

УДК 550.4.02:550:424

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО И СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ОСТРОВА САХАЛИН И ЕГО ШЕЛЬФА (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ): ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

© 2023 г. Н. С. Сырбу¹ *, А. О. Холмогоров¹, И. Е. Степочкин¹, Е. С. Хазанова¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН),
ул. Балтийская, д. 43, 690041 Владивосток, Россия

*e-mail: syrbu@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 23.09.2022 г.

После доработки 06.02.2023 г.

После повторной доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Переходная зона окраинных морей Азиатско-Тихоокеанского региона является одним из двух ярко выраженных глобальных поясов деформаций и современного вулканизма на окраине Тихого океана. Кроме того, в пределах переходной зоны открыты крупные месторождения углеводородов (нефть, газ, газоконденсат, газовые гидраты), что делает ее значимым объектом геологических исследований. В статье дана интерпретация основных газо-геохимических и геолого-тектонических закономерностей возникновения и распространения полей метана и углекислого газа различных типов на шельфе о. Сахалин. Проведено исследование газо-геохимических параметров выделяемых газов в транзитной зоне “суша–шельф” на основе сравнения данных спутникового наблюдения и натурных исследований. Представлены данные спутникового наблюдения территории о. Сахалин и его шельфа для выявления связи сейсмических событий и изменений уровня концентрации метана в атмосферном воздухе (в частности, на примере режима метановой разгрузки Южно-Сахалинского грязевого вулкана). Сопоставлены данные дистанционного наблюдения с результатами наземных измерений, дана оценка потенциала использования спутниковых методов наблюдения для исследования газо-геохимического состава полей метана и углекислого газа. Полученные результаты позволяют уточнить оценку эмиссии климатически активных газов, а также привнесут значительный стимул в развитие проекта РФ “Дальневосточный морской карбоновый полигон”.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, шельф, геология, сейсмоструктура, грязевые вулканы, газогеохимические поля, термальные источники, газовые гидраты, метан, углекислый газ, о. Сахалин

DOI: 10.31857/S0016853X2302008X, EDN: FZKQWX

ВВЕДЕНИЕ

Морские континентальные окраины Азиатско-Тихоокеанского региона в последние годы являются объектом интенсивных геохимических исследований, поскольку в районах этой зоны были обнаружены крупные залежи углеводородов в различных формах, включая нефть, газ, газовый конденсат и газовые гидраты.

Сахалинский регион представляет огромный интерес с позиций генезиса и экологической значимости природных газов осадочных бассейнов, скоплений подводных газогидратов, геотермальных и грязевулканических систем, газонасыщенных подземных вод и морских осадков.

На о. Сахалин создается сеть карбоновых полигонов, предназначенных для мониторинга пар-

никовых газов и разработки методики расчета способности поглощения углерода окружающей средой из атмосферы. Оценка эмиссии климатически активных газов становится проблемой достоверного количественного учета антропогенных и природных источников газов, с одной стороны, и природных поглотителей этих газов, с другой стороны.

До недавнего времени вклад геологических источников в глобальный бюджет метана, выделяющегося из различного типа трещин и разломов в земной коре, в значительной степени не принимался во внимание. Немногие расчеты с использованием обратного моделирования содержат оценку эмиссии метана геологическими источниками [40, 42, 43]. Однако в них значительно недооценены масштабы эмиссии из таких источников

как газогидраты, магматические и грязевые вулканы [38].

В последние два десятилетия в результате проведения систематических измерений величин эмиссии метана на станциях, расположенных в вулканических геотермальных районах и углеводородных осадочных бассейнах различных регионов мира, было достоверно установлено, что выбросы метана геологическими источниками значимы в глобальном масштабе. Результаты анализа изотопных соотношений атмосферного метана, приведенные в работах [39, 50, 51], подтверждают вероятность значительной роли его эмиссии в атмосферу от геологических источников. В частности, интерпретация результатов изотопного анализа атмосферного $^{14}\text{C}\text{H}_4$ свидетельствует, что выделение метана всеми подземными (ископаемыми) источниками составляет $30 \pm 5\%$ от его глобальной эмиссии, которая оценивается в 582 ± 87 Тг в год [39, 50, 51].

Одним из аспектов изучения остается воздействие на глобальный климат эмиссии метана дальневосточных окраинных морей, обусловленной геологическими источниками. Современные гидротермальные системы широко распространены в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Здесь сосредоточены значительные запасы подземных вод с разнообразным химическим составом и температурой, которые выводятся на поверхность вдоль ослабленных зон земной коры.

Для геотермальных областей характерны непосредственные выделения метана из магматических вулканов, геотермальных выходов (термальные воды, грязевые вулканы) и при дегазации почв. Для осадочных нефтегазоносных или углеводородсодержащих бассейнов характерны выделения метана грязевыми вулканами, а также его проникновения от мест скопления углеводородов в земной коре через слои вышележащих горных пород и почвы.

Мигрирующий из земной коры метан не в полном объеме достигает атмосферы, а может полностью поглощаться средой. В подводных источниках его эмиссия снижается за счет окисления и поглощения (растворения, сорбции) метана в вышележащих слоях отложений и водной толще океана. В наземных источниках метан перехватывается поверхностным почвенным слоем, который может содержать как метаногенные археи, так и метанотрофные бактерии.

В результате исследований флюидной эмиссии в активных зонах планеты получен огромный объем данных по геохимии и изотопии выносаемого на поверхность вещества в твердой и жидкой фазах, влиянии потоков природных газов на аутигенное минералообразование, формирование сообществ микроорганизмов и повышение

концентрации парниковых газов [4, 16, 35, 60]. Достигнуты значительные успехи в изучении рассеяния газовых компонентов, где роль отечественных ученых трудно переоценить [26, 36, 46, 58, 59, 63].

Были предприняты небезуспешные попытки найти взаимосвязь сеймотектонических процессов и изменчивости химического состава количественных характеристик потоков углеводородных газов в местах их разгрузки на континентальных окраинах [3, 53, 56, 64].

Много работ было проведено по исследованию наличия и особенностям взаимосвязи между грязевулканическими и сеймотектоническими процессами, однако, в основном приводились данные о составе продуктов деятельности грязевых вулканов, полученные эмпирическим путем, и их сопоставление с данными сейсмических наблюдений [2, 6, 11, 17, 25, 49, 52, 68].

Термальные и минеральные проявления о. Сахалин мало изучены, особенно связь их газогеохимического режима с сейсмической активностью, углеводородным потенциалом региона и влиянием потока природных газов на окружающую среду. Между тем, макро- и микро-газовые компоненты (углеводородные газы, кислород, азот, водород, гелий, углекислый газ, радон, сероводород) позволяют исследовать природу проницаемых систем земной коры, глубинных источниках газов, их влияние на ландшафт, уточнить геохимический состав выделяемых газов и особенности связи процессов в системе “литосфера–гидросфера–атмосфера”.

Начиная с 2000-х гг. в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН (г. Владивосток, Россия) и Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, Россия) проводятся комплексные исследования термальных и минеральных вод, проявления грязевого вулканизма [11–14, 19, 28, 33, 34]. Было установлено, что грязевые вулканы Хоккайдо–Сахалинской складчатой области контролируются продольными разломными зонами, вдоль которых также расположены скопления углеводородов [9, 61].

Наиболее вероятно возникновение сосредоточенной разгрузки газов и флюидов в узлах пересечения активных разломов различных кинематических типов, среди которых преобладают взбросы и сдвиговые дислокации [29].

Из-за труднодоступности региона возникают сложности получения представительных данных, поэтому остается невысокой изученность потока парниковых газов в атмосферу и их химического состава. Тектонически активные области Дальнего Востока России, расположенные в переходной зоне от Азиатского континента к Тихому океану, являются важными районами для изучения эмиссии метана вследствие геологических процессов

и его воздействия на окружающую среду. В контексте текущих глобальных изменений климата актуальным является изучение эмиссии метана на основе интеграции данных наземного и спутникового мониторинга острова Сахалин, как активной континентальной окраины.

Авторами настоящей статьи проведен анализ данных, полученных в серии экспедиционных исследований на о. Сахалин в рамках локальных грантов и проектов совместно с коллегами из Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, Россия). Район исследования относится к северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса, захватывая такие структуры, как складчатая система Сахалина и его шельф (рис. 1).

Целью работы являлось исследование распределения метана в структурах с углеводородным потенциалом, оценка данных спутникового наблюдения района о. Сахалин для выявления связи сейсмических событий с изменением уровня концентрации метана в атмосферном воздухе (на примере режима метановой и углекислой разгрузки Южно-Сахалинского грязевого вулкана), сопоставление данных дистанционного наблюдения с результатами экспедиционных исследований.

Цель нашего исследования состоит в выявлении региональных газогеохимических и геолого-тектонических закономерностей, отражающих генезис, формирование и распределение газогеохимических полей, взаимосвязанных с залежами нефти и газа, газогидратов и в целом обусловленных геодинамикой северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления особенностей аномальных газогеохимических полей метана, начиная с 2011 г., были проведены многолетние полевые исследования термальных, минеральных источников, грязевых вулканов, участков нефтегазопроявлений и газовых гидратов на о. Сахалин и его шельфе.

Составной частью современной системы мониторинга являются спутниковые средства дистанционного зондирования, которые обладают широкими возможностями и существенными преимуществами по сравнению с наземными средствами, — они обеспечивают глобальное покрытие, мгновенную съемку обширной акватории, дают возможность регулярного повтора наблюдений и получение комплексных и мультисенсорных данных.

Нами был проведен анализ данных спутникового мониторинга концентрации метана в воздухе над о. Сахалин за период 2018–2021 гг. с использованием данных, полученных:

- AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) [30, 31] работает на спутнике AQUA (NASA, США), который проводит глобальное зондирование земной атмосферы. Сканер предоставляет данные атмосферных профилей температуры, водяного пара, метана, а также данные аэрозольных фракций в виде снимков поверхности Земли с пространственным разрешением 50 км. Профиль разделен на 28 уровней от 1100 до 0.1 гПа. Наибольшая чувствительность к метану заявлена на уровне 300–400 гПа [31].

- TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) [65] работает на спутнике Copernicus Sentinel-5 Precursor (ESA, Нидерланды), который также проводит глобальное зондирование земной атмосферы. По пространственному разрешению каждый пиксель имеет размер 7×3.5 км. Предоставляемые данные — метан, озон, угарный газ, диоксид азота, формальдегид, облачность в виде интегральных по атмосферному столбу значений параметров, измеренных вдоль точек орбиты полета.

- IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer — New Generation) [44] на борту спутника Metop (EUMETSAT, Германия). Ориентирован на измерение атмосферных профилей парниковых газов и мониторинг качества воздуха с пространственным разрешением 12 км. Данные предоставляются в виде профилей, измеренных вдоль точек орбиты полета. Профиль разделен на 100 уровней.

В полевых работах был проведен отбор проб воды из термальных и минеральных источников в емкости объемом 0.5 л и 100 мл. Газ извлекался методом вакуумной дегазации и методом равновесных концентраций в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия) [56, 67]. Лаборатория газогеохимии ТОИ ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта № 58 от 21.12.2021 г. к паспорту лаборатории ПС 1.051–21.

В районах расположения грязевых вулканов Южно-Сахалинский, Пугачевский, Лесновский и Восточный также отбирались пробы свободного газа. При отборе источник герметично закрывался специальной воронкой с газоотводной трубкой. Затем ручным вакуумным насосом из системы откачивался воздух и выдерживалось свободное барботирование газа через насыщенный солевой раствор в течение 20 минут. В завершение проба газа объемом 10 мл без контакта с атмосферой переводилась в стеклянную пробирку с соевым раствором.

За время работ в районе о. Сахалин был получен представительный фактический материал (табл. 1).

подавляющее число проб и образцов имеют уникальный характер, в связи труднодоступностью районов и небольшой изученности газогеохимического состава выделяемых газов.

Анализ углеводородных газов, азота, кислорода и углекислого газа был выполнен на двухканальном газовом хроматографе КристаллЛюкс-4000М (ОАО “Хроматек”, г. Россия). Изотопный состав углерода метана и углерода углекислого газа определялся в лаборатории геохимии стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия) на масс-спектрометре Finnigan MAT-252 (Германия), в Университете Хоккайдо (г. Саппоро, Япония) и Университете Нагойя (г. Нагойя, Япония). Были рассчитаны значения (δ) как отношение $R_{\text{проба}}/R_{\text{стандарт}}$, где R – это отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ как для исследуемой пробы, так и для стандарта (VPDB) [66].

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Современная континентальная окраина северо-западного сектора Тихого океана включает докайнозойские и кайнозойские структурные элементы северной части Японского моря и Татарского пролива, дна Охотского моря, о. Хоккайдо, о. Сахалин, Корякского нагорья, Камчатки и Курильских островов. Геологическая структура региона сформирована в процессе конвергентного, трансформного и коллизионного взаимодействия литосферных плит в течение позднего мезозоя–кайнозоя [9]. Граница между Амурской и Охотской микроплитами приурочена к меридиональному крупнейшему Центрально-Сахалинскому разлому.

В Хоккайдо-Сахалинском регионе проявлена одна из важных особенностей нефтегазоносных областей – дегазация недр. Сдвиговая тектоника создает благоприятные обстановки для формирования крупных структур растяжения, характеризующихся наиболее оптимальными условиями для нефтегазонакопления, поступления по проницаемым дренажным зонам крупных магистральных сдвигов глубинных флюидных потоков [27]. Кулисообразное сочленение структурно-геоморфологических элементов, составляющих о. Сахалин, и их косое расположение по отношению к общему простиранию Западно-Сахалинского антиклинория приводят к влиянию на формирование складчатости не только сжатия, но и сдвиговых движе-

ний блоков, которые, по-видимому, происходили вдоль всех основных разломов о. Сахалин [24].

Остров Сахалин представляет собой фрагмент Азиатской континентальной окраины, отделенный от нее кайнозойской рифтовой структурой Татарского пролива. В связи с этим, в пределах острова прослеживаются палеозойские и мезозойские–раннепалеогеновые образования, развитые в Сихотэ-Алине, хотя здесь они существенно нарушены системой сближенных меридиональных сдвигов [22, 23].

С учетом особенностей геологического строения о. Сахалин, о. Хоккайдо, а также дна прилегающих акваторий и при сопоставлении их структурных элементов, было сделано предположение о правомерности объединения складчатых сооружений в единую Хоккайдо-Сахалинскую складчатую область [8, 9] (рис. 2).

Большинство исследователей разделяют представления о хорошо выраженной тектонической зональности складчатой системы, прослеживающийся от южных частей о. Хоккайдо до п-ва Шмидта на севере о. Сахалин [45].

Остров Сахалин является областью интенсивной сейсмотектонической активности [27]. Структуры острова, в целом, представляют собой фрагмент трансформной границы литосферных плит, которая выражается в системе глубинных разломов [32] (см. рис. 1). По этим разломам осуществляется газо-флюидный перенос, интенсивность которого также регулируется сейсмической активностью [29].

Сейсмичность о. Сахалин связана с субмеридиональными глубинными разломами, разделяющими Охотоморскую литосферную плиту от Евразийской плиты. Движение этих плит друг относительно друга, а также развитие спрединговых процессов в рифтовой структуре Татарского пролива, приводят к активной сейсмичности [23].

С тектоническими трещинами связаны многочисленные выходы газов и образование аномальных газгеохимических полей метана, его гомологов, водорода, иногда – углекислого газа и гелия [62].

Рис. 1. Карта района работ и основных объектов опробования относительно положения основных разломов (по данным [18], с изменениями и дополнениями).

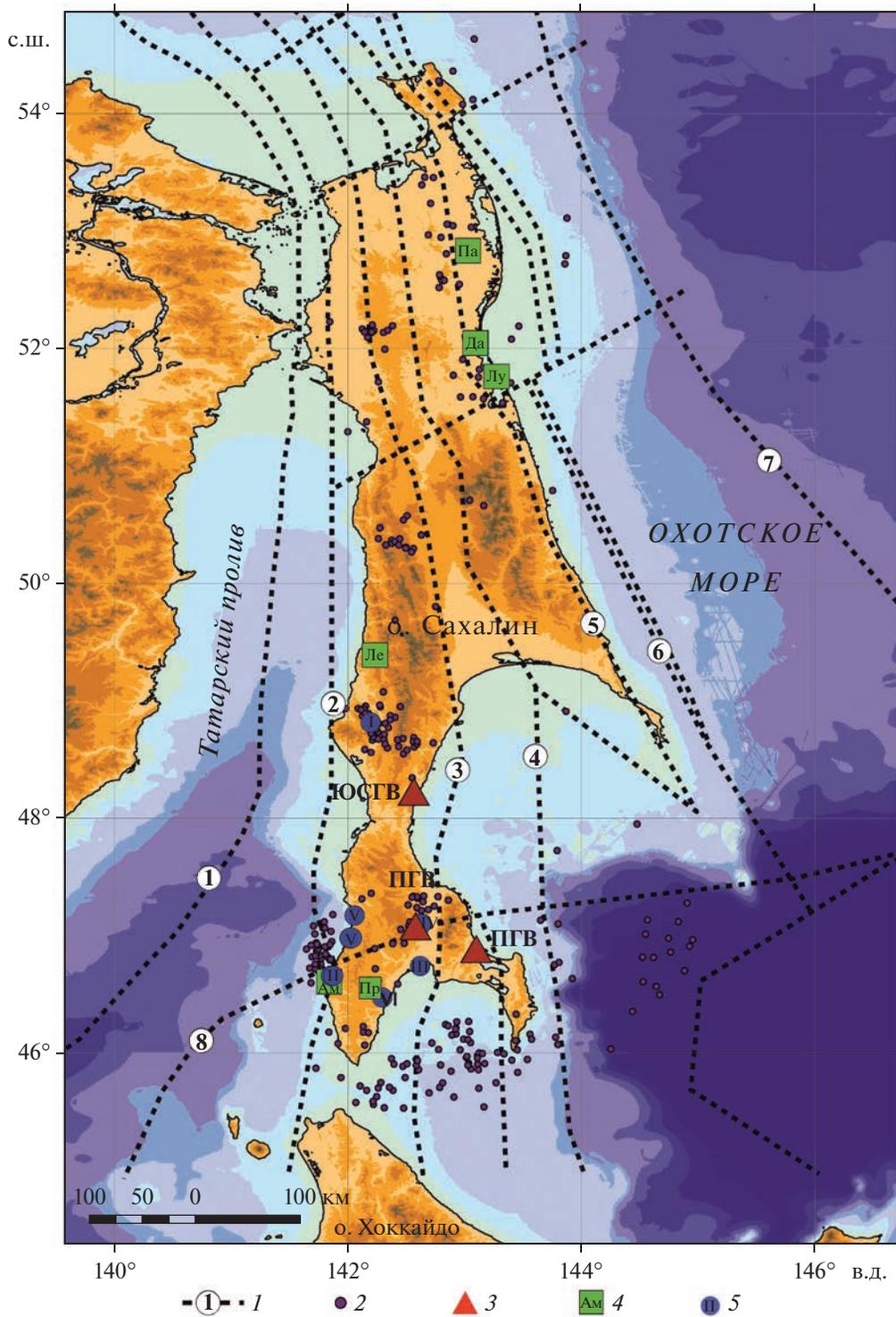
Грязевые вулканы: Южно-Сахалинский грязевой вулкан – ЮСГВ, Пугачевская группа грязевых вулканов – ПГВ, Лесновский грязевой вулкан – ЛГВ.

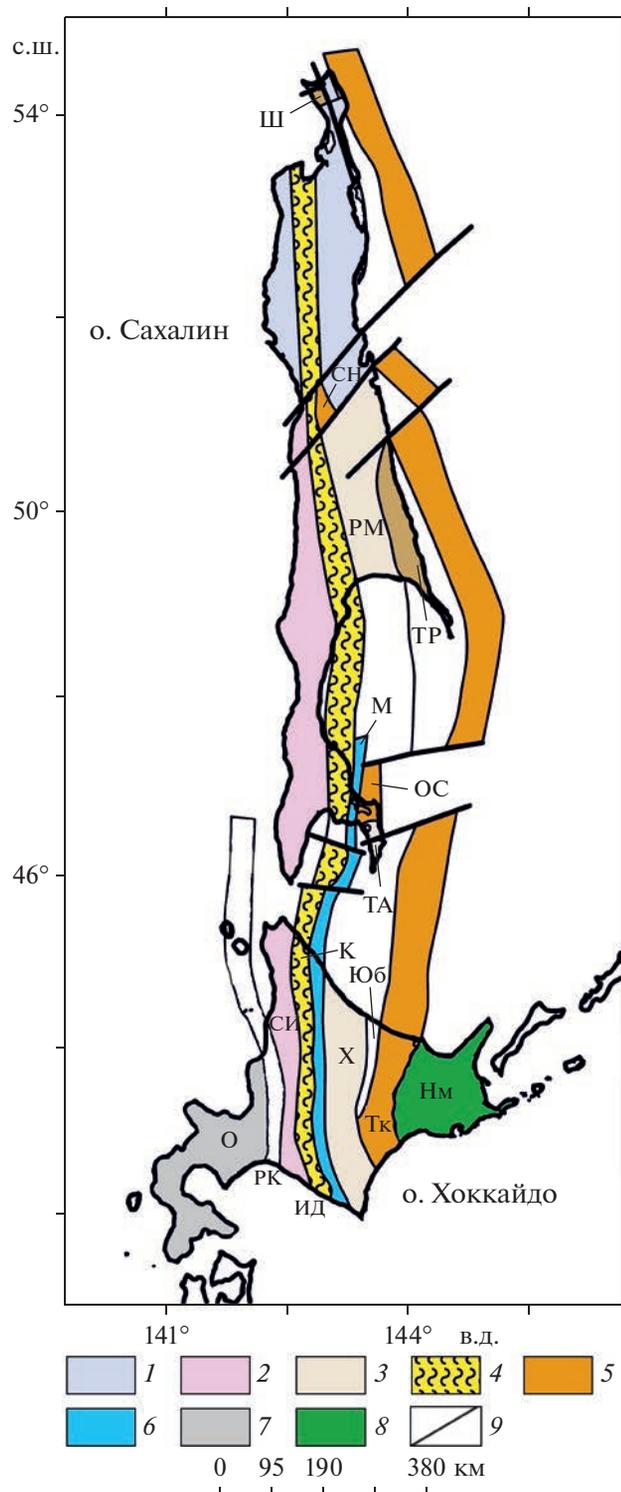
Источники минеральных вод: I – Волчанские; II – Невельские; III – Анивские; IV – Синегорские, V – Холмские, VI – метановые выходы на юге о. Сахалин.

Термальные источники: Ам – Амурские; Да – Дагинские; Лу – Луньские; Ле – Лесогорские; Па – Паромайские; Пр – Приточные.

Региональные разломы (цифры в кружочках): 1 – Восточно-Сихотэ-Алиньский; 2 – Западно-Сахалинский; 3 – Центрально-Сахалинский; 4 – Хоккайдо-Сахалинский; 5 – Северо-Сахалинский; 6 – Пограничный; 7 – Восточно-Сахалинский; 8 – Стародубский.

1 – региональные разломы; 2 – эпицентры землетрясений ($M_W \geq 4$); 3 – грязевые вулканы; 4 – термальные источники; 5 – источники минеральных вод





Выходы природных газов на о. Сахалин и прилегающей акватории можно разделить на три группы:

– локальные выходы газов (грязевые вулканы, газовые “факелы”, газогидротермальные источники);

Рис. 2. Схема сопоставления структурных элементов о. Сахалин и о. Хоккайдо (по данным [8, 9, 45], с изменениями и добавлениями).

Террейны: Ш – Шмидтовский; СН – Северо-Набильский; ТР – Терпения; РМ – Рымникский; ОС – Озерско-Свободненский; ТА – Тонино-Анивский; О – Осима.

Тектонические пояса: СИ – Сорачи-Иеза; К – Камуикотан; ИД – Идонаппу; Х – Хидака; ЮБ – Юбетсу; Тк – Токоро.

Вулканические зоны: РК – Ребун-Кабато; Нм – Немуро.

Шовная сдвиговая зона: М – Мерейская.

1 – кайнозойские отложения; *2–3* – складчатые сооружения о. Сахалин: *2* – Западно-Сахалинское, *3* – Восточно-Сахалинское; *4–5* – субдукционные структуры: *4* – Центрально-Сахалинская, *5* – Охотоморская; *6* – Мерейская шовная сдвиговая зона; *7* – юрские раннемеловые аккреционные комплексы террейна Осима; *8* – пояса Немуро; *9* – дизъюнктивные дислокации

– площадное поступление газа над нефтегазональными структурами через сеть разломов;

– площадная эмиссия газа в зоне интенсивных эрозионно-денудационных процессов.

Положение о. Сахалин в зоне активных горизонтальных движений литосферных плит обуславливает его геологическое строение, которое характеризуется большими мощностями верхнемеловых и кайнозойских осадочных отложений (до 10 км на Северном Сахалине), высокой сейсмичностью и значительными градиентами тектонических движений [7].

Среди современных методов исследования флюидодинамических процессов земной коры наиболее эффективным и доступным являются газогеохимический мониторинг. Все большую актуальность на сегодняшний день приобретают дистанционные измерения и исключительно важны в экологическом мониторинге. Методы активного дистанционного зондирования с использованием лазерных источников излучения обладают несомненным преимуществом среди методов мониторинга атмосферы, включая всевозможные методы прямых контактных измерений ее параметров.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Согласно ранее проведенным газогеохимическим исследованиям на о. Сахалин выделены две эколого-газогеохимические зоны первого порядка – метановая и углекисло-метановая [61]. На основе анализа имеющихся данных по углеводородным и нефтегазональным районам, а также полученных нами данных по грязевым вулканам и Дагинской газогидротермальной системе были установлены особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин. Проведенный анализ показал, что в северо-восточной и восточ-

ной части о. Сахалин системы газовой разгрузки представлены метаном, при этом углекислый газ наблюдается в минимальных концентрациях [61].

В западной и юго-западной частях о. Сахалин расположены объекты, в которых углекислый газ является основным компонентом (грязевые вулканы, водоминеральные источники) или составляет значительную часть (угольные залежи) и доля углеводородных газов ряда этан–пентан увеличена.

Газо-геохимические исследования были продолжены на участках разгрузки термальных и минеральных вод на о. Сахалин. Полученные данные распределения метана и углекислого газа на водоминеральных участках газовой разгрузки подтвердили наличие двух газо-геохимических зон. Особенности проявления полей метана и углекислого газа на о. Сахалин отражает различие в геологическом строении северо-восточной и юго-западной частей острова.

На севере основные нефтегазопроявления приурочены к кайнозойским отложениям (средний и верхний миоцен, плиоцен), накопленным в морских условиях, и контролируются субмеридиональными разломами сдвигового типа, которые служат основными каналами для миграции газов и флюидов. Современная активная миграция вдоль разломов подтверждается многочисленными нефтегазопроявлениями, термальными и минеральными источниками, газовыми аномалиями.

Для южной части Сахалина характерны преимущественно континентальные терригенные отложения нижнемелового, верхнемелового и палеоген–неогенового возраста, при этом в ряде случаев органическое вещество может иметь также морской генезис [21]. К зонам разломов приурочены разновозрастные интрузии.

Результаты проведенной многолетней газо-геохимической съемки подтверждаются данными спутникового наблюдения (рис. 3).

Имеющиеся данные показывают повышенные значения концентрации метана в северной части о. Сахалин. Повышенные показатели также наблюдаются и над северной частью акватории, где в пределах Северо-Сахалинского осадочного бассейна расположены основные проявления нефти и газа, также на северо-восточном шельфе и склоны известны залежи газовых гидратов [41, 48, 54].

Состав газогеохимических полей метана и углекислого газа о. Сахалин по данным экспедиционных исследований

Локальные участки повышенных концентраций метана выявлены в южной части о. Сахалин (рис. 4).

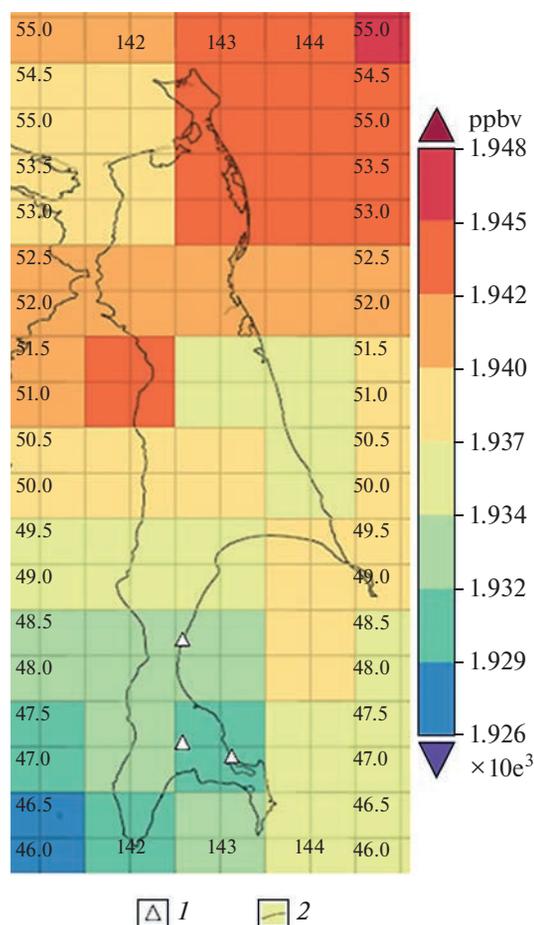


Рис. 3. Концентрация метана по данным ИК-зонда AIRS [30] (нисходящий виток) на горизонте 100 м над поверхностью за период 01.09.2017–03.09.2021 (1000 ppbv = 1 ppm). 1 – грязевые вулканы; 2 – контур о. Сахалин (слева) и континентальной части суши (справа)

Анализ воды опробованных Холмских источников, показал, что имеются примеси, которые принадлежат к сульфидным (слабосероводородным). Водные источники с аналогичным составом воды распространены в южной части о. Сахалин, на его западном побережье (Татарский бассейн) и приурочены к зонам тектонических разломов [28].

Выходы многочисленных источников наблюдаются преимущественно в узких зонах разломов в сильно трещиноватых вулканогенно-осадочных миоценовых образованиях, реже – палеогеновых и меловых.

В результате проведенной серии хроматографических анализов было выявлено, что Холмские сернистые источники содержат высокие концентрации газов, растворенных в воде:

- метан – 20666–1 701 472 нл/л:
- гелий – до 900 нл/л и
- водород – до 500 нл/л.
- этан – обнаружен в некоторых пробах.

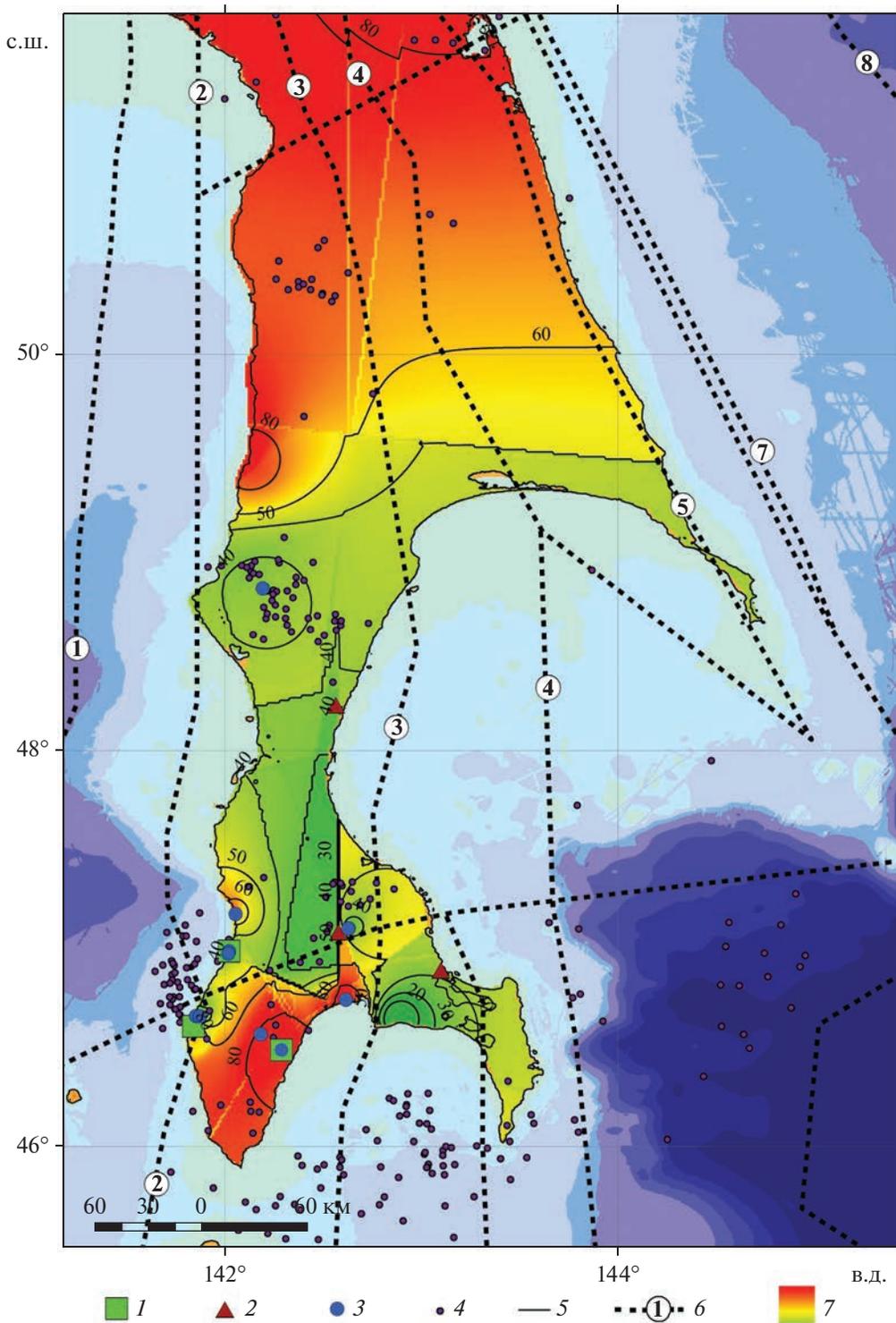


Рис. 4. Распределение концентраций метана в южной части о. Сахалин (по данным [18], с изменениями и дополнениями).

Региональные разломы (цифры в кружочках): 1 – Восточно-Сихотэ-Алиньский, 2 – Западно-Сахалинский, 3 – Центрально-Сахалинский, 4 – Хоккайдо-Сахалинский, 5 – Северо-Сахалинский, 6 – Пограничный, 7 – Восточно-Сахалинский, 8 – Стародубский.

1 – термальные источники; 2 – грязевые вулканы; 3 – водоминеральные источники; 4 – эпицентры землетрясений; 5 – изолинии; 6 – линии основных разломов; 7 – концентрации CH_4 от 2.6 до 96.38, (%)

В составе глубинных флюидов наряду с водородом, метаном и другими углеводородами присутствуют кислые серосодержащие газы. Поскольку температурный градиент в земной коре составляет $\sim 20^\circ\text{C}/\text{км}$, то из глубин к поверхности поступает теплая вода, содержащая серную, соляную и фтороводородную сильные кислоты.

Не исключена связь проявлений минеральных вод на юго-западном побережье острова с нефте-, газопроявлениями и проявлениями газогидратов южной части Татарского пролива, находящимися под влиянием проницаемой зоны Западно-Сахалинского разлома.

В 2013–2015 гг. на шельфе и склоне острова Сахалин проведены несколько морских научных экспедиций в рамках международного проекта “Sakhalin Slope Gas Hydrates” (SSGH), в котором приняли участие Россия, Япония и Корея [29, 57].

По данным проведенных экспедиций в пределах верхней части островного склона в районе залива Де Лангля в Японском море были обнаружены наиболее мелководные, на глубине 322 м, из известных проявлений газогидратов, вскрыт полный разрез отложений, характерных для участков с потоком углеводородных газов на морском дне [57].

Повышенная сейсмичность юга о. Сахалин [22, 23], а также наличие в этом районе активных грязевых вулканов и минеральных источников свидетельствует об активности разломов. Дополнительным локальным источником углекислого газа, а также водорода в юго-западной зоне являются палеовулканы, однако, они имеют единичное распространение [23].

На южном отрезке крупный Центрально-Сахалинский разлом контролирует размещение мезозойских магматических формаций, которые, как мы полагаем, являются дополнительным источником углекислого газа в южной части о. Сахалин.

Выявлено, что в направлении от Пугачевского грязевого вулкана значительная доля метана (до 60%) сменяется на преобладание углекислого газа в Южно-Сахалинском грязевом вулкане, Синегорских источниках, расположенных в окрестностях г. Южно-Сахалинск (рис. 5).

Происхождение поля повышенных концентраций углекислого газа в южной части о. Сахалин может быть также обусловлено магматическими источниками и, возможно, молодым термометаморфизмом горных пород. Там, где в зону метаморфизма вовлекаются породы, насыщенные органическим веществом (начиная с верхнего мела), к CO_2 добавляется генерация метана с тяжелым изотопным составом ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$):

– для Южно-Сахалинского грязевого вулкана $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2 -2.8\dots-2.7\text{‰}$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 -27\text{‰}$

– для Пугачевского грязевого вулкана $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2 -4\text{‰}$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 -25\dots-21\text{‰}$.

Также внедрение интрузивных тел (дайки диабазов) в районе Южно-Сахалинского грязевого вулкана и Синегорских источниках может объяснить повышенные концентрации углекислого газа в этом районе [1]. Изотопный состав углерода метана -36.7‰ и углекислого газа $-2\dots-22.2\text{‰}$, указывает на преобладание значительной доли термогенной компоненты в восходящих флюидах. Наличие мантийного гелия в данном районе однозначно свидетельствует о глубинном генезисе газов, включая этан, пропан, бутан и изобутан.

Глубина сахалинских сдвигов определена по глубине очагов землетрясений и составляет 15–20 км. По данным сейсмических исследований таким глубинам соответствуют зоны трещиноватости, насыщенные флюидами, соединяющиеся с вертикальными разломами сдвигового типа, где происходит активная миграция газов [20].

Вдоль Хоккайдо–Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов вертикальная амплитуда смещения блоков составляет 400–600 м. В периоды землетрясений в районе глубоких тектонических прогибов может происходить процесс смешивания глубинных флюидов и седиментогенных растворов, содержащих углеводородные газы. Во время сеймотектонического сдвига происходит миграция флюидов в проницаемые зоны.

Флюиды заполняют трещины и выдавливаются вверх по разлому. Если разлом перекрыт осадочным чехлом (северо-восточная часть о. Сахалин), то флюиды скапливаются в пластах пористых и трещиноватых пород, а если разлом сообщается с земной поверхностью (южная и юго-западная часть Сахалина), то флюиды выходят на поверхность.

Концентрация метана и углекислого газа в атмосферном воздухе по данным спутникового наблюдения

На о. Сахалин существует две крупные грязево-вулканические системы – Южно-Сахалинский грязевой вулкан и Пугачевская группа грязевых вулканов. Известны также Восточный и Лесновский грязевые вулканы, которые по своей активности ближе к небольшим грязепроявлениям (см. рис. 1).

Грязевым вулканам о. Сахалин свойственны максимальные концентрации углекислоты среди известных грязевых вулканов. Преобладающим газовым компонентом для Южно-Сахалинских грязевых вулканов является CO_2 (до 74%), значительных концентраций достигает и CH_4 (до 24%) [61]. Представление о глубинном источнике газов Пугачевского и Южно-Сахалинского грязевых вулканов согласуется с тем, что газы грязевых

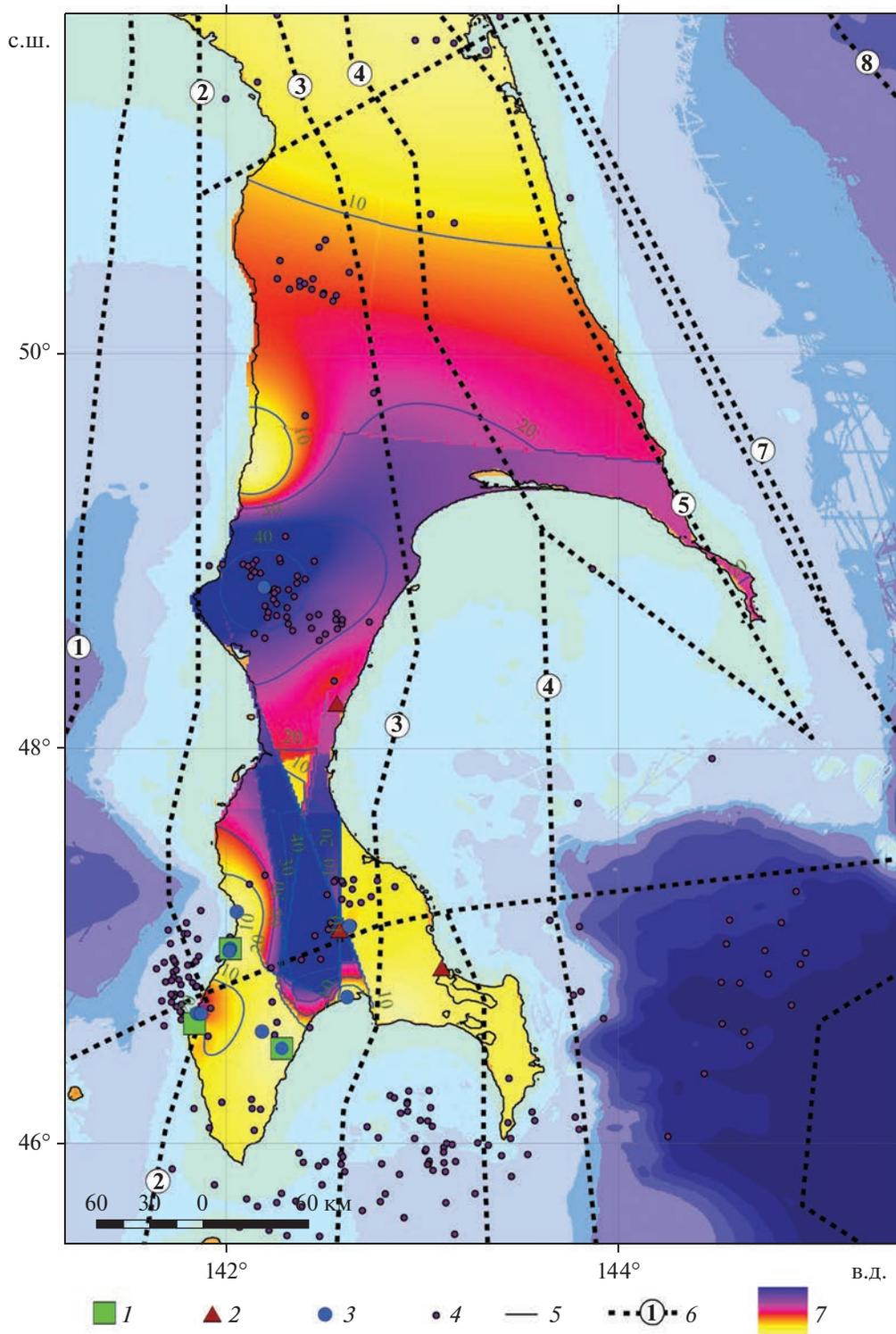


Рис. 5. Распределение концентраций углекислого газа в южной части о. Сахалин (по данным [18], с исправлениями и дополнениями).

Региональные разломы (цифры в кружочках): 1 – Восточно-Сихотэ-Алиньский, 2 – Западно-Сахалинский, 3 – Центрально-Сахалинский, 4 – Хоккайдо-Сахалинский, 5 – Северо-Сахалинский, 6 – Пограничный, 7 – Восточно-Сахалинский, 8 – Стародубский.

1 – термальные источники; 2 – грязевые вулканы; 3 – водоминеральные источники; 4 – эпицентры землетрясений; 5 – изолинии; 6 – линии основных разломов; 7 – концентрации CO_2 от 0.11 до 81.4, (%)

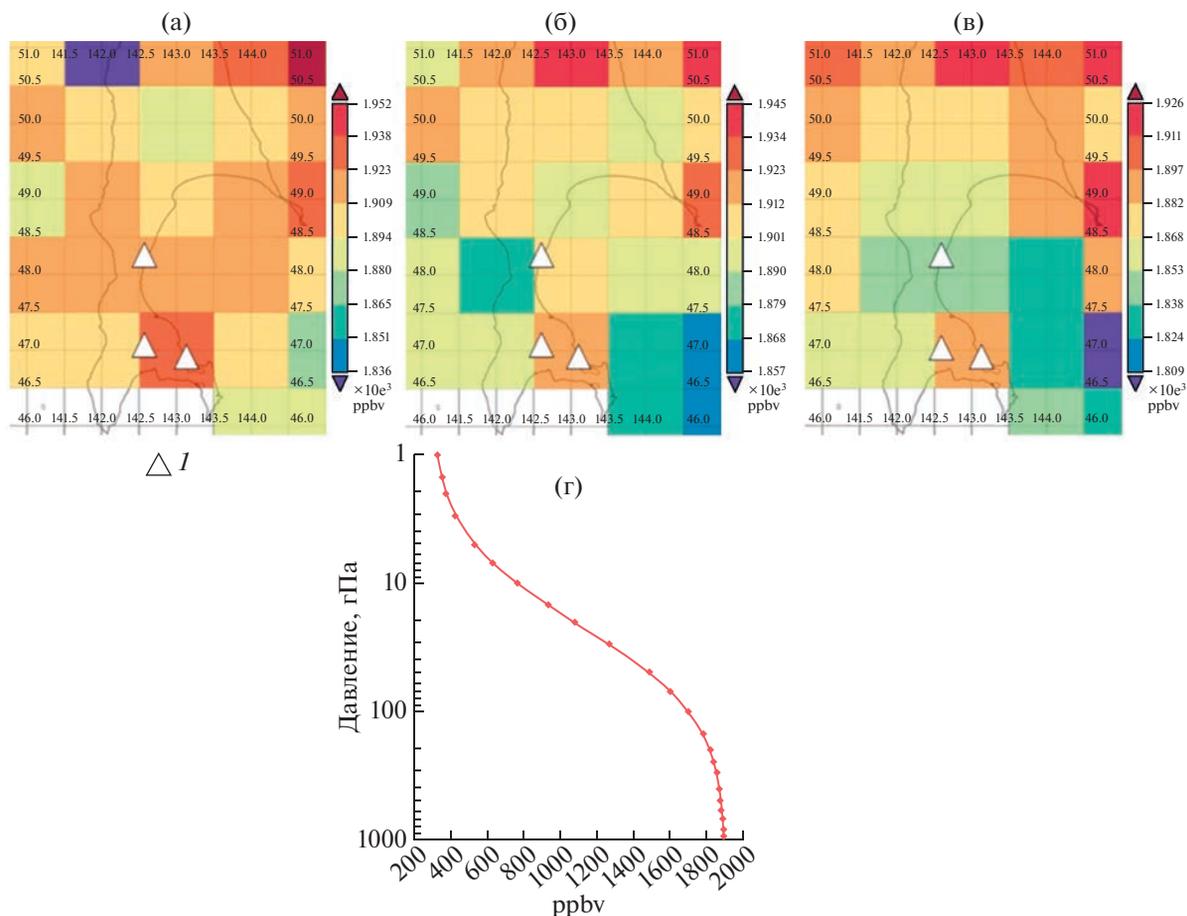


Рис. 6. Концентрация метана на горизонтах 1000 гПа (а), 850 гПа (б), 400 гПа (в) и вертикальный профиль (г) 08.09.2021 г.
 I – грязевые вулканы

вулканов генерируются в осадочных толщах на глубинах порядка 5–6 км, где существуют термобарические условия для образования больших объемов газа [5, 10]. Изменения химического состава свободных газов грязевых вулканов обычно объясняются механическим смешиванием газов из нескольких отдельных различных источников (резервуаров), вскрываемых подводящими каналами вулканов [6, 17].

Геологическое развитие, а также сейсмотектонических режим о. Сахалин, обуславливают наличие повышенных концентраций углекислого газа в южной части острова.

Для выявления связи сейсмических событий и изменения уровня концентрации метана в атмосферном воздухе на примере самого крупного и активного Южно-Сахалинского грязевого вулкана о. Сахалин было выполнено сопоставление данных дистанционного наблюдения с результатами экспедиционных исследований.

В экспедиции в сентябре 2021 г. были отобраны пробы свободного газа из грифонов Южно-

Сахалинского грязевого вулкана, пробы воздуха над грифонами на высоте 1 м, измерено атмосферное давление, которое составило 940 гПа. Концентрация метана в воздухе в районе Южно-Сахалинского грязевого вулкана составила 2.1–4.5 ppm.

Показано небольшое снижение концентрации метана при увеличении высоты наблюдения, а также очевидное резкое снижение концентрации метана выше горизонта 400 гПа (рис. 6, вертикальный профиль, график).

Хоккайдо–Сахалинская складчатая область характеризуется значительной интенсивностью сейсмических событий (см. рис. 1). Однако в период от 22.08.21 г. по 08.09.2021 г. на шельфе и склонах о. Сахалин землетрясений не было зарегистрировано, но 12.09.21 г. произошло землетрясение в районе Курильской котловины магнитудой $M = 5.3$ и глубиной эпицентра 358 км [37].

Показано изменение уровня концентрации метана на различных горизонтах по данным AIRS [31] (рис. 7). После землетрясения 12 сентября 2021 г.

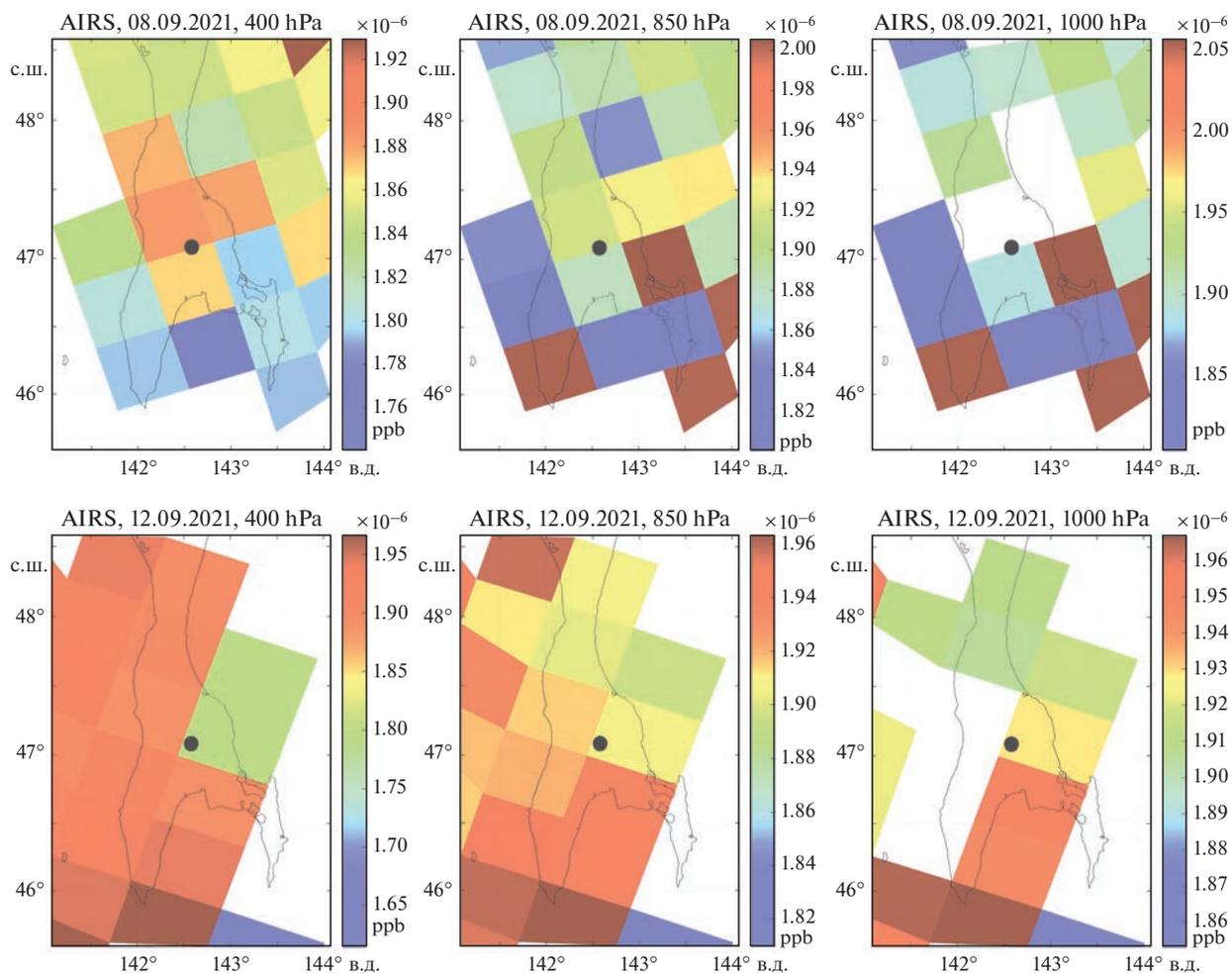


Рис. 7. Пространственные распределения концентраций на уровнях 400, 850, 1000 гПа за 08.09.2021 и 12.09.2021 по данным AIRS ([30, 31]).
Обозначено: Южно-Сахалинский грязевой вулкан (кружок черным); контур о. Сахалин (линия черным).

концентрация метана возросла на всех исследуемых горизонтах.

На дату 8 сентября 2021 г. концентрация метана на каждом из трех рассмотренных горизонтов ниже, чем в день землетрясения 12 сентября 2021 г. Очевидно, что сохраняется общая тенденция к снижению концентрации при увеличении высоты горизонта.

Рост концентрации метана в атмосфере (по данным AIRS [31]) после землетрясения 12.09.2021 г. представлен на графике (рис. 8).

В течение месяца в августе 2021 г. для уровня максимальной чувствительности сканера AIRS отмечались скачки значений концентрации метана (в диапазоне 1.75–2.15 ppb), а после землетрясения 12 сентября 2021 г. показатель возрос и сохранял некоторую стабильность (1.9–2 ppb) на протяжении 7-ми дней. Однако в приземных слоях данный рост заметен более отчетливо и концентрация метана в приземных слоях атмосферы

остается повышенной в течение 7-ми дней после землетрясения.

Мониторинг района исследования проводился при помощи сканера ТРОПОМІ [65], результаты анализа данных и амплитудное изменение концентрации метана в августе 2021 г. в период без землетрясений вблизи исследуемой области представлены на графике (рис. 9).

Однако после землетрясения показатель концентрации метана в атмосфере вырос и в течение 7-ми дней сохранял относительную стабильность (1825–1895 ppbv).

Представлены результаты наблюдения за изменениями концентрации метана и углекислого газа в атмосфере, полученные при помощи сканера IASI (MetOp) [44] (рис. 10).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мониторинг района Южно-Сахалинского грязевого вулкана посредством трех сканеров

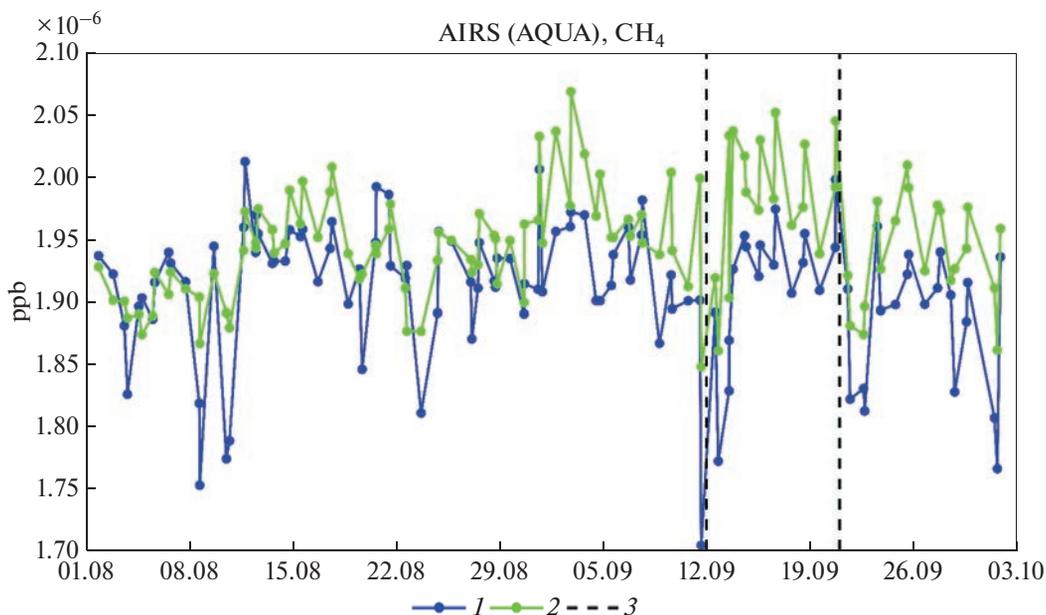


Рис. 8. График изменения концентрации метана за 01.08.2021–03.10.2021 гг. по данным сканера AIRS (по данным [30, 31]). 1 – значения на уровне максимальной чувствительности, 300–400 гПа; 2 – значения концентраций метана в приземных слоях атмосферы, 900 гПа; 3 – сейсмическое событие

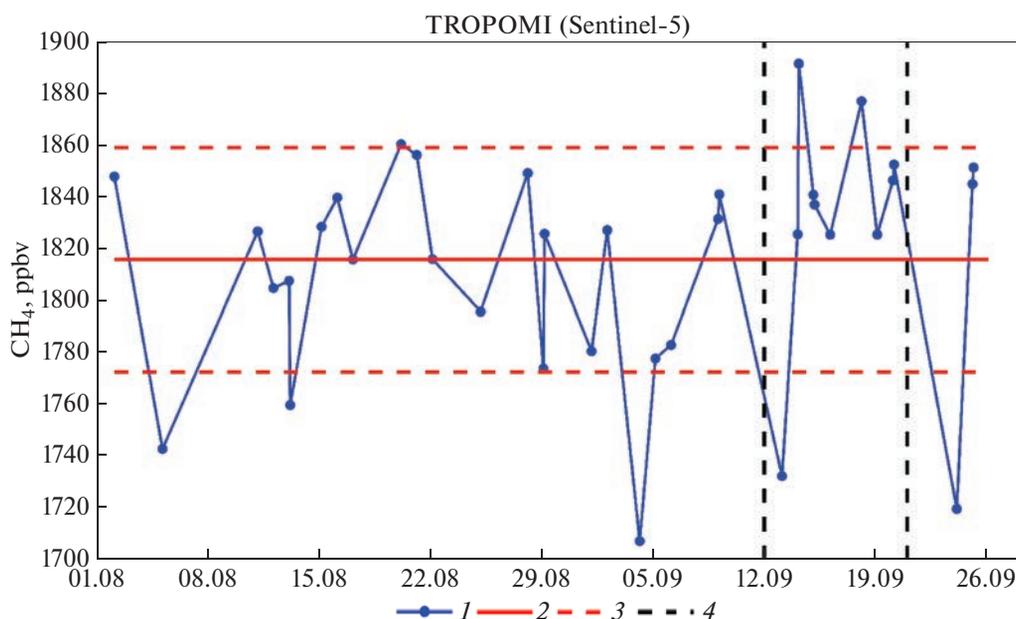


Рис. 9. График изменения концентрации метана за 01.08.2021–26.09.2021 гг. по данным сканера TROPOMI ([65]). 1 – концентрации CH_4 (ppbv); 2 – средняя концентрация за рассматриваемый период; 3 – границы стандартного отклонения концентраций; 4 – сейсмическое событие

спутниковой системы мониторинга AIRS [30, 31], TROPOMI [65] и IASI [44] показал схожие результаты, а именно – дистанционные методы зондирования атмосферы зафиксировали рост концентрации метана после землетрясения, а также сохранение относительно стабильного показателя концентрации в течение 7-ми дней после земле-

трясения. Кроме того, анализ данных со всех используемых сканеров подтвердил снижение концентрации метана при условии увеличения высоты рассматриваемого слоя атмосферы.

Взаимосвязь распределения и изменчивости состава природных газов в зависимости от сейсмичности была подтверждена и были проведены

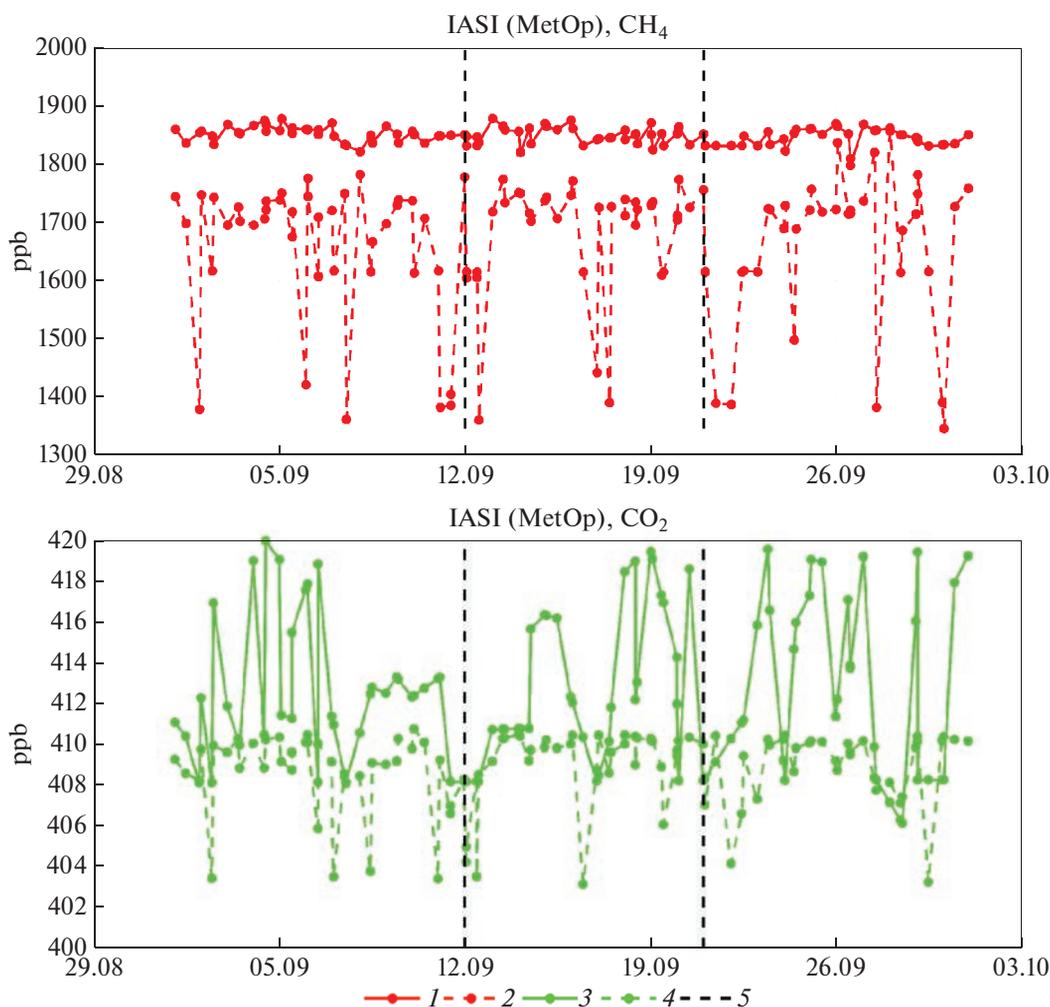


Рис. 10. Графики изменения концентрации: метана (а) и углекислого газа (б) за период 01.08.2021–03.10.2021г. по данным сканера IASI (MetOp) ([44]).

1 – концентрация CH_4 (ppb) в приземных слоях атмосферы (900 гПа); 2 – средние значения концентраций CH_4 по профилю; 3 – концентрация CO_2 (ppb) в приземных слоях атмосферы (900 гПа); 4 – средние значения концентраций CO_2 по профилю; 5 – сейсмическое событие

исследования ее особенностей на примере Южно-Сахалинского грязевого вулкана и Пугачевской группы грязевых вулканов [10].

Глубинные сдвиги являются подводящими каналами как для флюидов из осадочных бассейнов (углеводороды), так и для мантийных флюидов (гелий, водород, углекислый газ). Поток газов из осадочных бассейнов может усиливаться во время сейсмической активности вследствие возникновения обширных проницаемых зон и открытия новых флюидопроводящих каналов.

Результаты проведенных исследований позволяют нам утверждать, что землетрясения влияют также на дебит свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана [10, 40] (рис. 11).

Мониторинговые наблюдения были выполнены в условиях сейсмической активизации на юге

о. Сахалин – Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. Магнитуда землетрясения составила $M_w = 6.2$, эпицентрального расстояние до Южно-Сахалинского вулкана – около 65 км. Во время землетрясения 2.08.2007 г. (произошел скачок концентраций основных газов во всех апробированных грифонах (см. рис. 12, F (синий); G (зеленый); H (красный) [10]:

– CO_2 – концентрация уменьшилась на 31% и составила ~69%;

– CH_4 – концентрация увеличилась на 71.9% и составила ~28.1%.

Так же было выявлено, что в пределах одного часа после землетрясения суммарная концентрация углеводородных газов существенно возрастает, средний показатель роста концентрации газов составил 70% [47].

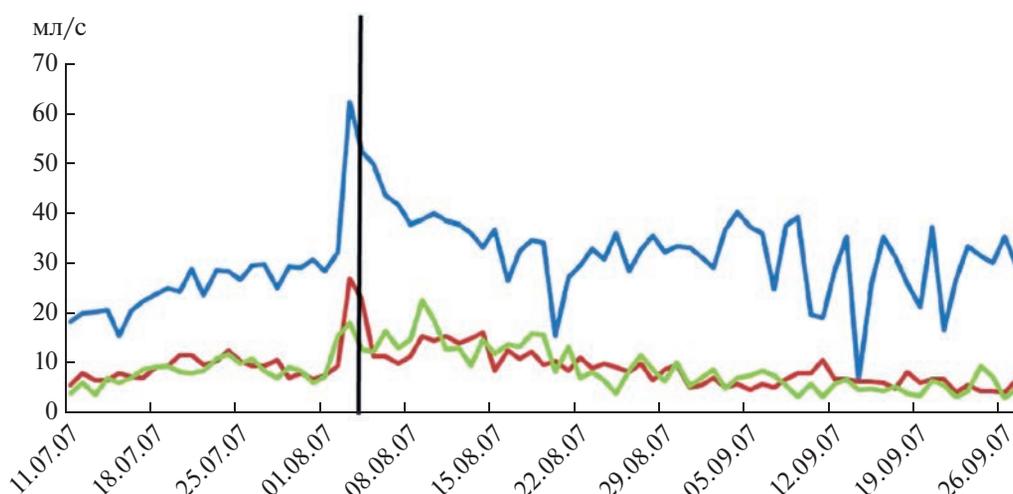


Рис. 11. Дебит свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана в период наблюдений 2007 г. [10].
Графики для грифонов: F (синий); G (зеленый); H (красный).
Указатель даты Невельского землетрясения 2.08.2007 г. (вертикальная линия черным).

По результатам проведенного анализа выявлена сложная связь глубинных потоков газов, в том числе — метана, с сейсмическими событиями.

ВЫВОДЫ

1. Впервые рассмотрены закономерности распределения газо-геохимических полей метана и углекислого газа на о. Сахалин в сравнении с результатами дистанционного зондирования.

2. Сахалинский сегмент Хоккайдо—Сахалинской складчатой системы обладает углеводородно-углекислотной изотопно-газо-геохимической зональностью, определяемой размещением очагов гетерогенных газов и газовых потоков, что подтверждается спутниковыми данными.

3. На основе наблюдения посредством трех сканеров спутниковой системы мониторинга AIRS, TROPOMI, IASI района Южно-Сахалинского грязевого вулкана выявлен рост концентрации метана после сейсмоструктурного события (землетрясения), а также сохранение относительно стабильного показателя концентрации в течение последующих нескольких дней. Анализ данных со всех используемых сканеров подтвердил снижение концентрации газов при увеличении высоты рассматриваемого слоя атмосферы.

4. Исследования эмиссии газов на о. Сахалин и прилегающем шельфе имеют большое значение в рамках реализации проекта РФ “Дальневосточный морской карбоновый полигон”, объединяющий все дальневосточные моря и Восточную Арктику, также они актуальны в соответствии с приоритетами “Десятилетия наук об океане ООН в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.)”, рабочей группы ВЕСТПАК по комплексному

изучению газовых гидратов и потоков метана в Индо-Тихоокеанском регионе (CoSGas) и развития морских исследований стран БРИКС.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность научным сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, Россия) к.г.н. Р.В. Жаркову и к.г.-м.н. А.В. Дегтяреву за отбор проб и предоставление уникальных образцов газа и воды для последующего анализа. Авторы признательны анонимным рецензентам за полезные комментарии и редактору за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках гостемы АААА-А19-119122090009-2 “Исследование состояния и изменений природной среды на основе комплексного анализа и моделирования гидрометеорологических, биогеохимических, геологических процессов и ресурсов Дальнего Востока”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьев В.В.* Углекислые мышьяковистые Синегорские воды на Южном Сахалине // Геология. 1975. Т. XXXII. № 3. С. 143–149.
2. *Алиев Ад.А.* Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.
3. *Астахов А.С., Сергеев К.Ф., Мельников О.А. и др.* Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле–августе 2001 Г.) // ДАН. 2002. Т. 386. № 2. С. 223–228.
4. *Басков Е.А., Суриков С.Н.* Гидротермы Земли. — Под ред. И. К. Зайцева — Л.: Недра, 1989. 243 с.

5. *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.
6. *Войтов Г.И.* О химических и изотопно-углеродных нестабильностях грифонных газов грязевых вулканов (на примере Южно-Каспийской и Таманской грязевулканических провинций) // Геохимия. 2001. № 4. С. 422–433.
7. Геология СССР. – Т. XXXIII. – Остров Сахалин – Под. ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1970. С. 355–367.
8. *Гранник В.М.* Сопоставление структурных элементов Сахалина и Хоккайдо // ДАН. 2005. Т. 400. № 5. С. 654–659.
9. *Гранник В.М.* Восточно-Сахалинская островодужная система охотоморского региона // Литосфера. 2013. № 1. С. 36–51.
10. *Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И.* Изотопно-геохимические характеристики свободных газов южно-сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // ДАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 256–261.
11. *Ершов В.В.* К вопросу об изменчивости химического состава сопочных вод (на примере Южно-Сахалинского грязевого вулкана) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 80–88.
12. *Жарков Р.В.* Физико-химические свойства термальных вод Луньских источников (остров Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 2. С. 249–255. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.249-255>
13. *Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Веселов О.В., Ершов В.В., Сырбу Н.С., Никитенко О.А.* Амурские термальные источники (остров Сахалин) // Успехи современного естествознания. 2018. № 11 (Ч.2). С. 317–322. <https://doi.org/10.17513/use.36946>
14. *Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Ершов В.В., Сырбу Н.С., Никитенко О.А., Устюгов Г.В.* Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 4. С. 428–437. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437>
15. *Зеленов К.К.* Вулканы как источник рудообразующих компонентов осадочных толщ. – Под ред. К.Н. Рудича – М.: Наука, 1972. 215 с.
16. *Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. – Под ред. С.Н. Набоко – М.: Наука, 1988. 183 с.
17. *Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г.* Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.
18. *Ломтев В.Л., Жердева О.А.* К сеймотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. Т. 41. № 3. С. 56–58.
19. *Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се.* О динамике грифонной деятельности газоводолитокластитовых (грязевых) вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 25–41.
20. *Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 10. С. 3–13.
21. *Полоник Н.С., Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И.* Изучение состава углеводородных компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 1. С. 79. <https://doi.org/10.7868/S0869565215130216>
22. *Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийн В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И.* Геотраверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2005. № 5. С. 45–58.
23. *Родников А.Г., Забаринская Л.П., Сергеева Н.А.* Глубинное строение сейсмоопасных регионов Земли (о. Сахалин) // Вестн. ОНЗ РАН. 2014. Т. 6. NZ1001. <https://doi.org/10.2205/2014NZ000121> (<https://onznews.wdcb.ru/publications/publ14.html>)
24. *Рождественский В.С.* Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин // Геотектоника. 1982. № 4. С. 99–111.
25. *Собисевич А.Л., Лаверова Н.И., Собисевич Л.Е. и др.* Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. – Под ред. Н.П. Лаверова – М.: ИФЗ РАН, 2005. 225 с.
26. *Соколов В.А.* Геохимия природных газов. – М.: Недра, 1971. С. 293–320.
27. *Харахинов В.В.* Нефтегазовая геология Сахалинского региона. – М.: Научный мир, 2010. 276 с.
28. *Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Бушкарева К.Ю., Лаврушин В.Ю., Жарков Р.В., Челнокова Б.И., Карабцов А.А.* Геохимия минеральных вод и гидрогенных отложений Антоновского сероводородного минерального источника (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 6. С. 98–113. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-6-98-113>
29. *Шакиров Р.Б.* Газогеохимические поля окраинных морей восточной Азии. – Под ред. А.И. Обжирова – М.: ГЕОС, 2018. 314 с.
30. AIRS/AMSU/HSB Version 7 Level 2 Product User Guide. https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/AIRS/V7_L2_Product_User_Guide.pdf (Accessed 10.05.2022).
31. Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS), <https://airs.jpl.nasa.gov/> (Accessed date 10.05.2022)
32. *Baranov B.V., R. Werner K.A., Hoernle et al.* Evidence for compressionally induced high subsidence rates in the Kurile Basin (Okhotsk Sea) // Tectonophysics. 2002. Vol. 350. No. 1. P. 63–97. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00081-1)
33. *Chelnokov G., Zharkov R., Bragin I.* Radon monitoring in groundwater and soil gas of Sakhalin Island // J. Geosci. Environ. Protect. 2015. Vol. 3. P. 48–53. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.35006>
34. *Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A.* Geochemistry of mineral waters and associated gases of the Sakhalin Island (Far East of Russia) // J. Hydrol. 2018.

- Vol. 559. P. 942–953.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.049>
35. *Chudaeva V.A., Chudaev O.V.* Accumulation and fractionation of rare earth elements in surface waters of the Russian Far East under the conditions of natural and anthropogenic anomalies // *Geochem. Int.* 2011. Vol. 49. No. 5. P. 498–524.
 36. *Clayton J.L., Koncz I.* “Geochemistry of natural gas and carbon dioxide in the Békés basin: Implications for exploration,” In: *Basin Analysis in Petroleum Exploration*, Ed. by P.G. Teleki, R.E. Mattick, J. Kókai, (Springer, Dordrecht, Berlin, Germany.1994). P. 187–199.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-0954-3_9
 37. <https://earthquake.usgs.gov> (Accessed September 2022).
 38. *Environmental Protection Agency (EPA)*, “*Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources*,” – (Environ. Protect. Agency Office Atmosph. Progr., Washington, DC, USA. 2010), pp.194.
 39. *Etiopie G., Lassey K. R., Klusman R., Boschi E.* Re-appraisal of the fossil methane budget and related emission from geologic sources // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. No. 9B. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1029/2008GL033623>
 40. *Ferretti D.F., Miller J.B., White J.W.C., Etheridge D.M., Lassey K.R., Lowe D.C., Meure C.M.M., Dreier M.F., Trudinger C.M., van Ommen T.D., Langenfelds R.L.* Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years // *Science*. 2005. Vol. 309. No. 5741. P. 1714–1717.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1115193>
 41. *Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston R.E., Lorenson T., Kvenvolden K.A.* Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea // *Geo-Marine Lett.* 1993. Vol. 13. P. 41–48.
<https://doi.org/10.1007/BF01204391>
 42. *Harder S.L., Shindell D.T., Schmidt G.A., Brook E.J.* A global climate model study of CH₄ emissions during the Holocene and glacial-interglacial transitions constrained by ice core data // *Global Biogeochem. Cycles*. 2007. Vol. 21. No. 1. GB1011.
<https://doi.org/10.1029/2005GB002680>
 43. *Houweling S., Kaminski T., Dentener F., Lelieveld J., Heimann M.* Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a Global transport model // *J. Geophys. Res.-Atmosph.* 1999. Vol. 104. No. 21D. P. 26 137–26 160.
<https://doi.org/10.1029/1999JD900428>
 44. Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), <https://www.eumetsat.int/iasi> (Accessed 12.05.2022).
 45. *Junyuan Xu, Zvi Ben-Avraham, Tom Kelty, Ho-Shing Yu.* Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions // *Earth-Sci. Rev.* 2014. 130. P. 154–196.
 46. *Kawagucci S., Ueno Y., Takai K., Toki T., Ito M., Inoue K., Makabe A., Yoshida N., Muramatsu Y., Takahata N., Sano Y., Narita T., Teranishi G., Obata H., Nakagawa S., Nunoura T., Gamo T.* Geochemical origin of hydrothermal fluid methane in sediment-associated fields and its relevance to the geographical distribution of whole hydrothermal circulation // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 339. P. 213–225.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.003>
 47. *Kholmogorov A.O., Syrbu N.S., Shakirov R.B.* Study of Methane Concentration Variability in the Surface Layer of the Sea of Japan in the Context of Seismic Events (Based on the Results of Expedition Studies in 2017–2018) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. Vol. 13. Is. 3, 0642.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0642>
 48. *Kim Y., Lee S., Jin Y.K., Baranov B.V., Obzhirov A.I., Salomatin A.S., Shoji H.* The stability of gas hydrate field in the northeastern continental slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk, as inferred from analysis of heat flow data and its implications for slope failures // *Marin. Petrol. Geol.* 2013. Vol. 45. P. 198–207.
<https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2013.05.003>
 49. *Kopf A.* Significance of Mud Volcanism // *Rev. Geophys.* 2002. Vol. 40. № 2. P. 1005. doi: https://www.researchgate.net/publication/253455174_Significance_of_Mud_Volcanism
<https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
 50. *Lassey K.R., Etheridge D.M., Lowe D.C., Smith A.M., Ferretti D.F.* Centennial evolution of the atmospheric methane budget: What do the carbon isotopes tell us? // *Atmosph. Chem. Phys.* 2006. Vol. 7. No. 8. P. 2119–2139.
<https://doi.org/10.5194/acp-7-2119-2007>
 51. *Lassey K.R., Lowe D.C., Smith A.M.* The atmospheric cycling of radio-methane and the “fossil fraction” of the methane source // *Atmosph. Chem. & Phys.* 2007. Vol. 7. No. 8. P. 2141–2149.
<https://doi.org/10.5194/acp-7-2141-2007>
 52. *Martinelli G., Dadomo A.* “Mud volcano monitoring and seismic events,” In: *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, Ed. by G. Martinelli, B. Panahi, (Springer, Netherlands. 2005), P. 187–199.
https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_17
 53. *Mau S., Rehder G., Arroyo I. G., Gossler J., Suess E.* Indications of a link between seismotectonics and CH₄ release from seeps off Costa Rica // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2007. Vol. 8. Q04003.
<https://doi.org/10.1029/2006GC001326>
 54. *Minami H., Tatsumi K., Hachikubo A., Yamashita S., Sakagami H., Takahashi N., Shoji H., Jin Y., Obzhirov A., Nikolaeva N., Derkachev A.* Possible variation in methane flux caused by gas hydrate formation on the northeastern continental slope off Sakhalin Island, Russia // *Geo-Marine Lett.* 2012. Vol. 32. No. 6. P. 525–534.
 55. *Miyakawa K., Tokiwa T., Murakami H.* The origin of muddy sand sediments associated with mud volcanism in the Horonobe area of northern Hokkaido, Japan // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. 1412. P. 4980–4988.
<https://doi.org/10.1002/2013GC004924>
 56. *Obzhirov A., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A.* Relations between methane venting, geological structure and seismotectonics in the Okhotsk Sea // *Geo-Marine Lett.* 2004. Vol. 24. No. 3. P. 135–139.
<https://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0>
 57. *Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project, 2013, R/V “Akademik M.A. Lavrentiev” Cruise 59.* – Ed.

- by S. Jin, H. Shoji, et al., (Kitami Inst. Technol., Hokkaido, Japan. 2014), pp. 129.
58. Polyak B.G., Prasolov E.M., Lavrushin V.Y., Cheshko A.L., Kamenskii I.L. He, Ar, Cand N isotopes in thermal springs of the Chukotka Peninsula: Geochemical evidence of the recent rifting in the Northeastern Asia // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 339. P. 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.08.026>
 59. Prasolov E.M., Tokarev I.V., Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Eltsova G.M. Helium and other noble gases in gas-hydrate sediments of the Håkon Mosby Mud Volcano // *Geo-Marine Lett.* 1999. Vol. 19. P. 84–88. <https://doi.org/10.1007/s003670050096>
 60. Reyes A. Petrology and mineral alteration in hydrothermal systems: From diagenesis to volcanic catastrophes. – Diss.Thesis, (Reykjavic, Iceland: United Nations Univ., 2000), 77 p. <https://raflhadan.is/handle/10802/23371>
 61. 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. No. 7. P. 752–760. <https://doi.org/10.1134/S0097807813070129>
 62. Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope // *Lithol. Miner. Resour.* 2016. Vol. 1. No. 51. P. 68–81
 63. Taran Y., Morán-Zenteno D., Inguaggiato S., Varley N., Luna-González L. Geochemistry of thermal springs and geodynamics of the convergent Mexican Pacific margin // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 339. P. 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.08.025>
 64. Toutain J., Baubron J. Gas geochemistry and seismotectonics: A review // *Tectonophysics.* 1999. Vol. 304(1). P. 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00295-9)
 65. TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI), <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms> (Accessed 11.05.2022).
 66. 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 // *Geochem. Journal.* 2010. Vol. 44. P. 461–476.
 67. 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>
 68. Yang T.F., Fu C.C., Walia V. et al. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: Multi-parameter automatic gas monitoring results // *Pure Appl. Geophys.* 2006. Vol. 163. No. 4. P. 693–709. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0040-3>

Comparative Analysis of Gas-Geochemical Data from Ground-Based and Satellite Observations of the Sakhalin Island and Its Shelf (Northeast Russia): Tectonic Consequences

N. S. Syrbu^{a,*}, A. O. Kholmogorov^a, I. E. Steepochkin^a, E. S. Khazanova^a

^a*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (POI FEB RAS), str. Baltiyskaya, bld. 43, 690041 Vladivostok, Russia*

^{*}*e-mail: syrbu@poi.dvo.ru*

The transitional zone of the marginal seas of the Asia–Pacific region is a significant object for geological research, the large deposits of hydrocarbons (oil, gas, gas condensate, gas hydrates) have been discovered in the regions of the transition zone. The article gives an interpretation of the main gas-geochemical and geological-tectonic regularities of the occurrence and distribution of methane and carbon dioxide fields of different types on the shelf of Sakhalin Island. A study of the gas-geochemical parameters of the emitted gases in the “continent–shelf” transit zone was carried out based on comparison of field studies and satellite observation data. The data of satellite observation of Sakhalin Island and its shelf are presented to identify the relationship between seismic events and changes in the level of methane concentration in the atmospheric air (in particular, on the example of the methane discharge regime of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano). Remote sensing data are compared with the results of the field studies, and an assessment is made of the potential using satellite observation methods for studying the gas geochemical composition of the methane and carbon dioxide field. The results obtained can make it possible to refine the assessment of the emission of climatically active gases, and also bring the significant incentive to the development of the Russian Federation project “Far Eastern Marine Carbon Monitoring Plots Consortium”.

Keywords: remote sensing, satellite observations, shelf, geology, seismotectonics, mud volcanoes, gas-geochemical fields, thermal springs, gas hydrates, methane, carbon dioxide, Sakhalin Island