide, seismotectonic activity, Sakhalin Island

**For citation:** Shakirov R.B., Sokolova N.L., Venikova A.L., Polonik N.S.. Mud volcanism on Sakhalin Island: genesis and gas-geochemical characteristics. Pacific Geography. 2026;(1):55-67. (In Russ.). [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2026\\_25\\_4](https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_4).

## Введение

В последние годы резко возрос интерес к изучению процессов дегазации земной коры в северных широтах, что вызвано актуальностью исследований баланса основных парниковых газов – диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ) в атмосфере [1] и формированием газоопасных зон в поверхностных грунтах [2]. За последние десятилетия рост концентрации этих газов в атмосфере составил:  $\text{CO}_2$  – 0.4 %,  $\text{CH}_4$  – 0.3–1.2 % в год [3]. Исследования баланса метана и углекислого газа должны учитывать их эмиссию из нефтегазовых и угольных месторождений, а также из активных систем газовой разгрузки (грязевые вулканы, геотермальные системы, водоминеральные источники и др.). Все эти виды углеводородных скоплений широко распространены на о. Сахалин и присахалинском шельфе.

Выходы природных газов на о. Сахалин и прилегающей акватории можно разделить на три вида: 1) локальные выходы газов (грязевые вулканы, газовые венты, газогидротермальные источники и др.); 2) площадная эмиссия газа над нефтегазоносными структурами через сеть разломов, контролируемых региональными линейными элементами; 3) площадная эмиссия газа в зоне размыва складчатых структур.

Грязевые вулканы широко распространены как на суше, так и в морских бассейнах, особенности их распределения рассмотрены в работах [4–8]. Они обнаружены на территории более 30 стран мира. В их распределении на Земле наблюдается такая же закономерность, как и для магматических вулканов: большая их часть приурочена к Альпийско-Гималайскому и Тихоокеанскому подвижным поясам.

Грязевые вулканы представляют собой уникальные природные системы флюидо-динамического характера, в которых интенсивно происходят процессы переноса вещества и энергии и миграция огромного количества твердых, жидких и газообразных продуктов из недр на поверхность Земли. Грязь, выносимая вулканами, имеет смешанный минеральный состав. Газы, которые играют основную роль в проявлении грязевулканической деятельности, состоят из различных углеводородов, главным образом метана, а также углекислого газа, азота и в небольших количествах сероводорода.

Изучению сахалинских грязевых вулканов уделено особое внимание, поскольку в Дальневосточном регионе это уникальное геологическое явление проявлено только на о. Сахалине, два ближайших находятся на о. Хоккайдо и объединяются в одну геотектоническую группу [9–12].

При изучении грязевого вулканизма одним из важнейших аспектов является вопрос о его связи с нефтегазоносностью. Считается, что грязевые вулканы – прямой признак наличия месторождения нефти и газа в регионе, поскольку оба природных объекта имеют сходный механизм образования [13].

Приуроченность грязевых вулканов к нефтегазоносным областям известна уже более ста лет. Геологи-нефтяники рассматривают грязевой вулканизм как один из важнейших критериев перспективности того или иного региона на нефть и газ [14]. Такая связь вполне закономерна. Преобразование органического вещества на глубине одновременно делает возможным существование скоплений углеводородов и порождает грязевые вулканы. Поэтому понимание процессов проявления грязевулканической деятельности важно в том числе при оценке углеводородного потенциала больших глубин перспективных территорий.

Наличие на о. Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, сейсмотектоническая активность, сложные системы разломов делают этот уникальный регион привлекательным местом для изучения грязевулканической деятельности.

Цель исследования – изучение генезиса и газогеохимических характеристик проявления грязевого вулканизма на о. Сахалин.

## Материалы и методы

Методики газогеохимических исследований закреплены в Паспорте ПС 1.051-21 лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН, утвержденном Свидетельством Росстандарта № 58, в патентах и публикациях [15–17].

Основой методологии являются экспедиционно-аналитические исследования на о. Сахалин с теоретическим анализом полученных материалов сотрудниками лаборатории, а также результаты анализа и систематизации газогеохимических данных, полученных предшественниками в данном районе. При этом в выполнении исследований задействованы сотрудники и приборная база новой инновационной лаборатории комплексного исследования окружающей среды и минеральных ресурсов ТОИ ДВО РАН.

Целевыми объектами газогеохимических исследований были выбраны: грязевые вулканы – Южно-Сахалинский (ЮСГВ), Главный Пугачевский (ГПГВ), а также Дагинская геотермальная система (ДГС) о. Сахалин.

На содержание  $\text{CH}_4$  и его гомологов,  $\text{CO}_2$  авторским коллективом было проанализировано более 1000 проб свободного газа и газа, растворенного в воде.

Сотрудниками ТОИ ДВО РАН в 2001, 2005–2014, 2018–2021 гг. проводилось газогеохимическое обследование грязевых вулканов, геотермальных источников о. Сахалин, выполнялись работы на нефтегазоносных площадях. Производился отбор проб свободных газов из основных дегазирующих грифонов грязевых вулканов. Южно-Сахалинский грязевой вулкан, как наиболее активный объект, опробован более детально, в том числе выполнен мониторинг количественных и качественных газовых параметров в 2007 г. совместно с ИМГиГ ДВО РАН [18].

Отбор проб и анализ спонтанного газа из грязевых вулканов и геотермальных источников, а также отбор проб воды осуществлялись согласно методики [15–17].

Для хроматографического анализа газового состава углеводородных и неорганических газов использовался хроматограф «Кристалл-Люкс 4000М» (ООО «НПФ «Мета-хром», г. Йошкар-Ола), снабженный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности, газ-носитель — гелий. Для анализа гелия и водорода применялся хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматек», г. Йошкар-Ола) с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1–2 ppm по гелию и водороду), газ-носитель — аргон.

Для калибровки газовых хроматографов применялись сертифицированные поверочные газовые смеси производства Германии и России с концентрациями метана 10, 100, 1000 ppm и 1 %. Использовались калибровочные смеси газов “SCOTTY II” производства “Altech Associates Inc.” и ООО «ЮГРА-ПГС».

Анализ стабильных изотопов углерода метана и углекислого газа выполнен на масс-спектрометре Finnigan MAT – 252 по системе CF-IRMS в Университете Нагойя, Япония [19]. Значения  $\delta^{13}$  приведены относительно VPDB.

Исследование органического вещества грязевых вулканов заключалось в качественном и полуколичественном определении состава углеводородов (n-алканов, изопреноидов, ароматических углеводородов) методом пиролитической ГХМС. Перед проведением анализа образцы грязевулканической брекчии высушивались при 40 °С до постоянного веса на анализаторе влажности Shimadzu MOC-120 H (Япония) и измельчались с помощью мельницы IKA A11 basic (Германия) до порошкообразной консистенции. Анализ проб осуществлялся на приборе Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Япония), оснащенный многофункциональным пиролизером / термодесорбером Multi-Shot Pyrolyser EGA/PY-3030 (Япония). Разделение компонентов осуществлялось на капиллярной колонке Ultra ALLOY-5 MS/HT, газ-носитель – гелий.

## Результаты и их обсуждение

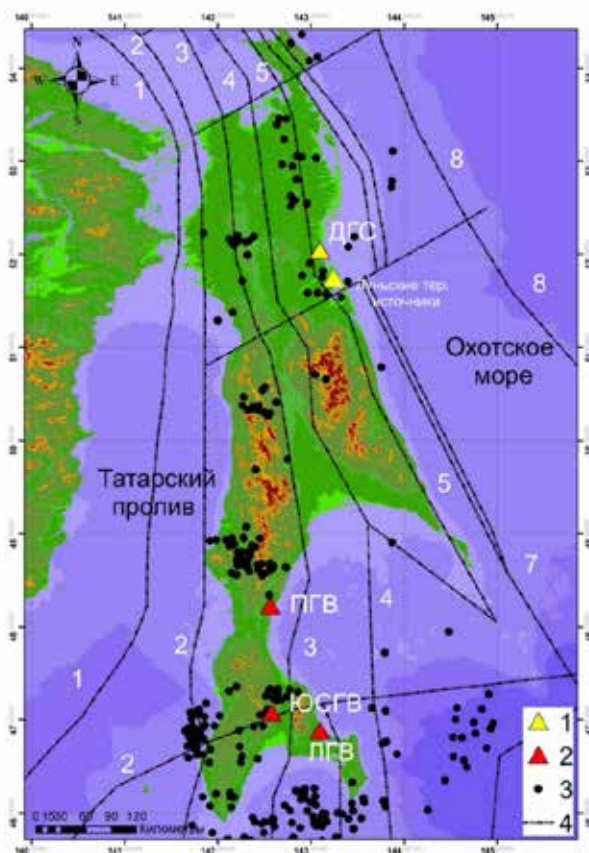
На о. Сахалин выявлены следующие участки проявления грязевого вулканизма (рис. 1): группа Пугачевских грязевых вулканов – в Макаровском, Южно-Сахалинский грязевой вулкан – в Анивском и Лесновский – в Корсаковском районе. Отдельно следует отметить Дагинскую газогидротермальную площадь в Ногликском районе, которая в ряде работ рассматривается как грязевулканическая. К грязевым проявлениям в Дальневосточном регионе иногда относят также водо-грязевые котлы на п-ове Камчатка и Курильских островах. Грязевые вулканы региона обнаружены только в Хоккайдо-Сахалинской складчатой системе (ХССС).

Остров Сахалин представляет собой яркий пример складчатых областей альпийского тектогенеза [22], в ходе которого сформировались все грязевулканические провинции (Альпийско-Гималайский складчатый пояс и Тихоокеанское кольцо альпийской складчатости). Складкообразование этой эпохи завершилось возникновением молодых горных сооружений, дефлюидизация которых выразилась в том числе в углеводородных скоплениях и грязевом вулканизме. На о. Сахалин распространены нефтегазовые месторождения, широко развиты угленосные толщи, грязевые вулканы, геотермальные системы и минеральные источники. ХССС контролируется системой глубинных разломов, секущих их в продольном направлении (см. рис. 1). По этим разломам осуществляется газо-флюидный перенос углеводородов и сопутствующих газов, интенсивность и химический состав газовых потоков контролируется сейсмотектонической активностью.

Крупный Хоккайдо-Сахалинский разлом контролирует размещение мезозойских магматических формаций на своем южном отрезке. В районе северного звена этого глубин-

**Рис. 1.** Карта-схема расположения объектов исследования относительно положения основных разломов. Региональные разломы: 1 — Восточно-Сихотэ-Алинский; 2 — Западно-Сахалинский; 3 — Центрально-Сахалинский; 4 — Хоккайдо-Сахалинский; 5 — Северо-Сахалинский; 7 — Пограничный; 8 — Восточно-Сахалинский [20]. Условные обозначения: 1 — термальные источники, 2 — грязевые вулканы, 3 — землетрясения  $M > 4.3$  [21], 4 — разломы

**Fig. 1.** Map of the location of the research objects relative to the position of the main faults. Regional faults: 1 — East Sikhote-Alin, 2 — West Sakhalin, 3 — Central Sakhalin, 4 — Hokkaido-Sakhalin, 5 — North Sakhalin, 7 — Pogramichniy, 8 — East Sakhalin [20]. Symbols: 1 — thermal springs, 2 — mud volcanoes, 3 —  $M > 4.3$  earthquakes [21], 4 — faults



ного сдвига расположены основные скопления углеводородов островной части региона. Западно-Сахалинский глубинный разлом представляет собой крупную проницаемую зону и контролирует основные угольные месторождения острова. В южной части острова Западно-Сахалинский разлом проходит в шельфовой части Татарского пролива, где с участием коллектива авторов были обнаружены многочисленные поля газовой эмиссии. Центральное-Сахалинский разлом отличается активным флюидодинамическим режимом и представляет собой крупнейшую проницаемую зону. В ее северной части расположены кайнозойские магматические и другие формации. К зоне влияния Центрально-Сахалинского разлома приурочены термальные и холодные водногазовые источники, грязевые вулканы, нефтегазопрооявления. В южной части разлома установлены меловые отложения. В зоне контакта меловых и кайнозойских отложений внедрялись интрузивные тела (дайки) [23], расположены палеовулканические центры [24].

Все грязевые вулканы о. Сахалин находятся в тектоническом поясе Сорати–Иезо [25]. Основные углеводородсодержащие газы ХССС – метан, углеводородные газы ряда этан – пентан (пентан в толще пород может находиться в газовой фазе и мигрировать на поверхность с общим потоком) и углекислый газ. Углеводородные газы ряда этан – пентан, как правило, в сумме не превышают первых процентов. Сахалинские грязевые вулканы расположены близко к районам палео- и современного вулканизма.

Активная вертикальная разгрузка флюидов в пределах Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы проявляется в виде грязевых вулканов, термальных и минеральных источников, скоплений углеводородов (нефтяные и газовые, газоконденсатные, газовые гидраты). Скопления углеводородов приурочены к разломным зонам различной проницаемости, что свидетельствует о вертикальной миграции флюидов по флюидопроводящим системам. Основными путями миграции служат проницаемые зоны разрывных нарушений и узлы пересечений разрывов [26, 27].

В результате действия этих факторов создается повышенная проницаемость чехла, обеспечивающая вынос газов, пульпы и водонасыщенных флюидов на поверхность. Положение о. Сахалин в зоне сочленения япономорских и охотоморских структур на границах литосферных плит обуславливает его своеобразное геологическое строение, которое характеризуется большими мощностями углеводородоносных верхнемеловых и кайнозойских осадков (до 10 км на Северном Сахалине), высокой сейсмичностью и значительными градиентами тектонических движений [28].

### *Геотермальные системы*

Химический состав газа сахалинских геотермальных систем рассмотрен на примере Дагинского и Луньского месторождений термальных вод. Содержание метана в Дагинских геотермальных источниках в среднем составляет 93 %, а углекислого газа 0.12 % [29]. Участок месторождения контролируется Восточно-Сахалинской разломной зоной и конкретно Гаромайским сейсмоактивным разломом. Для Дагинского геотермального месторождения основной компонент спонтанного газа – термогенный метан с небольшой примесью микробной компоненты с  $\delta^{13}\text{C}$  -54...-57 ‰ VPDB. В таких физико-химических условиях массы закисного железа связываются в сульфиды [30]. Поэтому в ДГС основным аутигенным минералом является пирит [31]. Аутигенные пириты и карбонаты обеднены микроэлементами, что обусловлено разубоживанием минерализованных сопочных вод морскими водами [32]. Восстановительная среда в осадке создается в районах с большой скоростью накопления органического вещества (ОВ), следовательно, здесь оно подвергается наименьшей деструкции. В таких условиях в составе ОВ сохраняются легкогидролизуемые компоненты, являющиеся основой биохимических процессов диагенеза. Таким образом, обеспечивается большая сохранность потенциально нефтегазоматеринских компонентов ОВ после завершения редукции железа [33]. Выходы термальных вод с температурой до 50 °С с дебитом 20–50 л/сут известны на северо-восточном побережье

острова на широте Луньского газоконденсатного месторождения [34] ( $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  -52.8 ‰ VPDB,  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  -39.9 ‰ VPDB, авторские данные).

### *Грязевые вулканы о. Сахалин*

В результате многолетних наблюдений (2001–2021 гг.) был установлен средний химический состав свободных газов *Сахалинских грязевых вулканов* во время пассивных периодов: преобладающий газовый компонент для Южно-Сахалинского грязевого вулкана –  $\text{CO}_2$  (до 74 %); значительных концентраций достигает и  $\text{CH}_4$  (до 24 %). Главный Пугачевский грязевой вулкан характеризуется низкой интенсивностью выделения свободных газов из грифонов. Этот вулкан отличается пониженной обводненностью относительно ЮСГВ. Дегазация происходит в основном через вязкую глинистую массу фактически без пузырькового пробулькивания. Качественный состав газа ГПГВ (концентрации  $\text{CO}_2$  ~ 25 % и  $\text{CH}_4$  ~ 70 %) отличается от ЮСГВ. Для обоих грязевых вулканов характерно наличие тяжелых углеводородов до пентана включительно, что указывает на общность их генезиса. Пугачевский и Южно-Сахалинский грязевые вулканы во многом схожи: имеют примерно одинаковое по размерам грязевое поле, близкий характер деятельности; расположены в поле распространения газоносной высоко пластичной верхнемеловой алевролитово-аргиллитовой формации и приурочены к Центрально-Сахалинскому разлому типа взбросо-надвига. Грязевые вулканы – локальные газодренажные системы земной коры, но их следует рассматривать в системе контролирующих линейных структур. В данном случае это глубинный активный разлом субмеридианального простирания. То есть разломная зона представляет собой единую флюидодинамическую систему, на некоторых участках которой, особенно в зоне пересечения разрывных нарушений или в местах внедрения интрузивных тел, возникают специфические условия для формирования потоков газов определенного состава. Что подтверждается также современными гидрогеохимическими исследованиями [35]. На южном участке Центрально-Сахалинского разлома источник углекислого газа может быть такой же, как на ЮСГВ и ПГВ, или как и на Синегорских водоминеральных источниках. Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана изотопный состав углерода углекислого газа – ( $\delta^{13}\text{C}$  -2.8...-2.7 ‰ VPDB) и  $\delta^{13}\text{C}$  метана – -27 ‰ VPDB; для Главного Пугачевского вулкана  $\delta^{13}\text{C}$  метана составляет от -23...-22 ‰ VPDB. Соотношение стабильных изотопов углерода метана обоих вулканов указывает на происхождение метана в результате глубинного метаморфического преобразования рассеянного органического вещества, вероятно, с вкладом глубинных компонентов. Следует отметить, что в газах ЮСГВ и ПГВ зафиксированы повышенные концентрации гелия, они схожи по значению с ДГС и аномалией в гидратоносных осадках западного присахалинского борта Курильской котловины. Близкие гелиевые аномалии (вне зависимости от времени наблюдения) обнаружены в Пугачевском грязевом вулкане, а также в Синегорских источниках и угольных газах о. Сахалин [36]. Что также указывает на глубинный источник.

Содержание метана в приземном воздухе ЮСГВ (в пассивном состоянии) достигает 820 ppm, что на 2 порядка больше атмосферного фона. Концентрация углекислого газа в приземном воздухе достигает местами смертельно опасной концентрации – 3 %. Главный Пугачевский грязевой вулкан в этом отношении не представляет угрозы (в пассивном состоянии): содержание метана в воздухе не превышает 6 ppm, углекислого газа 0.18 %. Однако при наблюдениях после Горнозаводского (18 августа 2006 г.,  $M = 5.6$ ) и Невельского (2 августа 2007 г.,  $M = 6.1$ ) землетрясений отмечено резкое косейсмическое увеличение дебита газа в 2–5 раз по сравнению с его средним уровнем до землетрясений. Результаты совместных с ИМГиГ ДВО РАН исследований позволяют утверждать, что сильные землетрясения косейсмически влияют на дебит свободных газов ЮСГВ [18]. Выбросы метана Южно-Сахалинского грязевого вулкана составляют около 0.4 т/год. Вдоль западного побережья и в юго-западной части о. Сахалин и в осевой части о. Хоккайдо закартированы эруптивные центры палеовулканов [24, 37]. Они являются одним из возможных источ-

ников углекислого газа и причин генерации изотопно-тяжелых углеводородных газов во вмещающих отложениях. С этим согласуются аномально высокие концентрации изотопа  $^{13}\text{C}$  в углеводе  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , и особенно это выражено в грязевых вулканах, которые имеют общие источники вещества с Синегорским месторождением вод [35].

### Углеводородные компоненты грязевых вулканов о. Сахалин

Для определения взаимосвязи качественного состава углеводородов грязевых вулканов с нефтеносностью подстилающих пород с помощью пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии (Руг-ГХМС) [38] был проведен качественный и полуколичественный анализ шестнадцати образцов грязевулканической брекчии Пугачевского и Южно-Сахалинского грязевых вулканов (о. Сахалин) (табл. 1).

**Таблица 1.** Геохимические показатели органического вещества проб из Пугачевского и Южно-Сахалинского грязевых вулканов

**Table 1.** Geochemical indicators of organic matter in samples from the Pugachevsky and Yuzhno-Sakhalinsky mud volcanoes

Параметры	Геохимический показатель		
	ПГВ (4 образца)	ЮСГВ (пассивный, 10 образцов)	ЮСГВ (активный, 2 образца)
$C_{\text{орг}}$	$\frac{0.88-1}{0.96}$	$\frac{0.36-1.06}{0.86}$	$\frac{0.87-1.24}{1.05}$
Pr/Ph	$\frac{0.97-1.03}{1}$	$\frac{0.78-0.91}{0.86}$	$\frac{0.73-0.77}{0.75}$
Pr/ $C_{17}$	$\frac{0.31-0.41}{0.37}$	$\frac{0.23-0.36}{0.29}$	$\frac{0.35-0.39}{0.37}$
Ph/ $C_{18}$	$\frac{0.57-0.62}{0.59}$	$\frac{0.5-0.7}{0.56}$	$\frac{0.6-0.66}{0.63}$
ОЕР <sub>17-19</sub>	$\frac{0.92-1.07}{1}$	$\frac{0.93-1.05}{1}$	$\frac{1.04-1.07}{1.05}$
$\frac{\sum C_{10}-C_{20}}{\sum C_{21}-C_{31}}$	$\frac{7.7-21.1}{14.9}$	$\frac{12.1-32.7}{19.6}$	$\frac{1.7-2.1}{1.9}$

Примечание. Над чертой приведен интервал значений, под чертой – среднее значение геохимических показателей. Индексы нечетности  $\text{OEP}_{17} = \frac{C_{15} + 6C_{17} + C_{19}}{4C_{16} + 4C_{18}}$ ;  $\text{OEP}_{19} = \frac{C_{17} + 6C_{19} + C_{21}}{4C_{18} + 4C_{20}}$ . Pr/Ph – пристан-фитановый индекс,  $\frac{\sum C_{10}-C_{20}}{\sum C_{21}-C_{31}}$  – индекс для расчета преобладания суммы n-алканов фракции ( $\sum C_{10}-C_{20}$ ) над n-алканами фракции ( $\sum C_{21}-C_{31}$ ).

Среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  в пелитовой глинистой породе Пугачевского и Южно-Сахалинского грязевых вулканов составляет 0.96 и 0.86 % соответственно. Максимальное содержание  $C_{\text{орг}}$  (1.24 %) было обнаружено в двух образцах из активных грифонов ЮСГВ, что, скорее всего, вызвано поступлением обогащенного органическим веществом глинистого материала. Согласно результатам анализов органическое вещество ПГВ и ЮСГВ имеет сходный состав [37] и представлено нормальными, изо- и циклоалканами, а также ароматическими соединениями. Во всех пробах доминируют n-алканы с числом углеродных атомов от  $C_{10}$  до  $C_{31}$ , с концентрационным максимумом, приходящимся на область  $C_{14}-C_{17}$ , характерным для органического вещества морского генезиса. Содержание легких n-алканов ряда  $C_{10}-C_{20}$  значительно выше по сравнению с более тяжелыми гомологами  $C_{21}-C_{31}$  ( $\frac{\sum C_{10}-C_{20}}{\sum C_{21}-C_{31}} = 14.9 - 19.6$ ). Соотношение пристан / фитан составляет 0.86 для

ЮСГВ и 1 для ПГВ, что указывает на слабо восстановительную обстановку диагенеза. Органическое вещество ПГВ и ЮСГВ можно отнести к зрелому типу ( $OEP_{17-19} = 1$ ,  $Pr/C_{17} = 0.29-0.37$ ,  $Ph/C_{18} = 0.56-0.59$ ) со слабо выраженной степенью биодеградациии. К минорным компонентам органического вещества относятся ароматические углеводороды (алкилбензолы с длинными ( $C_4-C_{10}$ ) алкильными цепями, нафталин и алкилнафталины), а также циклические углеводороды (октилциклогексан и ундецилциклогексан).

После активизации ЮСГВ в образцах выявлено увеличение доли n-алканов ряда  $C_{22}-C_{25}$  ( $\frac{\sum C_{10}-C_{20}}{\sum C_{21}-C_{31}} = 1.9$ ), что выражается в формировании двух концентрационных максимумов в областях  $C_{14}-C_{17}$  и  $C_{22}-C_{25}$ . По нашему мнению, обогащение грязи вулкана более тяжелыми и высококипящими углеводородами в ходе извержения отражает вклад органического вещества из более глубоких подстилающих отложений, а также может быть вызвано даже довольно незначительным локальным повышением температуры грязевулканической брекчии в период активизации ЮСГВ.

### Заклучение и выводы

Изучение грязевых вулканов позволяет получить весьма полезную геолого-газогеохимическую информацию о глубинах, которые недоступны для современной техники. Грязевой вулканизм является своего рода индикатором региональных геодинамических и сейсмо-тектонических процессов. Наличие грязевых вулканов – один из критериев перспективности региона на нефть и газ. Грязевой вулканизм способен в значительной степени влиять на состояние окружающей среды, формируя специфические ландшафты, поставляя в атмосферу порой значительные объемы парниковых газов, выступая тем самым как мощный природный фактор преобразования среды и ее параметров.

Изучение грязевого вулканизма в пределах западной части Тихого океана, на примере о. Сахалин обозначило важность понимания данного процесса для описания полной картины геодинамических обстановок в регионе, которые играют определяющую роль в формировании вещественного состава и структуры перспективных районов с залежами углеводородов, включая нетрадиционные виды (газогидраты), твердые полезные ископаемые, в том числе аутигенной минерализации.

Химический состав сопочной брекчии, комплекс аутигенных минералов указывают на генетическое родство Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов. Пугачевская группа грязевых вулканов характеризуется низкой интенсивностью выделения свободных газов из грифонов. Качественный состав газа отличается от Южно-Сахалинского (относительные содержания  $CO_2$  около 25 % и  $CH_4$  около 70 % с вариациями). Для обоих грязевых вулканов характерно наличие тяжелых углеводородных газов до пентана включительно, что указывает на общность их генезиса. Пугачевский и Южно-Сахалинский грязевые вулканы приурочены к Центрально-Сахалинскому разлому типа взбросо-надвига и имеют сходство вследствие примерно одинакового по размерам грязевого поля, близкого характера деятельности, расположения в поле распространения газоносной высоко пластичной верхнемеловой алевролитово-аргиллитовой формации.

Спонтанные газы, поступающие в период активизации Южно-Сахалинского грязевого вулкана, способствуют миграции многих элементов, а также железа, кальция, марганца в форме растворимых гидрокарбонатных комплексов. С этим связано уменьшение содержания этих катионов в сопочной брекчии в период активизации грифонов. Процесс повышения концентраций этих элементов в илах во время пассивных периодов связан с процессами насыщения вод и илов кислородом (и окислением рассеянных сульфидов) и, как следствие, выведением из раствора окисленных форм железа, марганца и фиксацией бария в виде сульфата.

Изотопный состав углерода углекислого газа ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-2.8$  до  $-2.7$  ‰ PDB) и  $\delta^{13}\text{C}$  метана ( $-27.1$  ‰ PDB), отобранных на Южно-Сахалинском грязевом вулкане проб, указывает на происхождение метана в результате глубинного метаморфического преобразования рассеянного органического и, вероятно, углистого вещества.

Идентичность химического состава обнаруженных органических компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов указывает на схожий состав первичного органического вещества глинистых толщ, распространенных вдоль южного сегмента Центрально-Сахалинского разлома, и схожие условия преобразования органического вещества. При этом несмотря на то, что качественный химический состав углеводородов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов одинаков, он зависит от стадии их активности: в активной фазе грязевулканическая брекчия обогащается высококипящими н-алканами.

Для ДГС основным компонентом спонтанного газа является метан с изотопным составом  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-58.8$  до  $-57$  ‰ PDB, образование которого происходит в результате термогенного преобразования (термальные воды имеют температуру до  $+70$  °C) и анаэробного разложения органического вещества с участием сульфатредуцирующих и метанообразующих бактерий при повышенных температурах. Анализ геохимических, минералогических, газогеохимических и тектонических материалов, а также данных термометрии позволяет авторам охарактеризовать участок Дагинского водо-газопроявления как уникальную газогеотермальную систему.

Весь комплекс изученного материала по грязевому вулканизму о. Сахалин показывает, что газогеохимические поля природных газов различного генезиса тесно связаны с формированием геохимического ландшафта вмещающих горных пород и осадочных отложений. Наличие на о. Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, современная сейсмостектоническая активность, сложные системы разрывных нарушений представляют этот район как уникальное место для продолжения изучения этих особенностей.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания 124022100076-3.

**Acknowledgments.** The research has been carried out within the framework of the state assignment 124022100076-3.

### Литература

1. Сергиенко В.И. Материалы совместного заседания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН и Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 117–136.
2. Астахов А.С. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга ЮСГВ в июле–августе 2001 г.) // Докл. Академии наук. 2002. Т. 386, № 2. С. 223–228.
3. Etheridge D.M. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emission and climatic variability // *Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, N D13. P. 15979–15993.
4. Атлас грязевых вулканов мира / Ад.А. Алиев [и др.]. Баку: Nafta-Press, 2015. 322 с.
5. Валяев Б.М. О зональности изотопного состава углерода газов грязевых вулканов и ее тектоническом контроле // ДАН СССР. 1982. Т. 267, № 5. С. 1222–1225.
6. Валяев Б.М. Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е., Прохоров В.С., Титков Г.А. Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. 1985. № 1. С. 85–86.
7. Холодов В.Н. О природе грязевых вулканов // *Природа*. 2001. № 11. С. 47–58.
8. Kopf A.J. Significance of Mud Volcanism // *Reviews of Geophysics*. 2002. Vol. 40 (2), 1005. P. 52. DOI: 10.1029/2000RG000093
9. Веселов О.В., Волгин П.Ф., Лютая Л.М. Строение осадочного чехла Пугачевского грязевулканического района (о. Сахалин) по данным геофизического моделирования // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С. 4–15.
10. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.

11. Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеанская геология. 1989. № 3. С. 42–48.
12. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газоводогрязевого вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18, № 3. С. 37–46.
13. Мельников О.А., Ершов В.В. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 87–93.
14. Атлас грязевого вулканизма России. Приложение 2 (Т. 2) к выпускной квалификационной работе: Лебедева И.А. Грязевой вулканизм на территории России: выпускная квалификационная работа. Рукопись / И.А. Лебедева. Научный руководитель проф. Е.А. Скупинова. Вологда: ВоГУ: кафедра географии: лаборатория геоэкологии, 2016. 41 с.
15. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
16. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. Владивосток: Дальнаука, 1999. 184 с.
17. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. Vol. 86/87. P. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
18. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 49–57.
19. Tsunogai U., Kosaka A., Nakayama N., Komatsu D., Konno U., Kameyama S., Nakagawa F., Sumino H., Nagao K., Fujikura K., Machiyama H. Origin and fate of deep sea seeping methane bubbles at Kuroshima Knoll, Ryukyu forearc region, Japan // Geochemical Journal. 2010. Vol. 44. P. 461–476.
20. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмоструктурной геологии Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 3 (41). С. 56–58.
21. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 / Л.Н. Поплавская, А.И. Иващенко, Л.С. Оскорбин, Т.В. Нагорных и др. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
22. Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин / Гл. ред. А.В. Сидоренко. Грязевые вулканы. М.: Недра, 1970. 431 с.
23. Аверьев В.В. Углекислые мышьяковистые Синегорские воды на Южном Сахалине // Геология. 1975. Т. 32. № 3. С. 143–149.
24. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
25. Гранник В.М. Сопоставление структурных элементов Сахалина и Хоккайдо // Докл. Академии наук. 2005. Т. 400, № 5. С. 654–659.
26. Сырбу Н.С., Холмогоров А.О., Степочкин И.Е., Хазанова Е.С. Сравнительный анализ газо-геохимических данных наземного и спутникового мониторинга острова Сахалин и его шельфа (северо-восток России): тектонические следствия // Геотектоника. 2023. № 2. С. 39–56.
27. Shakirov R.B., Syrбу N.S. Natural sources of methane and carbon dioxide on Sakhalin Island and their role in the formation of ecological gas-geochemical zones // Water Resour. 2013. Vol. 40, N 7. P. 752–760. <https://doi.org/10.1134/S0097807813070129>
28. Рождественский В.С. Роль сдвигов в структуре Сахалина // Геотектоника. 1982. № 4. С. 99–110.
29. Sokolova N.L., Telegin Yu.A., Venikova A.L., Obzhiriv A.I. Studies of the Dagi Gas-Hydrothermal Vents on the East Coast of Sakhalin Island // Russian Journal of Pacific Geology. 2022. 16 (5). P. 503–509.
30. Сташук М.Ф. Термодинамика и ее применение в литологии. М.: Наука, 1985. 221 с.
31. Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Веникова А.Л., Пестрикова Н.Л. Элементы-примеси в современной сопочной брекции грязевых вулканов о. Сахалин // Вестн. КРАУНЦ. 2015. № 1, вып. 25. С. 19–30.
32. Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. и др. Геохимические и минералогические особенности грязевых вулканов о. Сахалин. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 4. С. 58–65.
33. Грецкая Е.В. Исходный нефтегазоматеринский потенциал органического вещества осадков (на примере впадин Охотского моря). Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 111 с.
34. Жарков Р.В. Типы термальных вод Южных Курил и севера Сахалина и их влияние на ландшафты: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 27 с.
35. Челноков Г.А., Жарков Р.В., Брагин И.В. и др. Геохимические характеристики подземных флюидов южной части Центрально-Сахалинского разлома // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 5. С. 81–95.
36. Syrбу N.S., Snyder G.T., Shakirov R.B., Kholmogorov A.O., Zharkov R.V., Tsunogai U. Geochemical distribution of helium, hydrogen, carbon dioxide, and methane in Sakhalin Island mud volcanoes, hot springs, and cold seeps // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2022. Vol. 431. 107667. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107667>
37. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 93 с.
38. Полоник Н.С., Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Изучение состава углеводородных компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов // Докл. Академии наук. 2015. Т. 462, № 1. С. 79–83.

## References

1. Sergienko, V.I. Materials of the joint meeting of the RAS Council on coordinating the activities of regional branches and regional scientific centers of the RAS and the RAS Scientific Council for the Study of the Arctic and Antarctic. UB RAS: Ekaterinburg, Russia. 2010, 117–136 (In Russian)
2. Astakhov, A.S. Dynamics of defluidization processes of the Central Sakhalin deep fault during seismic activation (based on the results of monitoring of the YSMV in July-August 2001). *Dokl. Earth Sci.* 2002, 386 (2), 223–228 (In Russian).
3. Etheridge, D.M. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emission and climatic variability. *Geophys.Res.* 1998, 103 (D13), 15979–15993.
4. Aliyev, Ad.A.; Guliyev, I.S.; Dadashov, F.H.; Rahmanov, R.R. Atlas of world mud volcanoes. Publishing house “Nafta-Press”, “Sandro Teti Editore”: Baku, 2015; 321 p.
5. Valyaev, B.M. On the zonality of the carbon isotopic composition of gases from mud volcanoes and its tectonic control. *Dokl. Earth Sci. USSR.* 1982, 267 (5), 1222–1225 (In Russian).
6. Valyaev, B.M.; Grinchenko Yu.I.; Erokhin V.E.; Prokhorov V.S.; Titkov G.A. Isotopic appearance of gases from mud volcanoes. *Lithology and Mineral Resources.* 1985, 1, 72–87 (In Russian).
7. Kholodov, V.N. About the nature of mud volcanoes. *Priroda.* 2001, 11, 47–58 (In Russian)
8. Kopf, A.J. Significance of Mud Volcanism. *Reviews of Geophysics.* 2002, 40(2), 2-1-2-52. DOI: 10.1029/2000RG000093
9. Veselov, O.V.; Volgin, P.F.; Lyutaya, L.M. The structure of the sedimentary cover of the Pugachevsky mud volcanic region (Sakhalin Island) according to geophysical modeling data. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2012, 31 (6), 4–15 (In Russian).
10. Lavrushin, V.Yu.; Polyak, B.G.; Prasolov, E.M.; Kamensky, I.L. Sources of matter in the products of mud volcanism (according to isotope, hydrochemical and geological data). *Lithology and Mineral Resources.* 1996, 6, 625–647 (In Russian).
11. Melnikov, O.A.; Ilyev, A.Ya. About new manifestations of mud volcanism on Sakhalin Island. *Russian Journal of Pacific Geology.* 1989, 8 (3), 42–48 (In Russian).
12. Melnikov, O.A.; Sabirov, R.N. New data on the current state and past activity of the gas-mud volcano (Sakhalin Island). *Russian Journal of Pacific Geology.* 1999, 18 (3), 37–46 (In Russian)
13. Melnikov, O.A.; Ershov, V.V. Mud (gas-water-litoclastic) volcanism of Sakhalin Island: history, results and research prospects. *Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2010, 6, 87–93 (In Russian).
14. Atlas of Mud Volcanism in Russia. Appendix 2 (Volume 2) to the final qualifying work: Lebedeva I.A. Mud Volcanism in Russia: Final Qualifying Work. Manuscript / I. A. Lebedeva. Scientific Advisor: Prof. E. A. Skupinova. – Vologda: Vologda State University, Department of Geography, Laboratory of Geoecology, 2016; 41 p. (In Russian)
15. Obzhairov, A.I. Gas geochemical fields of the bottom layer of seas and oceans. Nauka: Moscow, Russia. 1993; 139 p. (In Russian)
16. Obzhairov, A.I.; Astakhova, N.V.; Lipkina, M.I.; Vereshchagina, O.F.; Mishukova, G.I.; Sorochinskaya, A.V.; Yugai, I.G. Gas-geochemical zoning and mineral associations of the bottom of the Sea of Okhotsk. Dalnauka: Vladivostok, Russia, 1999; 184 p. (In Russian).
17. Vereshchagina, O.F.; Korovitskaya, E.V.; Mishukova, G.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. In *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 2013, 86–87, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
18. Ershov, V.V.; Shakirov, R.B.; Melnikov, O.A.; Kopanina, A.V. Variations in parameters of mud volcano activity and their relationship with seismicity in the south of Sakhalin Island. *Regional geology and metallogeny.* 2010, 42, 49–57 (In Russian).
19. Tsunogai, U.; Kosaka, A.; Nakayama, N.; Komatsu, D.; Konno, U.; Kameyama, S.; Nakagawa, F.; Sumino, H.; Nagao, K.; Fujikura, K.; Machiyama, H. Origin and fate of deep sea seeping methane bubbles at Kuroshima Knoll, Ryukyu forearc region, Japan. *Geochemical Journal.* 2010, V. 44, 461–476.
20. Lomtev, V.L.; Zherdeva, O.A. To the Seismotectonics of Sakhalin: New Approaches. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean.* 2015, 3(41), 56–58 (In Russian).
21. Poplavskaya, L.N.; Ivashchenko, A.I.; Oskorbin L.S.; Nagornyykh T.V. et al. Regional Catalog of Earthquakes on Sakhalin Island, 1905–2005. IMG I FEB RAS: Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. 2006; 104 p.
22. Geology of the USSR. Sakhalin island /Editor A.V. Sidorenko/. Nedra: Moscow, Russia, 1970, Vol. 33. 431 p. (In Russian).
23. Averyev, V.V. Carbon dioxide arsenic waters of Sinogorsk on Southern Sakhalin. *Geology.* 1975; 32(3), 143–149 (In Russian).
24. Kharakhinov, V.V. Oil and gas geology of the Sakhalin region. Nauchnyy mir: Moscow, Russia. 2010; 276 p. (In Russian)
25. Grannik, V.M. Comparison of structural elements of Sakhalin and Hokkaido. *Dokl. Earth Sci.*, 2005, 400 (5), 654–659 (In Russian).
26. Syrbu, N.S.; Kholmogorov, A.O.; Stepochkin, I.E.; Khazanova, E.S. Comparative analysis of gas-geochemical data from ground-based and satellite monitoring of Sakhalin Island and its shelf (northeast Russia): tectonic consequences. *Geotectonics.* 2023, 2, 39–56 (In Russian)

27. Shakirov, R.B.; Syrbu, N.S. Natural sources of methane and carbon dioxide on Sakhalin Island and their role in the formation of ecological gas-geochemical zones. *Water Resour.* 2013, Vol. 40, 7, 752–760. <https://doi.org/10.1134/S0097807813070129>
28. Rozhdestvensky, V.S. The role of shifts in the structure of Sakhalin. *Geotectonics.* 1982, 4, 99–110 (In Russian)
29. Sokolova, N.L.; Telegin, Yu.A.; Venikova, A.L.; Obzhairov, A.I. Studies of the Dagi Gas-Hydrothermal Vents on the East Coast of Sakhalin Island. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2022, 16 (5), 503–509.
30. Stashchuk, M.F. Thermodynamics and its application in lithology. Nauka: Moscow, Russia. 1985; 221 p. (In Russian)
31. Sorochinskaya, A.V.; Shakirov, R.B.; Obzhairov, A.I. et al. Geochemical and mineralogical features of mud volcanoes on Sakhalin Island. *Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2008, 4, 58–65 (In Russian)
32. Sorochinskaya, A.V.; Shakirov, R.B.; Venikova, A.L.; Pestrikova, N.L. Elements-admixtures in the modern mud breccias on the mud volcanoes in Sakhalin Island. *Bulletin KRAESC.* 2015, 1 (25), 19-30 (In Russian)
33. Gretskaya, E.V. Initial oil and gas source potential of organic matter in sediments (using the example of the depressions of the Sea of Okhotsk). Vladivostok, 1990; 111 p. (In Russian)
34. Zharkov, R.V. Types of thermal waters in the Southern Kuriles and northern Sakhalin and their impact on landscapes. Abstract Diss. ... Candidate of Geography. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 2008. 27 p. (In Russian)
35. Chelnokov, G.A.; Zharkov, R.V.; Bragin, I.V.; Veselov, O.V.; Kharitonova, N.A.; Shakirov, R.B. Geochemical characteristics of subterranean fluids of the southern Central Sakhalin Fault. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2015, 34 (5), 81–95 (In Russian)
36. Syrbu, N.S.; Snyder, G.T.; Shakirov, R.B.; Kholmogorov, A.O.; Zharkov, R.V.; Tsunogai, U. Geochemical distribution of helium, hydrogen, carbon dioxide, and methane in Sakhalin Island mud volcanoes, hot springs, and cold seeps. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2022, V. 431. 107667. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107667>
37. Melnikov, O.A. Structure and Geodynamics of the Hokkaido-Sakhalin Folded Region. Nauka: Moscow, Russia. 1987; 93 p.
38. Polonik, N.S.; Shakirov, R.B.; Sorochinskaya, A.V.; Obzhairov, A.I. Study of the composition of hydrocarbon components of the Yuzhno-Sakhalinsk and Pugachevsky mud volcanoes. *Dokl. Earth Sci.*, 2015, 462 (1), 79–83. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.25; принята к публикации 11.12.2025.

The article was submitted 14.07.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 11.12.2025.

