



**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)**

**A.O. Kholmogorov** , **N.S. Syrbu** ✉, **R.B. Shakirov** 

Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Baltiyskaya St, Vladivostok 690041, Russia

**ABSTRACT.** A spatial distribution of methane dissolved in sea water is a critical but poorly understood factor in the context of seismic activity. Based on the results of the RV *AKADEMIK OPARIN* integrated geological-geophysical expedition (September 21 – October 31, 2017), this paper deals with the regularities of methane concentration variability in the surface layer of the Sea of Japan: the average growth and the average growth period were 70 % and 10 h, respectively, after each earthquake whereas a decrease in methane concentration in the sea water was 10–30 % 2–4 h before a seismic event. A decrease in methane concentration occurs irrespectively of the depth of an earthquake. The results obtained show good agreement with the published data and gaseous-geochemical monitoring materials, thus making it possible to associate seismic-related gaseous-geochemical regime not only with gas-saturated sediments but also with the water column of the Japan Basin (Sea of Japan).

**KEYWORDS:** methane; earthquake; Sea of Japan; transition zone; marginal seas

**FUNDING:** The expedition took place with the support of Council for the Hydrosphere of Earth of Federal Agency for Scientific Organizations, provided for the integrated geological-geophysical, gaseous-geochemical, hydrochemical and oceanographic studies in the northern Sea of Japan, on the northeastern slope of the Sakhalin Island (Sea of Okhotsk), and in the seismoactive zone of the Tatar Strait. The work was done as part of the state assignment AAAA-A19-119122090009-2 "Study of the Environmental State and Environmental Changes Based on the Integrated Analysis and Modeling of Hydrometeorological, Geochemical and Geological Processes and Resources of the World Ocean" (2020–2023 rr.) and supported in part by Grant of the President of the Russian Federation for Young Scientists MK-357.2021.1.5. The research contributes much to the implementation of the international project "Geosystems and Mineral Resources of the "Continent – Ocean" Transition Zone and Mid-Ocean" (GEOMIR) within the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030).

---

## RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Nadezhda S. Syrbu, [syrbu@poi.dvo.ru](mailto:syrbu@poi.dvo.ru)

Received: January 3, 2021

Revised: December 21, 2021

Accepted: January 11, 2022

**FOR CITATION:** Kholmogorov A.O., Syrbu N.S., Shakirov R.B., 2022. 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* 13 (3), 0642. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0642

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ В КОНТЕКСТЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 2017–2018 гг.)

А.О. Холмогоров, Н.С. Сырбу, Р.Б. Шакиров

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Пространственное распределение метана, растворенного в морской воде, во взаимосвязи с сейсмической активностью играет исключительно важную, но недостаточно исследованную роль. В работе на примере результатов комплексной геолого-геофизической экспедиции на НИС «Академик Опарин» (21 сентября – 31 октября 2017 г.) установлена закономерность изменчивости концентрации метана в поверхностном слое морской воды: после каждого землетрясения средний показатель роста составил 70 %, средний период роста 10 ч; падение уровня концентрации метана в морской воде достигало 10–30 % за 2–4 ч до сейсмического события. Снижение концентраций метана происходит независимо от глубины землетрясения. Полученные результаты согласуются с литературными данными, а также материалами газогеохимического мониторинга и позволяют обсуждать наличие сейсмозависимого газогеохимического режима не только газонасыщенных осадков, но и толщи вод Японского моря.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метан; землетрясение; Японское море; переходная зона; окраинные моря

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Экспедиция выполнена при поддержке Совета по гидросфере Земли ФАНО комплексных геолого-геофизических, газогеохимических, гидрохимических и океанографических исследований в северной части Японского моря, на северо-восточном склоне о-ва Сахалин (Охотское море) и в сейсмоактивной зоне Татарского пролива. Работа выполнена в рамках Гостемы АААА-А19-119122090009-2 «Исследование состояния и изменений природной среды на основе комплексного анализа и моделирования гидрометеорологических, геохимических, геологических процессов и ресурсов Мирового океана» (2020–2023 гг.) и при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-357.2021.1.5. Результаты исследований вносят важный вклад в реализацию международного проекта «Геосистемы и минеральные ресурсы зоны перехода «континент – океан» и открытого океана» (ГЕОМИР) в рамках Десятилетия ООН наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Окраинные моря Азиатско-Тихоокеанского региона в настоящее время являются первоочередными объектами геохимических исследований в аспекте прироста углеводородных ресурсов в будущем, а также характеризуются разнообразием типов дегазации литосферы (потoki метана, грязевые вулканы, газогидраты, углегазоносные месторождения, нефтегазовые залежи, геотермальные и гидротермальные системы). Несмотря на огромные достижения многолетних геолого-геофизических исследований, изучение особенностей распределения газогеохимических полей и потоков метана остается особо актуальным с точки зрения теоретических и прикладных задач и необходимо для решения ряда проблем в области геодинамики, сейсмотектоники, прогнозирования альтернативных залежей углеводородов и аутигенной минерализации, охраны окружающей среды и рационального природопользования. Особенности связи качественных и количественных характеристик газовых потоков с флуктуациями сейсмотектонических процессов важны для оценки безопасности населенных пунктов.

Для повышения эффективности прогнозных оценок сейсмических активизаций и их последствий в природной

среде необходимо использовать комплекс методов исследований – гидроакустические, сейсмические, магнитометрические, гравиметрические, газогеохимические и другие измерения. Газогеохимические исследования позволяют оценить закономерные изменения в геологической среде в период активизации сейсмических событий и использовать их как индикаторы прогноза землетрясений и вулканических извержений [Obzhirov, 2018].

Растворенный в воде метан часто используется в качестве индикатора при поиске источников углеводородов (нефтяные и угольные месторождения, месторождения газа и газогидратов). Также прослеживается повышение концентраций метана в поверхностных морских водах в зонах, наиболее близко расположенных к районам землетрясений [Mishukova, 2003].

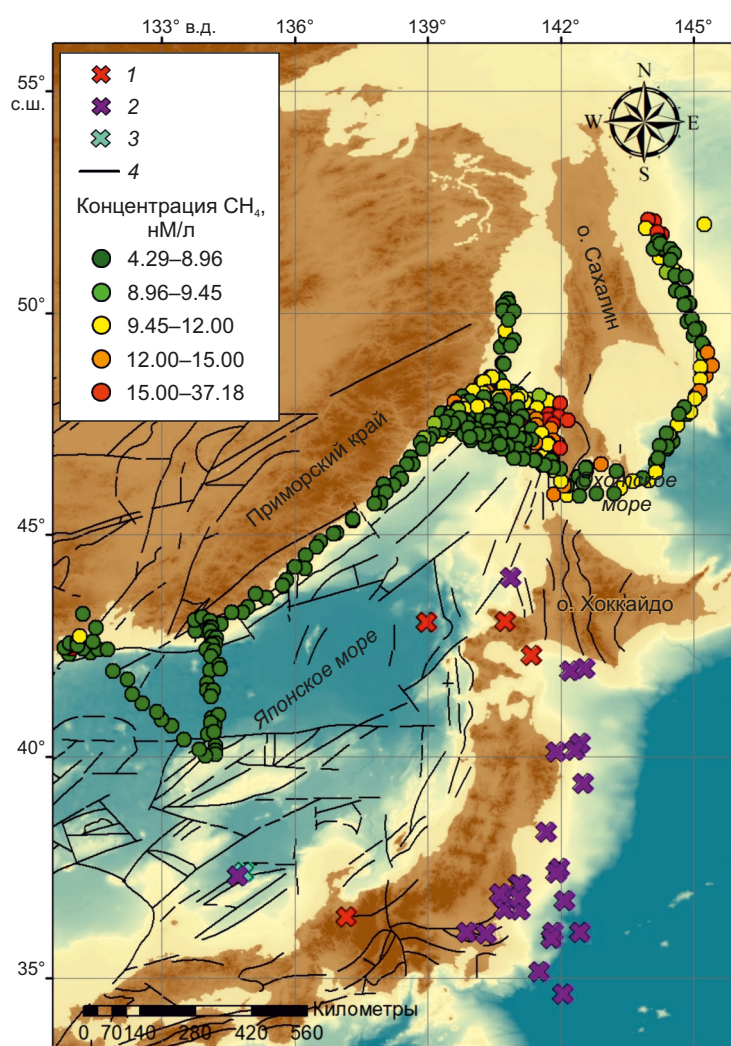
Цель работы: 1) рассмотреть закономерности изменения концентраций метана в морской воде во время сейсмических событий на примере результатов комплексной геолого-геофизической экспедиции на НИС «Академик Опарин» в период 21 сентября – 31 октября 2017 г. (54-й рейс); 2) обсудить возможную роль глубинных газогеохимических процессов в формировании газогеохимического режима Японского моря.

## 2. РАЙОН РАБОТ

Западно-Тихоокеанская зона перехода континент – океан включает в себя ряд окраинных морей, в том числе Японское море. Как показано исследователями [Rodnikov et al., 2014], в рамках концепции тектоники плит главным процессом, определяющим геодинамику Западно-Тихоокеанских окраинных морей, является субдукция Тихоокеанской литосферной плиты под Евразийский континент. В результате происходит миграция островных дуг в сторону Тихого океана и раскрытие задуговых окраинных бассейнов, в том числе за счет рифтогенеза и спрединга литосферы [Izosov et al., 2020].

Активные окраины являются районами современных интенсивных тектонических движений и вулкано-

гидротермальных процессов, которые ярко проявлены в Японском море. Регион исследования расположен в сейсмически активной зоне, а его строение во многом обусловлено особенностями взаимодействия четырех литосферных плит: Амурской, Охотской, Тихоокеанской и Филиппинской. Сейсмические исследования подтвердили распространение в Приморье и в Японском море структур, выделяемых при геологических наблюдениях: зон спрединга, рифтов, глубинных разломов, надвигов и зон субдукции, характеризующих активный тип континентальной окраины Дальнего Востока [Rodnikov et al., 2010]. Активность тектонических процессов континентальной окраины Дальнего Востока объясняется высоким уровнем залегания астеносферного слоя, содержащего магматические очаги,



**Рис. 1.** Схема Япономорского региона, пространственное распределение эпицентров землетрясений и точек отбора проб в ходе рейса 54 НИС «Академик Опарин», 2017 г.

1 – промежуточные землетрясения глубиной 70–300 км; 2 – поверхностные землетрясения глубиной до 70 км; 3 – глубокофокусные землетрясения глубиной более 300 км; 4 – основные разломы. Цветные кружки – концентрации метана в поверхностном слое морской воды (4 м).

**Fig. 1.** Scheme of the Japan Sea region, spatial distribution of earthquake epicenters and sampling points, cruise 54 of the RV AKADEMIK OPARIN, 2017.

1 – intermediate earthquakes 70–300 km deep; 2 – surface earthquakes up to 70 km deep; 3 – deep focus earthquakes below 300 km; 4 – schematic diagram of main faults. Colored circles – methane concentration in the surface water layer (4 m).

и развитием новых субдукционных процессов, приводящих к погружению плиты Японского моря под структуру о. Хонсю [Rodnikov et al., 2010].

Японское море разделяется подводной возвышенностью Ямато на Центральную (Японскую) котловину и котловину Ямато. Регион сочленения четырех литосферных плит определяет тектоническую активность, сейсмичность и вулканизм района исследований. Подавляющее большинство сильных мелко- и среднефокусных землетрясений происходит на восточной окраине Японского моря, и особенно на Японских островах (рис. 1), где Тихоокеанская плита погружается под Японскую островную дугу со скоростью от 2 до 8 см/год, образуя сейсмофокальную зону глубиной до 500 км. Плита Филиппинского моря погружается под Японские острова в районе газогидратоносного трога Нанкай со скоростью до 2 см/год [Rodnikov et al., 2010].

В Японском море исследования связи сейсмичности и концентраций газов в воде осложнены, в первую очередь, слабой активностью восходящей газовой эмиссии и низкой сейсмичностью большей части акватории. Тем не менее благодаря новым данным о газоносности различных районов этого моря выявление его перспектив может быть эффективным при учете сейсмичности районов.

В Японском море наиболее частые землетрясения в основном мелкофокусные и локализованы они главным образом в восточной части моря вдоль подводной окраины о. Хонсю. Остальная часть моря низкосейсмична, кроме юго-восточной подводной окраины Корейского полуострова [Lomtev, Tikhonov, 2013].

Тем не менее в пределах Японского моря происходят глубокофокусные сейсмические события, сосредоточенные с определенными особенностями в направлении от глубоководных желобов к континенту (рис. 1).

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспедиция на НИС «Академик Опарин» (рейс № 54) организована отделом геологии и геофизики Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН) при поддержке Совета по гидросфере Земли ФАНО для выполнения комплексных геолого-геофизических, газогеохимических, гидрохимических и океанографических исследований в северной части Японского моря, на северо-восточном склоне о-ва Сахалин (Охотское море) и в сейсмоактивной зоне Татарского пролива [Shakirov et al., 2019].

Экспедиция выполнялась в рамках выполнения государственного задания ТОИ ДВО РАН по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., раздел VIII «Науки о Земле». Руководитель экспедиции к.г.-м.н. Валитов М.Г.

На примере результатов 54-го рейса НИС «Академик Опарин» (ОР54) рассмотрена концентрация метана в приповерхностном слое морской воды (нМ/л). На основе полученных результатов обсуждается связь

сейсмической активности и поля концентраций метана в поверхностном слое толщи вод.

Для сравнительного анализа были взяты также результаты газогеохимических исследований ТОИ ДВО РАН в 81-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2018 г.), выполнявшихся в тех же районах [Valitov et al., 2019], и использованы материалы о землетрясениях (<https://earthquake.usgs.gov>), произошедших в период проведения рейса 29.09.–31.10.2017 г., в том числе в пределах разломов рассматриваемой акватории.

Отбор проб морской воды для определения концентрации метана с дискретностью 1–2 ч осуществлялся по ходу движения судна с помощью судового заборного проточного устройства на глубине 4 м от поверхности моря, вода затем поступала в термосолинограф SBE 21SEACAT (США) для непрерывного определения температуры и солености. Для выражения концентрации метана в морской воде используется объемная доля – нМ/л. В районах работ на галсах попутные исследования по измерениям метана выполнялись на постоянной скорости судна при одинаковой дискретности пробоотбора и регистрации сопроводительных параметров, что позволило получить представительные для обсуждения данные.

Для газохроматографического анализа воды использовался метод равновесных концентраций «HeadSpace». Анализ метана и углеводородных газов был выполнен на двухканальном газовом хроматографе «КристалЛюкс 4000М» с датчиками потока ионизации и теплопроводности, чувствительностью 10–5 %. При определении фоновых концентраций газов применялись методы, регламентированные действующими нормативными указаниями установления фоновых концентраций веществ (газов) и имеющимися методическими вероятностно-статистическими опубликованными источниками [Shakirov et al., 2016; Normative and Methodological Support..., 1995; Porotov, 1977; Smirnov, 1983].

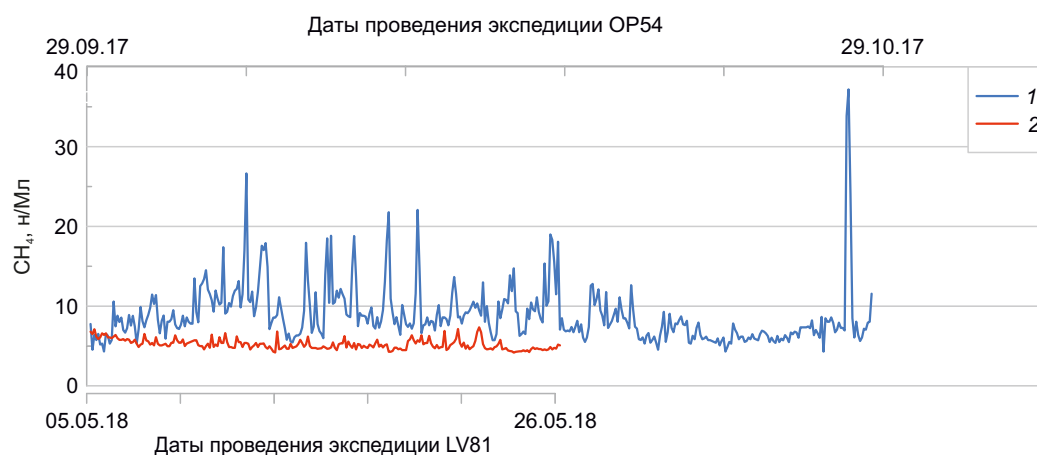
Лаборатория газогеохимии ТОИ ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта №41 к паспорту ПС 1.047–18.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период проведения экспедиционных наблюдений в 54-м рейсе НИС «Академик Опарин» в районе исследований зарегистрировано 33 землетрясения. В основном это мелкофокусные землетрясения с глубинами до 70 км, 4 события можно отнести к промежуточным с глубиной 100–300 км и 3 – к глубокофокусным с глубиной 358 км, 368 км и 374 км.

Для сравнения рассмотрены концентрации метана в пробах морской воды на границе вода – атмосфера (нМ/л) на акватории Японского моря в периоды экспедиций 2017–2018 гг. Концентрации метана в поверхностном слое морской воды на границе вода – атмосфера (нМ/л) были проанализированы и сопоставлены с проявлениями сейсмической активности.

Для сопоставительного анализа были взяты данные о землетрясениях, произошедших в периоды 05.05.–26.05.2018 г. и 29.09.–29.10.2017 г. (рис. 2), в том числе



**Рис. 2.** Диаграмма изменения концентраций метана в поверхностном слое морской воды во время рейсов № 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» LV81 и № 54 НИС «Академик Опарин» OP54. Красная линия – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды.

**Fig. 2.** Graph showing the change in concentration of methane during cruise 81 of the RV AKADEMIK M.A. LAVRENTYEV (LV81) and cruise 54 of the RV AKADEMIK OPARIN (OP54). Red line – methane concentration, nM/l, in the surface water layer.

**Таблица 1.** Показатели концентраций метана и сейсмической активности в ходе рейсов: № 54 НИС «Академик Опарин» (OP54) и № 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV81)

**Table 1.** Indicators for methane concentration and seismic activity obtained during the research cruises: № 54 RV AKADEMIK OPARIN (OP54) and № 81 RV AKADEMIK M.A. LAVRENTYEV (LV81)

| Год наблюдения, рейс | Средний показатель концентрации метана, нМ/л | Фоновые значения, нМ/л | Средняя магнитуда землетрясений, mb | Количество землетрясений |
|----------------------|--|------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 2017, OP54           | 8.9  | 8.74–9.00              | 4.5                                 | 33                       |
| 2018, LV81           | 5.2  | 5.17–5.23              | 4.7                                 | 17                       |

в пределах разломных зон. Также были рассчитаны фоновые значения концентраций метана (табл. 1).

При проведении работ в 2017 г. во время рейса 54 НИС «Академик Опарин» (OP54) зарегистрировано 33 землетрясения на глубине в основном до 70 км, 2 землетрясения – на глубине 100–200 км, 2 землетрясения – на глубине 200–300 км и 2 землетрясения глубиной 358 и 368 км; в 2018 г. во время рейса 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV81) зарегистрировано 17 землетрясений глубиной от 10 до 152 км, в том числе лишь 1 землетрясение с эпицентром глубже 100 км.

Определенной закономерности в изменчивости параметров сейсмической активности в рамках данного конкретного региона в рассмотренные периоды наблюдений не выявлено.

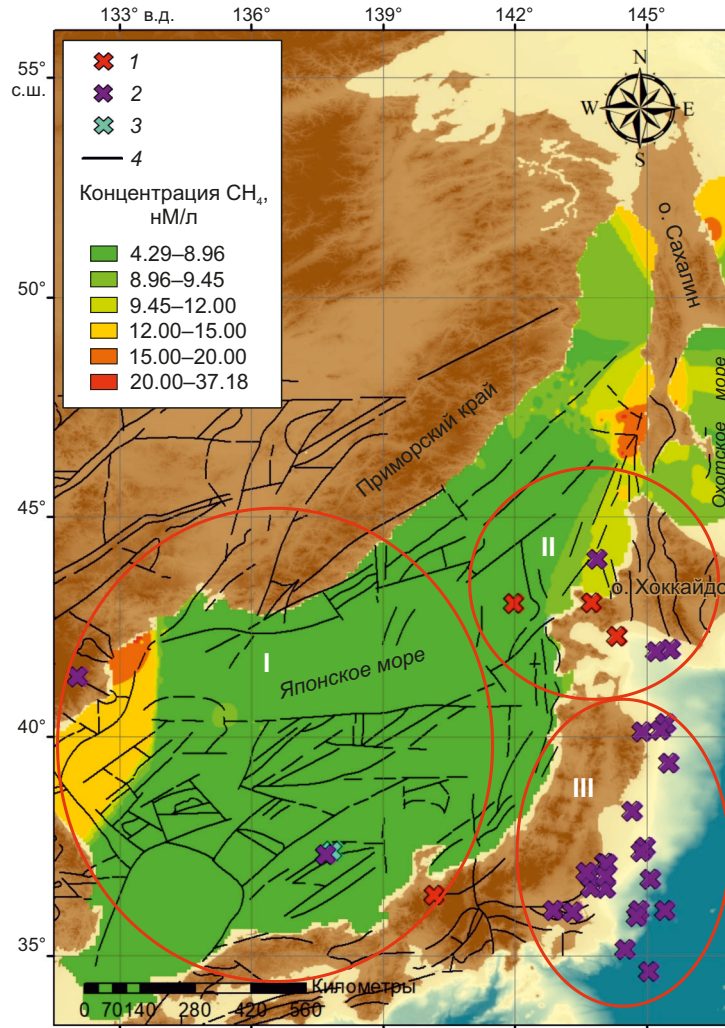
Примечательно то, что в разные периоды в одном и том же регионе при различной сейсмической обстановке (количество землетрясений отличается в два раза) и при практически одинаковой средней магнитуде синхронно с ростом количества сейсмических событий наблюдается рост среднего показателя концентрации метана в 1.7 раза. Показатели фонового значения для каждого периода исследования также отличаются. Был рассчитан фон концентраций метана по результатам четырех рейсов (54-й рейс НИС «Академик Опарин» (2017 г.), 81-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев»

(2018 г.), 61 и 62-й рейсы НИС «Академик Опарин» (2020 г.)). По результатам расчетов (генеральная выборка 925 проб) фоновые показатели метана составили 8.96–9.45 нМ/л.

В результате сравнения с сейсмичностью акватории обнаруживается практически линейная зависимость показателя концентрации метана от сейсмической активности. Так, при рассмотрении карты сейсмической активности (в периоды проведения экспедиций) можно выделить три основных района землетрясений: район I – северная часть Японского моря, район II – юго-восточная часть, район III – юго-западная часть (рис. 3).

Основная масса землетрясений приходится на район II, во время экспедиции 81 на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» сейсмическая активность была зарегистрирована только в данном районе. В 2017 г. (для рейса 54 НИС «Академик Опарин») сейсмическая активность интенсивно проявляется и в районе I, что отразилось на повышении концентрации метана в поверхностном слое морской воды в районе Татарского пролива (рис. 3). Важно то, что именно в этом районе были обнаружены гидраты метана [Jin et al., 2013].

Как видно, северная часть района исследования характеризуется более высокими значениями концентрации метана, что связано, возможно, с близостью к



**Рис. 3.** Интерполяционная схема распределения концентрации метана в поверхностном слое морской воды во время рейса 54 НИС «Академик Опарин» (2017 г.).  
 I, II, III – основные районы землетрясений. 1 – промежуточные землетрясения с глубиной эпицентров 70–300 км; 2 – поверхностные землетрясения с глубиной эпицентров до 70 км; 3 – глубокофокусные землетрясения с глубиной эпицентров более 300 км; 4 – основные разломы.

**Fig. 3.** Interpolated scheme of methane distribution in the upper water layer during cruise 54 of the RV AKADEMIK OPARIN (OP54).  
 I, II, III – major areas of earthquakes. 1 – intermediate earthquakes 70–300 km deep; 2 – surface earthquakes up to 70 km deep; 3 – deep focus earthquakes below 300 km; 4 – schematic diagram of main faults.

району интенсивной сейсмической активности, которая влияет на дегазацию газогидратоносных и газоносных отложений.

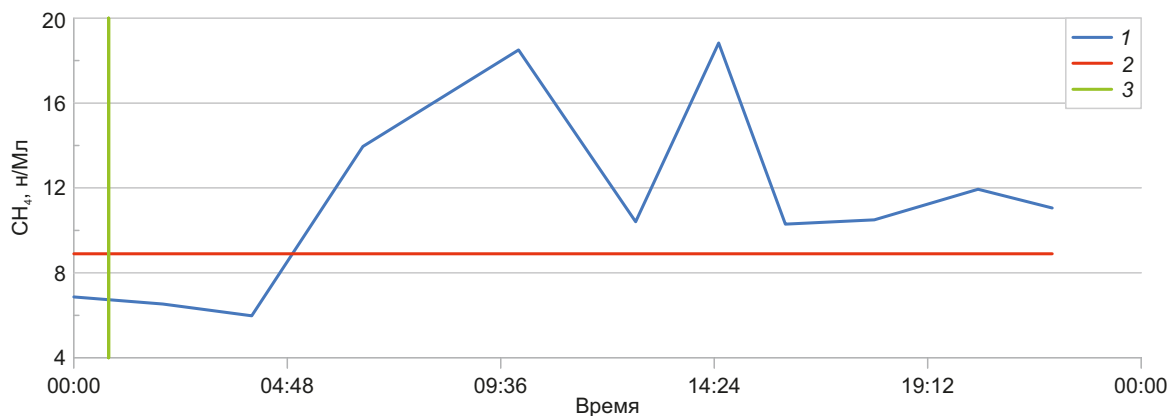
Рассмотрим несколько показательных случаев изменения концентрации метана в пробах морской воды на коротких профилях при прочих равных гидрометеороусловиях.

10 октября 2017 г. в пробе воды, взятой в 00:00, концентрация метана составляла 6.9 нМ/л, в 00:47 произошло землетрясение магнитудой 4.8 mb (магнитуда, определяемая по объемным волнам) на глубине 49 км. Концентрация метана в пробах, отбираемых каждые 2 ч, продолжала расти, в 10:00 10.10.17 достигла 18.5 нМ/л. До и после землетрясения и последующего роста концентрация метана стремится к фоновым значениям (рис. 4). На рис. 5 видно, что при повторном отборе проб

в тех же областях концентрация метана после землетрясения возросла.

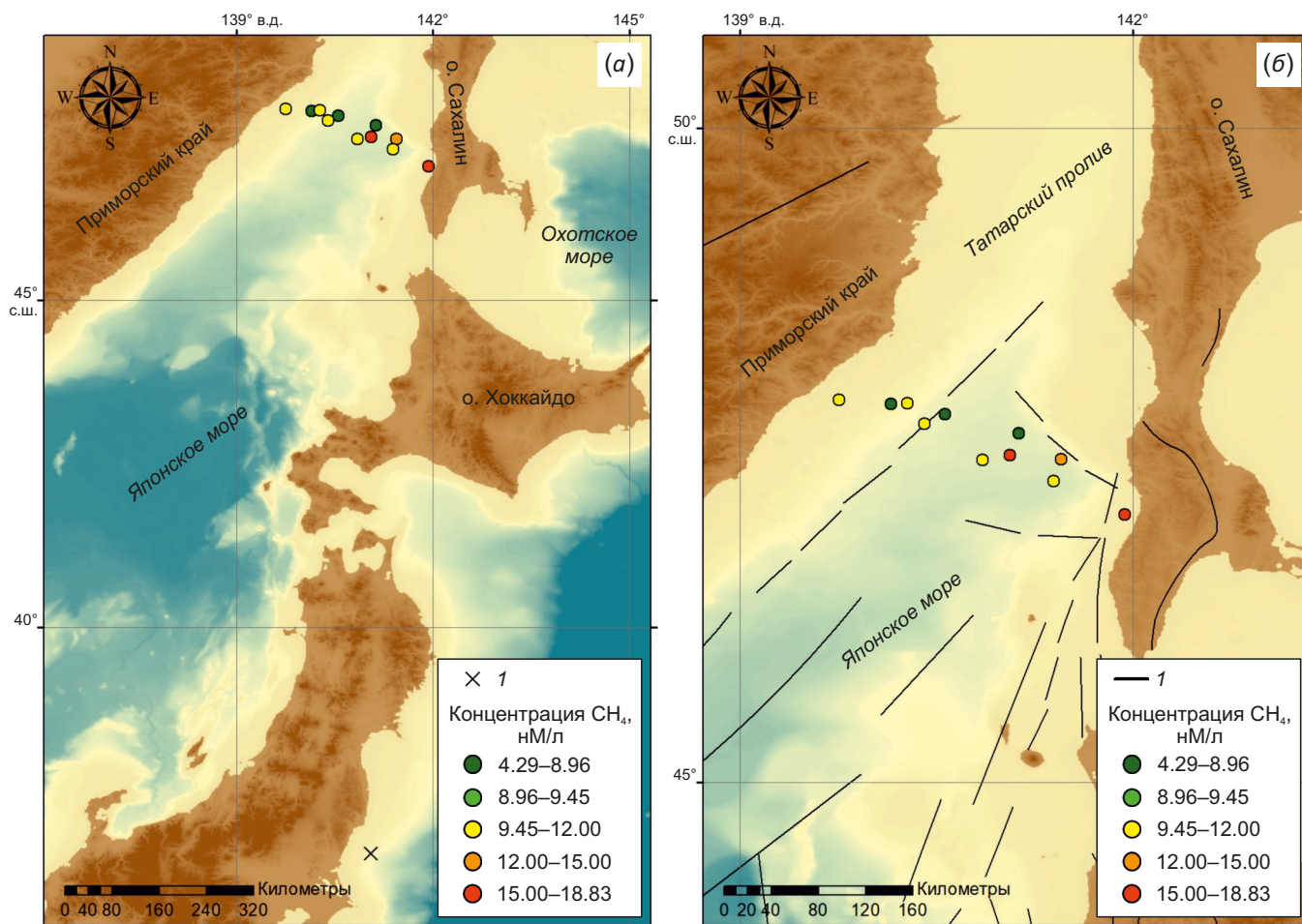
22 октября 2017 г. в пробе воды, взятой в 04:00, концентрация метана составляла 6.3 нМ/л, в 04:38 произошло землетрясение магнитудой 4.9 mb на глубине 10 км, концентрация в пробах, отбираемых каждые 2 ч, продолжала расти 3 ч и в 08:03 22.10.17 г. достигла 7.9 нМ/л, прирост составил 26 %, далее в этот день показатель концентрации не проявлял существенной изменчивости (рис. 6).

Вдоль континентального склона Приморского края не установлено высоких показателей концентрации метана в поверхностном слое морской воды (рис. 7), так как этот район находится на удалении от основных зон сейсмической активности рассматриваемого периода. Тем не менее после землетрясения концентрации



**Рис. 4.** Изменение концентраций метана до и после землетрясения 10.10.2017 г, в 00:47, глубина эпицентра 49 км. 1 – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды; 2 – фоновое значение метана, нМ/л; 3 – землетрясение.

**Fig. 4.** Changes in methane concentrations before and after the earthquake which occurred at 00:47 on October, 10, 2017 at a depth of 49 km. 1 – methane concentration, nM/l, in the surface water layer; 2 – background methane concentration, nM/l; 3 – earthquake.



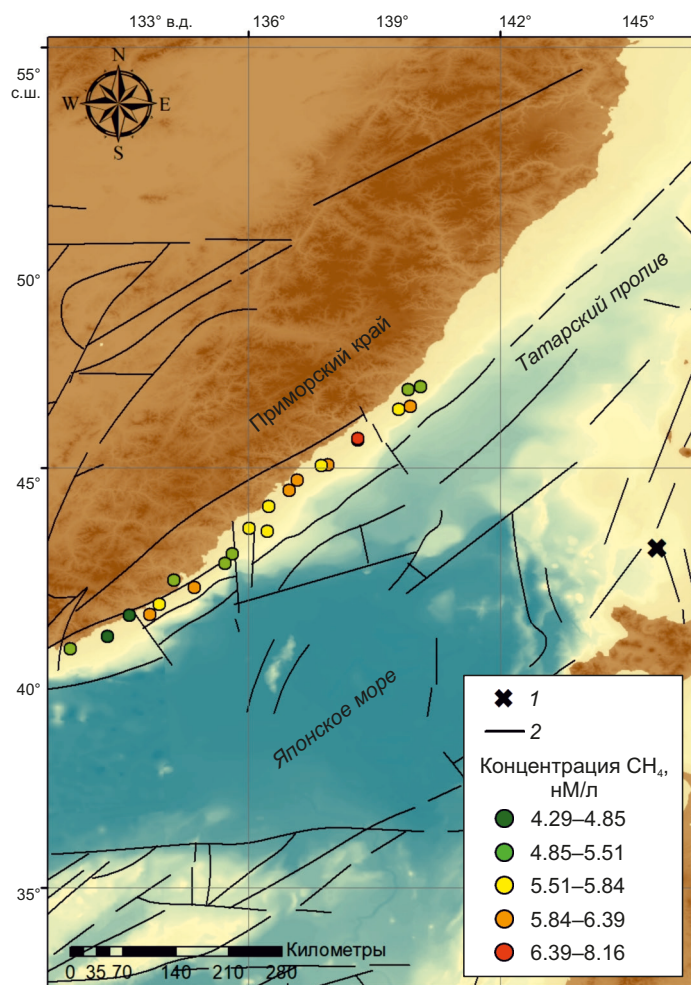
**Рис. 5.** Изменение концентраций метана до и после землетрясения 10.10.2017 г, в 00:47, глубина эпицентра 49 км. (а): 1 – землетрясение; (б): 1 – схематическая линия основных разломов [Izosov, Kononov, 2005].

**Fig. 5.** Changes in methane concentrations before and after the earthquake which occurred at 00:47 on October 10, 2017, at a depth of 49 km. (a): 1 – earthquake; (b): 1 – schematic diagram of main faults [Izosov, Kononov, 2005].



**Рис. 6.** Диаграмма изменения концентраций метана до и после землетрясения 22.10.2017 г, в 04:38, глубина эпицентра 10 км. 1 – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды; 2 – фоновое значение метана, нМ/л; 3 – землетрясение.

**Fig. 6.** Graph showing the changes in methane concentrations before and after the earthquake which occurred at 04:38 on October 10, 2017 at a depth of 10 km. 1 – methane concentration, nM/l, in the surface water layer; 2 – background methane concentration, nM/l; 3 – earthquake.



**Рис. 7.** Изменение концентраций метана до и после землетрясения 22.10.2017 г, в 04:38, глубина эпицентра 10 км. 1 – землетрясение; 2 – схематическая линия основных разломов [Izosov, Konovalov, 2005].

**Fig. 7.** Changes in methane concentrations before and after the earthquake which occurred at 04:38, on October 22, 2017 at a depth of 10 km. 1 – earthquake; 2 – schematic diagram of main faults [Izosov, Konovalov, 2005].



метана повысились, а затем вернулись к прежним значениям.

Подобная картина наблюдается после каждого землетрясения: средний показатель повышения концентраций метана составил 70 % при среднем периоде роста 10 ч.

04 октября 2017 г. в 15:32 произошло землетрясение магнитудой 4.2 mb на глубине 374 км. Показатель концентрации метана (14:00–12.5 нМ/л) показал плавный рост (до 14.5 нМ/л в 20:00), затем плавное снижение (до 10.4 нМ/л в 09:24 05.10.2017), но в 10:10 05.10.2017 зафиксирован резкий рост концентрации метана – до 17.4 нМ/л в 10:10, а прирост составил 58 % (17 ч после землетрясения). Далее отмечен резкий спад – до 9.1 нМ/л. (рис. 8). При повторном отборе проб также были установлены повышенные концентрации метана после землетрясения (рис. 9).

13 октября 2017 г., 14:47, 4.5 mb, 358 км – наблюдался рост показателя концентрации метана на 58.65 % за 1 ч 13 мин после землетрясения, затем концентрация пульсировала в пределах 10 %, но сохраняла свои показатели (18:00 – 8.9 нМ/л, 22:00 – 7.4 нМ/л, 04:00 14.10.2017 – 7.8 нМ/л), а в 08:00 14.10.2017 отмечен резкий рост – 244.96 % – 22.1 нМ/л, далее такой же резкий спад – до 6.606 нМ/л и пульсирующее сохранение показателя на данном уровне (рис. 10).

Исследования в Татарском проливе 13–14 октября 2017 г. не выявили повышения концентрации метана до момента землетрясения (рис. 11).

События 4–5 и 13–14 октября 2017 г. имеют общие черты: концентрация метана реагирует на глубокофокусные землетрясения значительно, но несколько отдаленно во времени.

На рис. 5, 9 и 11 показаны изменения концентрации метана в Татарском проливе. Каких-либо постоянных пространственных аномалий не зарегистрировано – показатели стремятся к фоновым значениям, но после землетрясений проявляют временную изменчивость, в целом наблюдается тренд к повышению.

Исследования концентраций метана в поверхностном слое морской воды (рейс 54 НИС «Академик Опарин») в период до и после землетрясения показали, что концентрации растут в течение 1–30 ч после сейсмических событий.

На примерах землетрясений во время рейса 54 НИС «Академик Опарин» видно падение уровня концентрации метана на 10–30 % за 2–4 ч до события (рис. 12). Подобная картина наблюдается перед каждым землетрясением, произошедшим в рассматриваемый период, причем уровень концентрации метана снижается независимо от глубины землетрясения.

В дальневосточном регионе (шельф и склон о. Сахалин) в результате многолетних наблюдений установлено, что увеличение количества выходов метана и его концентраций в водной толще взаимосвязано с ростом межгодовой динамики коровой сейсмичности Сахалина [Kulinich et al., 2007; Obzhirov et al., 2004] (наблюдения 1985–2002 гг.).

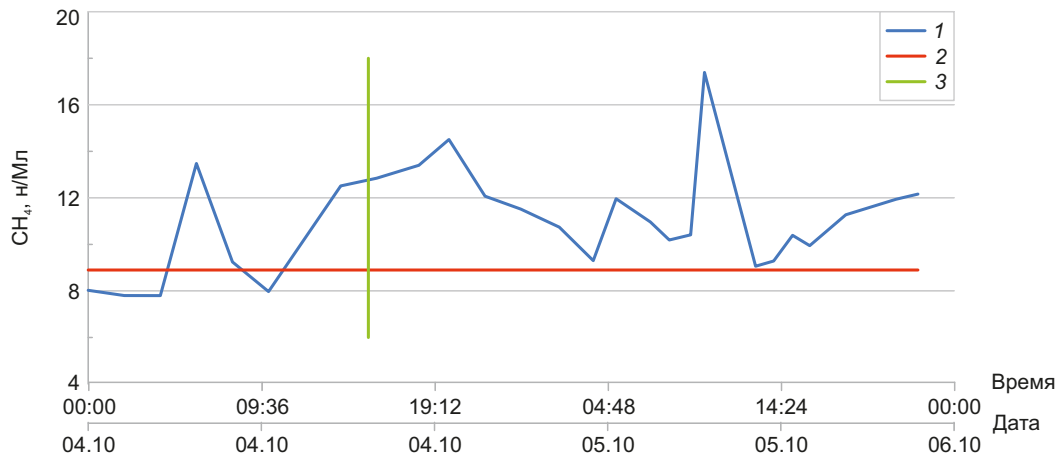
Основной причиной увеличения количества выходов метана в воде восточного склона и шельфа Сахалина Охотского моря считается активизация сейсмостектонических процессов в этом регионе. Это связывают с увеличением теплового потока в зонах разломов, уменьшением давления, что приводит к разрушению газогидратов и образованию больших количеств метана, который в виде пузырей поступает из недр в воду и атмосферу. Кроме того, при активизации зон разломов происходит более интенсивная миграция газа (метан) из-под подошвы газогидратов и нефтегазовых залежей и (или) нефтегазоносных пород к поверхности [Shakirov, 2018]. В этой же работе установлено, что в пределах евроазиатской зоны перехода континент – океан в окраинных морях существует особенный газогеохимический режим, который в том числе контролируется сейсмостектонической обстановкой [Shakirov, 2018].

Установлено, что качественные и количественные параметры газогеохимических полей закономерно изменяются под влиянием сейсмических событий [Shakirov, 2018]: землетрясения изменяют соотношения природных газов до 20 % об. (варьируются содержания метана, углекислого газа, азота и углеводородных газов). Характер качественных вариаций зависит от видов источников природных газов. Современная сейсмостектоническая активность региона определяет распространение аномальных газогеохимических полей, формируемых потоками миграционных (микробных, термогенных, метаморфогенных, магматогенных) газов в региональном масштабе, при этом установлено четыре типа связи газогеохимических полей и сейсмостектоники. Значения регионального фонового поля углеводородных газов в поверхностных отложениях несущественно увеличиваются в ряду Японское, Охотское, Южно-Китайское и Восточно-Сибирское моря. Флуктуации фоновых концентраций газов также контролируются сейсмостектонической активностью [Shakirov, 2018].

В работе [Obzhirov et al., 2004] были рассмотрены изменения концентраций метана в воде, а также количество метановых факелов на северо-восточном шельфе и склоне о. Сахалин в их взаимосвязи с землетрясением в районе г. Нефтегорска (1995 г.). После данного землетрясения фоновые концентрации метана в придонном слое морской воды значительно повысились, а также возросло количество метановых факелов – акустических аномалий в толще воды, отражающих струйные истечения пузырей метана (рис. 13).

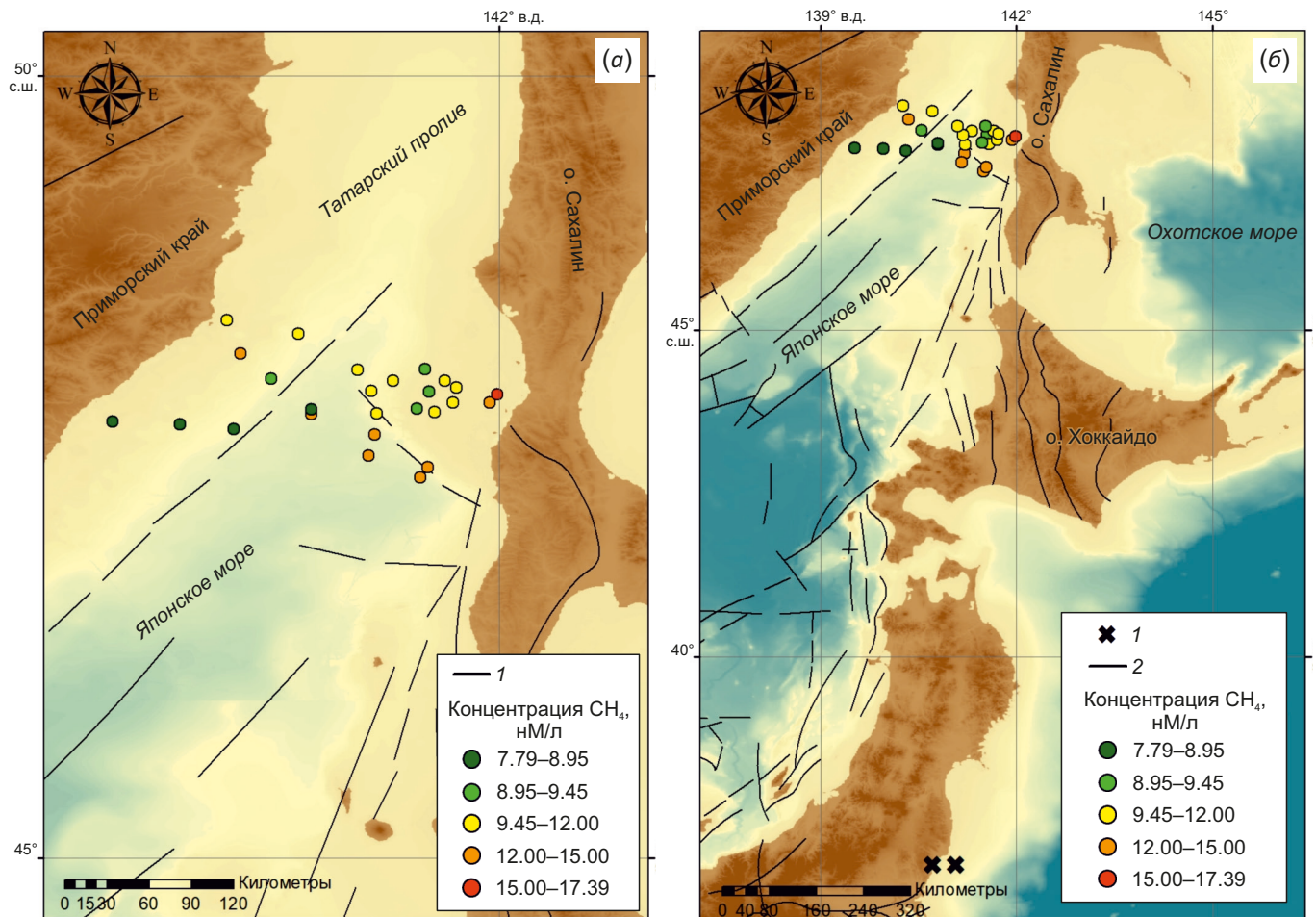
В период с 1998 по 2002 г. в данной области было обнаружено более 300 новых факелов, однако ранее (1984–1988 гг.) были обнаружены единичные факелы, а в 1991 г. – 11 факелов. В период исследований 1998–2002 гг. опорные районы наблюдений ежегодно повторялись в связи с задачей мониторинга метана и поисках газовых гидратов в рамках российско-германского проекта КОМЭКС (Курило-Охотский морской эксперимент).

В полевые сезоны 2005–2007 гг. Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск)



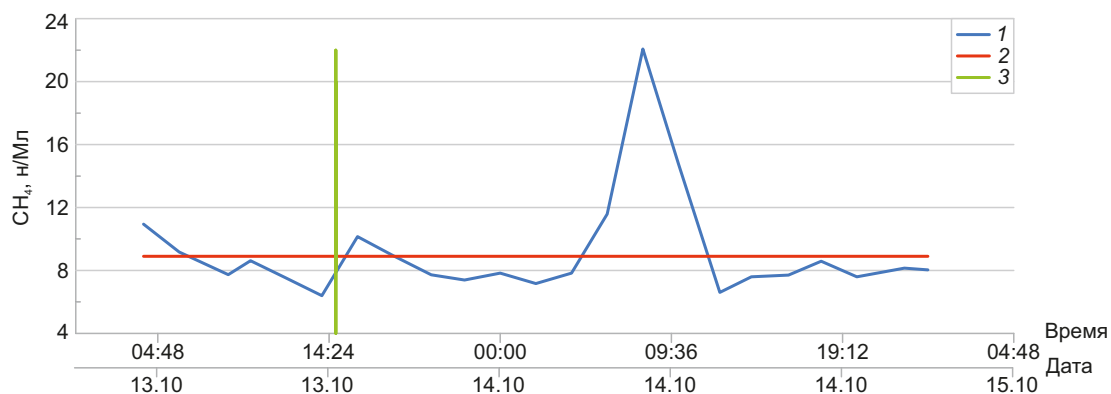
**Рис. 8.** Диаграмма изменения концентраций метана 4–5 октября до и после землетрясения 04.10.2017 г., в 15:32, глубина эпицентра 374 км. 1 – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды; 2 – фоновое значение концентраций метана, нМ/л; 3 – землетрясение.

**Fig. 8.** Graph showing the changes in methane concentrations on October 4–5, 2017 before and after the earthquake which occurred at 15:32 on October 4, 2017, at a depth of 374 km. 1 – methane concentration, nM/l, in the surface water layer; 2 – background methane concentration, nM/l; 3 – earthquake.



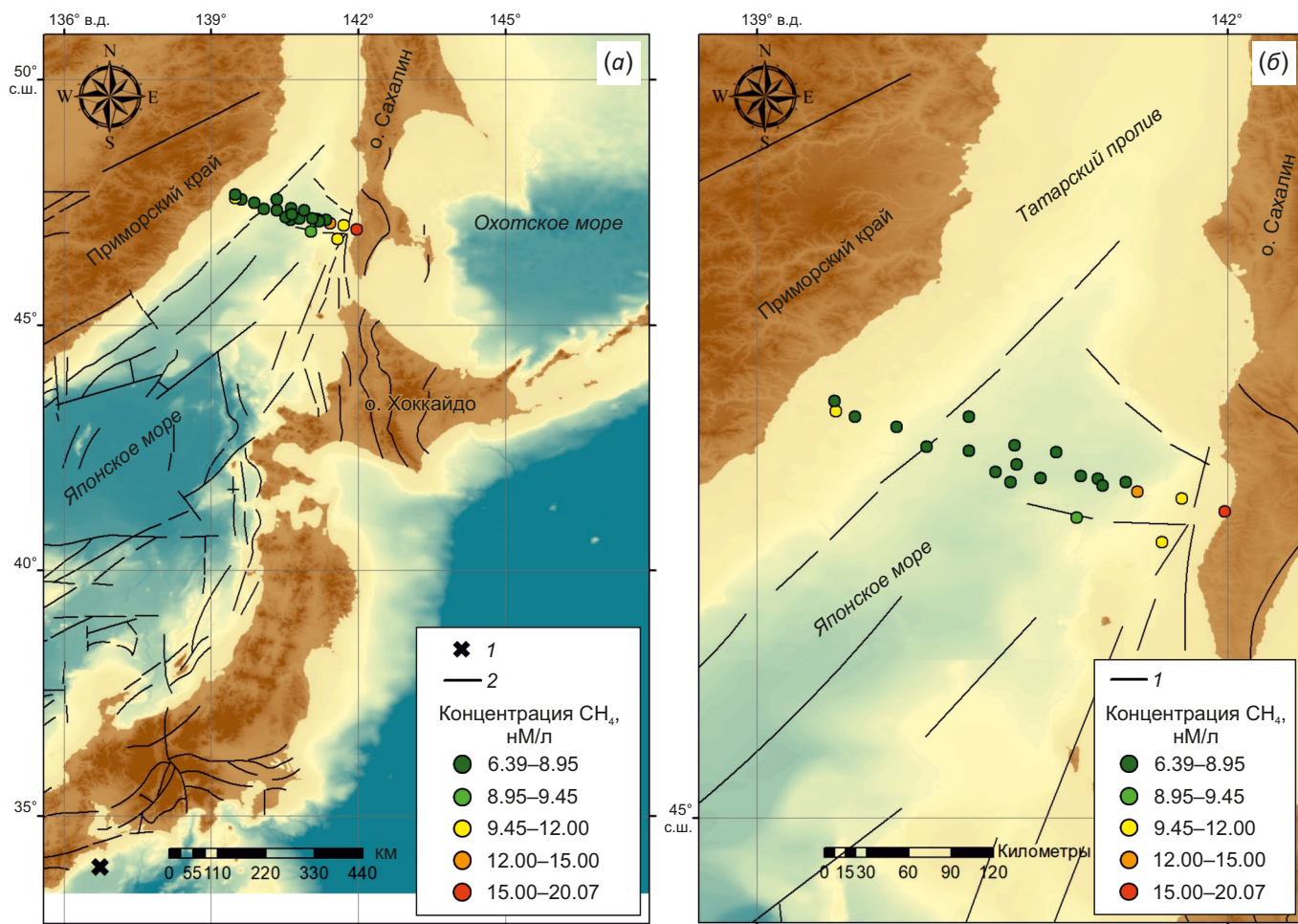
**Рис. 9.** Изменение концентраций метана 4–5 октября до и после землетрясения 04.10.2017 г., в 15:32, глубина эпицентра 374 км. (а): 1 – схематическая линия основных разломов; (б): 1 – землетрясение; 2 – схематическая линия основных разломов [Izosov, Kononov, 2005].

**Fig. 9.** Changes in methane concentrations on October 4–5, 2017 before and after the earthquake which occurred at 15:32 on October 4, 2017, at a depth of 374 km. (a): 1 – schematic diagram of main faults; (б): 1 – earthquake; 2 – schematic diagram of main faults [Izosov, Kononov, 2005].



**Рис. 10.** Диаграмма изменения концентраций метана 13.10.2017 г. и 14.10.2017 г. во время землетрясения в 14:47, глубина эпицентра 358 км. 1 – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды; 2 – фоновое значение концентраций метана; 3 – землетрясение.

**Fig. 10.** Graph showing the changes in methane concentrations on 13.10.2017 and 14.10.2017 during the earthquake which occurred at 14:47, at a depth of 358 km. 1 – methane concentration, nM/l, in the surface water layer; 2 – methane background concentrations; 3 – earthquake.

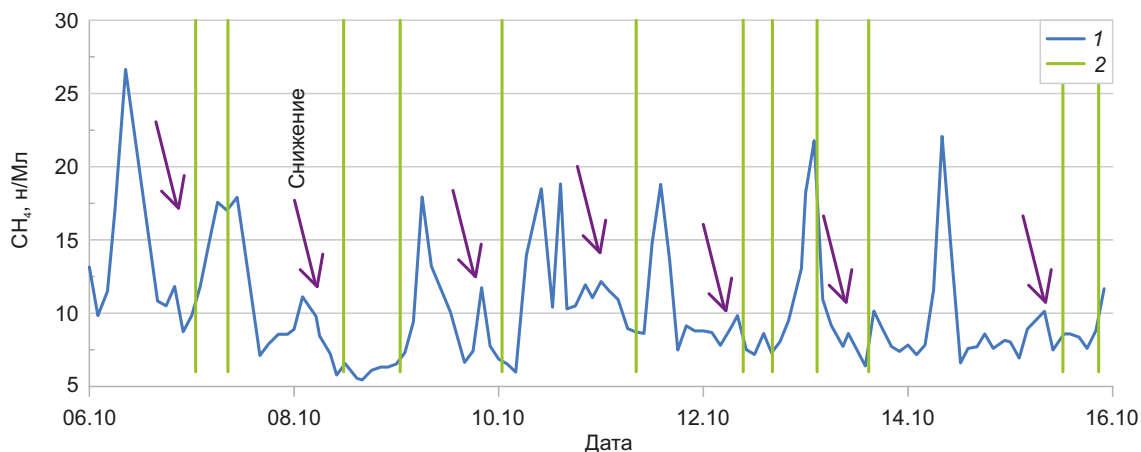


**Рис. 11.** Изменение концентраций метана 13.10–14.10.2017 г. до и после землетрясения 13.10.2017 г., в 14:47, глубина эпицентра 358 км.

(а): 1 – землетрясение; 2 – схематическая линия основных разломов [Izosov, Konovalov, 2005]; (б): 1 – схематическая линия основных разломов [Izosov, Konovalov, 2005].

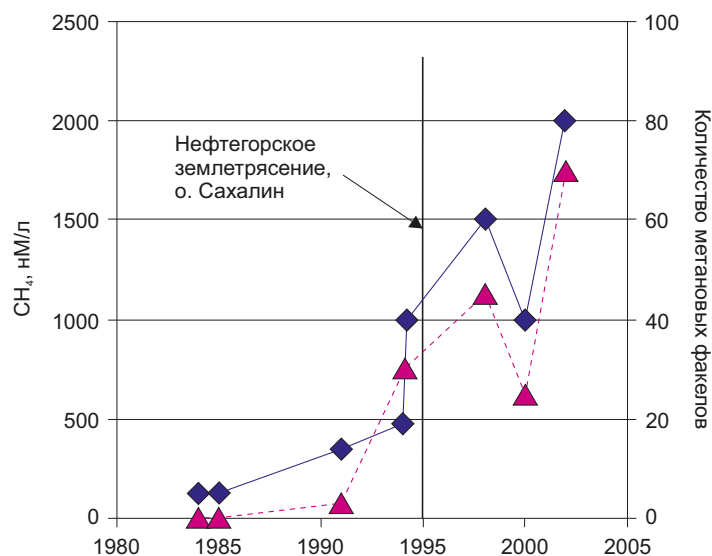
**Fig. 11.** Changes in methane concentrations on October 13–14, 2017 before and after the earthquake which occurred at 14:47 on October 13, 2017, at a depth of 358 km.

(а): 1 – earthquake; 2 – schematic diagram of main faults [Izosov, Konovalov, 2005]; (б): 1 – schematic diagram of main faults [Izosov, Konovalov, 2005].



**Рис. 12.** Диаграмма изменения концентраций метана до и после сейсмических событий 06.10–15.10.2017 г. 1 – концентрация метана, нМ/л, в поверхностном слое морской воды; 2 – землетрясение. Фиолетовые стрелки показывают снижение концентрации метана.

**Fig. 12.** Graph showing the changes in methane concentrations before and after the seismic events on October 6–15, 2017. 1 – methane concentration, nM/l, in the surface water layer; 2 – earthquake. Purple arrows show a decrease in methane concentration.



**Рис. 13.** Изменения концентраций метана в воде и количества метановых факелов на севере шельфа о. Сахалин и склоне Охотского моря во времени. Красные треугольники – количество факелов, синие квадраты – фоновые концентрации метана в придонном слое воды [Obzhirrov et al., 2004].

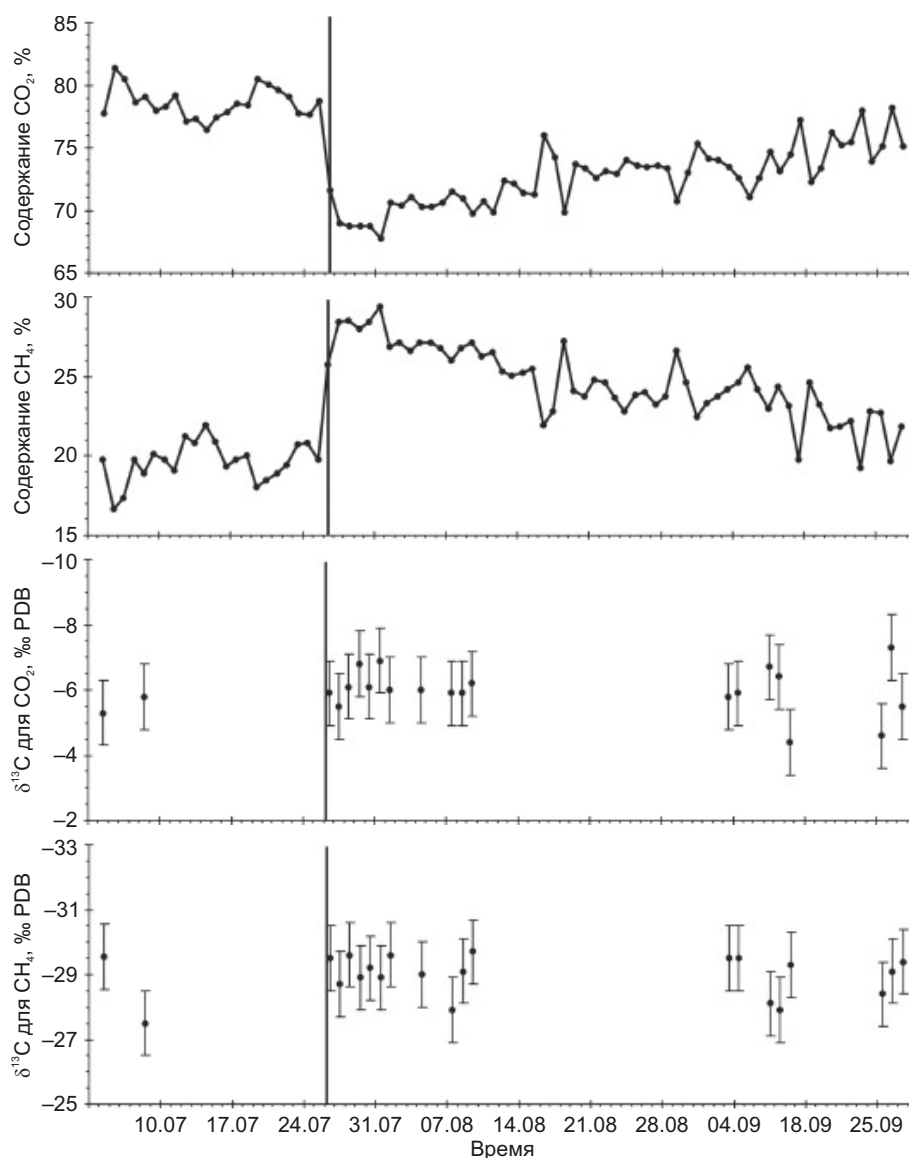
**Fig.13.** Temporal variations of methane concentrations in water and of the number of methane flares on the northern Sakhalin shelf and the Sea of Okhotsk slope. Red triangles are number of flares, blue squares are average methane concentrations in the bottom water [Obzhirrov et al., 2004].

были проведены комплексные наблюдения за дебитом газа, температурой и элементарным составом водогрязевой смеси в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

Явление понижения уровня концентраций метана до землетрясения и повышение его после сейсмического события подтверждается мониторинговыми исследованиями химического состава свободных газов на Южно-Сахалинском грязевом вулкане для трех грифонов (рис. 14). Наблюдения были выполнены в период сейсмической активизации на юге о. Сахалин, во время Невельского землетрясения 2 августа 2007 г.

(магнитуа землетрясения составила MW=6.2, эпицентральное расстояние до Южно-Сахалинского вулкана – около 65 км) [Ershov et al., 2011; Shakirov, 2018]. Выявлена тенденция к увеличению доли углеводородных газов и азота после землетрясения, а далее происходит постепенное возвращение (релаксация) к исходному химическому составу. Время восстановления прежнего химического состава газов составляет несколько месяцев [Ershov et al., 2011].

Авторы работы предполагают, что прохождение через грязевулканическую структуру сейсмических волн вызывает резкий перепад давления в газодогрязевой



**Рис. 14.** Диаграммы изменчивости химического и изотопного состава свободных газов в Южно-Сахалинском грязевом вулкане для периода наблюдений 2007 г. Вертикальная линия – дата Невельского землетрясения (02.08.2007 г.) [Ershov et al., 2010].

**Fig. 14.** Charts for variability of free gas chemical and isotopic compositions in Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano for the observation period 2007. Vertical line is the date of the Nevelsk earthquake (02.08.2007) [Ershov et al., 2010].

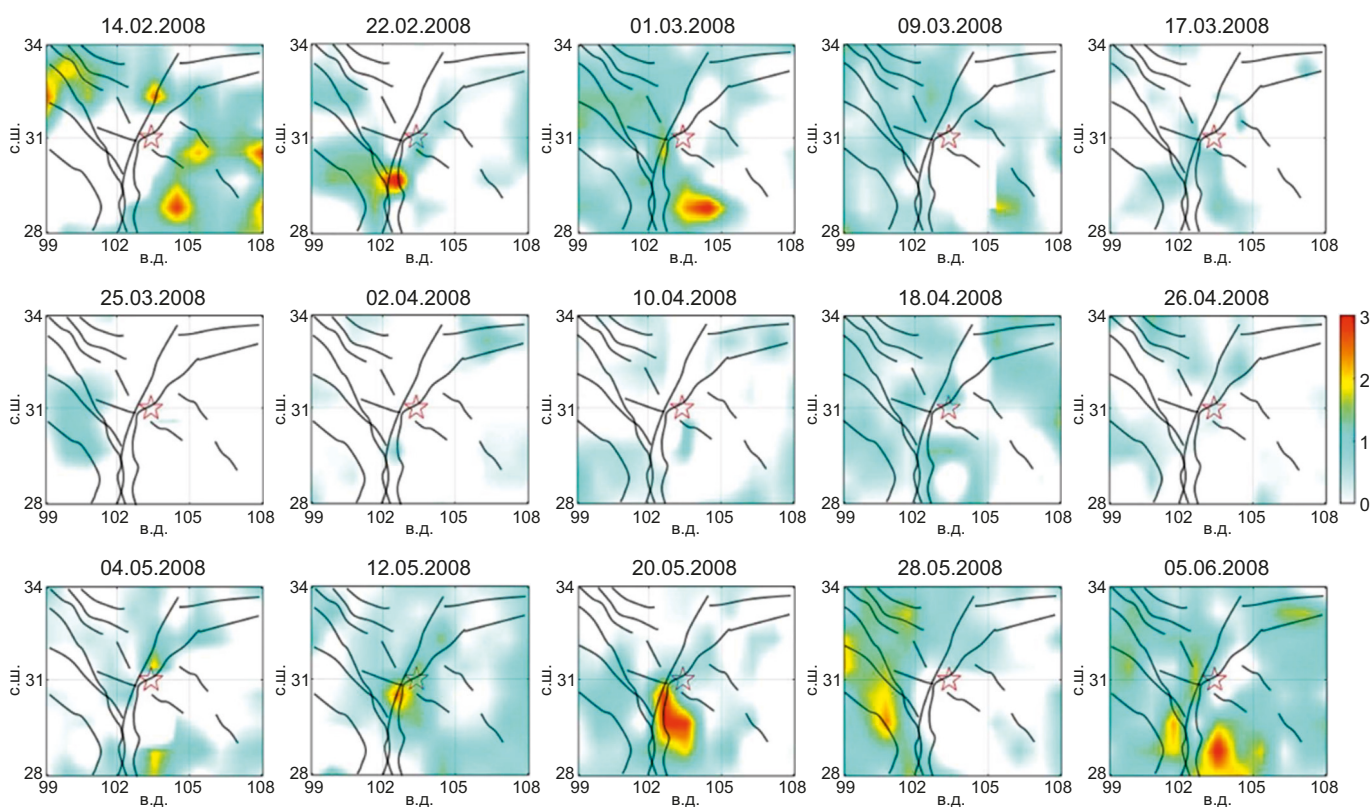
смеси, что способствует переходу части растворенного газа в свободную фазу. Это приводит к существенному увеличению дебита газа в грифонах грязевого вулкана после землетрясения [Ershov et al., 2010].

Можно предположить, что землетрясения с эпицентром, расположенным на значительной глубине, оказывают сильный эффект на концентрацию метана, достаточно затяжной во времени, приводя к устойчивому повышению концентраций.

Тенденция к повышению концентрации метана в пробах морской воды после землетрясений указывает на связь данных явлений. Возможно, после землетрясений флюидопроводящие каналы литосферы деформируются либо закупориваются, что приводит к накоплению поднимающихся газов в литосфере. Резкий

рост концентрации и такой же резкий спад с последующим сохранением уровня концентрации вызван интенсивным выбросом скопившихся газов через новые флюидопроводящие каналы, образованные избыточным давлением газов и флюидов. При этом явление афтершоков представляется следствием закупорки каналов, приводящей к образованию новой области скопления газов.

Известны результаты исследований влияния сейсмической активности на процесс естественной эманаии газов из донных осадков в водный слой и из почвенного слоя в атмосферу. В работе [Burov et al., 2017] на примере Японского моря представлены результаты натуральных наблюдений, которые позволяют сформулировать гипотезу о глубокофокусных землетрясениях



**Рис. 15.** Пространственное распределение восьмидневной аномалии  $\text{CH}_4$  с 14 февраля по 5 июня 2008 г., связанной с землетрясением Вэньчуань. Красная звездочка – эпицентры, черные линии – разломы [Meng, Zhang, 2021].

**Fig. 15.** February 14 to June 5, 2008 spatial distribution of eight-day nighttime  $\text{CH}_4$  anomaly related to the Wenchuan earthquake. The red star is the epicenter and the black lines are the faults [Meng, Zhang, 2021].

как механизме доставки газов (в частности метана) из глубинных слоев Земли к ее поверхности, на те горизонты в донных осадках морей и океанов, где уже возможно образование газовых (метановых) гидратов.

Ученые из Китая показали взаимосвязь между тепловыми и метановыми аномалиями, связанными с землетрясениями. Они использовали данные о температуре воздуха Национального центра экологического прогнозирования (NCEP) и данные о содержании  $\text{CH}_4$  в инфракрасном диапазоне атмосферы (AIRS) для выявления тепловых аномалий и аномалий концентрации метана до землетрясения Вэньчуань (12 мая 2008 г.). Результаты исследований показывают, что тепловые аномалии появились с 5 по 14 мая 2008 г., а аномалии метана – с 12 по 28 мая [Meng, Zhang, 2021] (рис. 15).

Аномалии метана вызваны сейсмической активностью. Более того, землетрясение Вэньчуань и серия сильных афтершоков вызвали сильную деформацию земной коры и появление новых разломов, создав новые каналы, по которым газы могли выходить на поверхность из недр литосферы [Cui et al., 2017].

Анализ фактического материала, вкупе с данными глубоководного бурения, указывает на наличие глубинных очагов генерации углеводородов в центральной части Японского моря, в том числе в зонах распространения «формации зеленых туфов», которая

характеризуется проявлениями магматогенного метана. Газопроявления Япономорского региона связаны с планетарными и региональными линейными элементами, в том числе с сейсмогенными, тектоническими депрессиями и другими структурами. Характеристики восходящей эмиссии природных газов зависят от структурно-тектонического каркаса районов, проявляя его на поверхности через толщу осадков в виде аномальных газогеохимических полей.

Исследования в толще воды и поверхностных осадочных отложениях также подтверждают совпадение аномальных полей концентраций метана в поверхностных водах и нижележащих горизонтах [Shakirov et al., 2019; Yatsuk et al., 2020; Mishukova et al., 2021].

Таким образом, несмотря на сложность постановки газогеохимических наблюдений в экспедиционных условиях, выявлено, что изменчивость поля концентраций растворенного метана значительно зависит от сейсмической активности районов исследований в Японском море. Активность геодинамических процессов существенно влияет на изменение газогеохимического режима не только литосферы, но и толщи вод Японского моря. Полученные результаты могут иметь прикладное значение: при картировании обширных акваторий выявление перспективных районов или нефтегазоносных бассейнов возможно с применением экспрессных газогеохимических методов.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены и обсуждены закономерности пространственного распределения содержаний метана в морской воде во взаимосвязи с сейсмической активностью в ходе рейса 54 НИС «Академик Опарин» в период 21 сентября – 31 октября 2017 г. Сравнение с полученными в том же районе данными рейса 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2018 г.) позволило уверенно выявить зависимость уровня концентрации метана в поверхностном слое морской воды от интенсивности сейсмических событий несмотря на особенности экспедиционных наблюдений во время движения судна, выполняемых с постоянной скоростью и с одинаковой дискретностью пробоотбора.

Установлено, что при общем нормальном характере распределения метана обнаружены поля его повышенных концентраций, что свидетельствует о наличии активных источников метана. На дне это, вероятно, зоны проницаемости, или сипы, некоторые из которых связаны с газоносными толщами и газогидратами.

Закономерности снижения и повышения концентрации метана в поверхностном слое морской воды до и после землетрясений указывают на связь, природу которой еще предстоит исследовать на основе материалов последующих системных экспедиционных исследований с привлечением данных дистанционных методов.

Обсуждение газогеохимического режима Японского моря выполнено в рамках исследований ТОИ ДВО РАН современных активных геолого-геофизических явлений и процессов в Японском море в серии комплексных экспедиций в режиме площадных многопараметрических съемок в литосфере, гидросфере и атмосфере.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность начальнику экспедиции на НИС «Академик Опарин» (54 рейс, 2017 г.) и «Академик М.А. Лаврентьев» (81 рейс, 2018 г.), а также всему научному составу и экипажам экспедиций.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Burov B.A., Salomatin A.S., Obzhairov A.I., 2017. Evidence of a Sudden Increase in Methane Bubbly Flows from Bottom

Sediment into Zones of the Stratified Water Column. In: Physics of Geospheres. Proceedings of the 10th All-Russia Symposium (October 23–29, 2017). POI FEB RAS, Vladivostok, p. 151–154 (in Russian) [Буров Б.А., Саломатин А.С., Обжи́ров А.И. Наблюдения резкого увеличения потока пузырькового метана из донных осадков в водный слой в зонах // Физика геосфер: Материалы докладов 10-го Всероссийского симпозиума (23–29 октября 2017 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. С. 151–154].

Cui Y., Ouzounov D., Hatzopoulos N., Sun K., Zou Z., Du J., 2017. Satellite Observation of CH<sub>4</sub> and CO Anomalies Associated with the Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0 and Lushan M<sub>s</sub> 7.0 Earthquakes in China. *Chemical Geology* 469, 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.028>.

Ershov V.V., Shakirov R.B., Melnikov O.A., Kopanina A.V., 2010. Variations of Mud Volcanic Activity Parameters and Their Relationship with Seismicity of the Southern Sakhalin Island. *Regional Geology and Metallogeny* 42, 49–57 (in Russian) [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].

Ershov V.V., Shakirov R.B., Obzhairov A.I., 2011. Isotopic-Geochemical Characteristics of Free Gases of the South Sakhalin Mud Volcano and Their Relationship to Regional Seismicity. *Doklady Earth Sciences* 440, 1334. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11090169>.

Izozov L.A., Emel'yanova T.A., Lee N.S., Petrishchevsky A.M., Vasilyeva M.A., Chuprynin V.I., 2020. The Model of Formation of the Western Pacific Marginal Seas: Vortex Geodynamics, Seismicity, and Mantle Upwelling. *Journal of Volcanology and Seismology* 14 (1), 44–57. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010029>.

Izozov L.A., Konovalov Yu.I., 2005. The Western Sikhote Alin Continental-Margin Volcanic Belt and Its Tectonic Position in the West-Pacific Continent-Ocean Transition Zone. *Dal'nauka, Vladivostok*, 315 p. (in Russian) [Изозов Л.А., Коновалов Ю.И. Западно-Сихотэ-Алинский окраинно-континентальный вулканический пояс и его тектоническая позиция в Западно-Тихоокеанской зоне перехода континент – океан. Владивосток: Дальнаука, 2005. 315 с.].

Jin Y.K., Shoji H., Obzhairov A., Baranov B. (Eds), 2013. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2012: R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise. Korea Polar Research Institute, Songdo, 129 p.

Kulinich R.G., Bessonova E.A., Obzhairov A.I., 2007. On the Correlation of Methane Emanations with Basement Structure of the Northeastern Shelf and Slope of the Sakhalin Island and with Seismic Activity of the Region. In: V.A. Akulichev (Ed.), *Seas in the Russian Far East. Book 3*. Nauka, Moscow, p. 277–285 (in Russian) [Кулинич Р.Г., Бессонова Е.А., Обжи́ров А.И. О корреляции метановых эманаций со структурой фундамента северо-восточного шельфа и склона о. Сахалин и сейсмической активностью региона // Дальневосточные моря России / Ред. В.А. Акуличев. М.: Наука, 2007. Кн. 3. С. 277–285].

Lomtev V.L., Tikhonov I.N., 2013. Shallow Seismicity of the Sea of Japan and Its Tectonic Aspects. *Journal of the Sakhalin Museum* 1 (20), 165–180 (in Russian) [Ломтев В.Л., Тихонов И.Н. Мелкофокусная сейсмичность Японского моря и ее тектонические аспекты // Вестник Сахалинского музея. 2013. № 1 (20). С. 165–180].

Meng Q., Zhang Y., 2021. Discovery of Spatial-Temporal Causal Interactions between Thermal and Methane Anomalies Associated with the Wenchuan Earthquake. *The European Physical Journal Special Topics* 230, 247–261. <http://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000252-9>.

Mishukova G.I., 2003. Methane in Fresh and Sea Water and Methane Fluxes at the Water – Atmosphere Interface in the Far East Region. Brief PhD Thesis (Candidate of Geographical Sciences). Vladivostok, 161 p. (in Russian) [Мишукова Г.И. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода – атмосфера в Дальневосточном регионе: Дис. ... канд. географ. наук. Владивосток, 2003. 161 с.].

Mishukova G.I., Yatsuk A.V., Shakirov R.B., Syrбу N.S., Valitov M.G., Ponomareva A.L., Mishukova O.V., 2021. Methane Fluxes at the Water – Atmosphere Interface and Gas-Geochemical Anomalies in the Bottom Sediments in the Northwestern Part of the Sea of Japan. *Russian Geology and Geophysics* 62 (12), 1385–1400. <https://doi.org/10.2113/RGG20204242>.

Normative and Methodological Support for Atmospheric Air Protection, 1995. Vol. 2. INTEREKO, Perm, 249 p. (in Russian) [Нормативно-методическое обеспечение охраны атмосферного воздуха. Пермь: ИНТЕРЭКО, 1995. Т. 2. 249 с.].

Obzhirov A.I., 2018. Gasgeochemical Precursors of Seismic Activity, Earthquakes, Volcanic Episodes on the Kamchatka and Sea of Okhotsk (to Use Information of the Kamchatka Scientific Conferences 2017). *Geosystems of Transition Zones* 2 (1), 57–68 (in Russian) [Обжиров А.И. О газогеохимических предвестниках сейсмических активизаций, землетрясений и вулканических проявлений на Камчатке и в Охотском море (с привлечением информации о камчатских научных конференциях 2017 г.) // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 1. С. 57–68]. <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.1.057-068>.

Obzhirov A.I., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A., 2004. Relations between Methane Venting, Geological Structure and Seismo-Tectonics in the Okhotsk Sea. *Geo-Mar Letters* 24, 135–139. <http://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0>.

Porotov G.S., 1977. *Mathematical Methods for Prospecting and Exploration of Minerals*. Textbook. Leningrad Mining Institute, Leningrad, 106 p. (in Russian) [Поротов Г.С. Математические методы при поисках и разведке полезных ископаемых: Учебное пособие. Л.: ЛГИ, 1977. 106 с.].

Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A., 2010. Deep Structure of Continental Margins

within the Sea of Japan. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 15 (1), 33–44 (in Russian) [Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б. Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Глубинное строение континентальных окраин региона Японского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2010. Вып. 15. № 1. С. 33–44].

Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A., 2014. *Geodynamic Models of the Deep Structure beneath the Natural Disaster Regions of Active Continental Margins*. Nauchny Mir, Moscow, 172 p. (in Russian) [Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.].

Shakirov R.B., 2018. *Gasgeochemical Fields of the Eastern Asia Marginal Seas*. GEOS, Moscow, 341 p. (in Russian) [Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 2018. 341 с.].

Shakirov R.B., Syrбу N.S., Obzhirov A.I., 2016. Distribution of Helium and Hydrogen in Sediments and Water on the Sakhalin Slope. *Lithology and Mineral Resources* 51 (1), 61–73. <https://doi.org/10.1134/S0024490216010065>.

Shakirov R.B., Valitov M.G., Obzhirov A.I., Mishukov V.F., Yatsuk A.V., Syrбу N.S., Mishukova O.V., 2019. Methane Anomalies, Its Flux on the Sea–Atmosphere Interface and Their Relations to the Geological Structure of the South-Tatar Sedimentary Basin (Tatar Strait, the Sea of Japan). *Marine Geophysical Research* 40, 581–600. <https://doi.org/10.1007/s11001-019-09389-3>.

Smirnov B.V., 1983. *Methods of Probabilistic Forecasting in Engineering Geology*. Nedra, Moscow, 134 p. (in Russian) [Смирнов Б.В. Вероятностные методы прогнозирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1983. 134 с.].

Valitov M.G., Shakirov R.B., Li N.S., Yatsuk A.V., Proshkina Z.N., Aksentov K.I., Makseev D.S., Shvalov D.A. et al., 2019. Integrated Geological-Geophysical Studies in the Northern Part of the Sea of Japan. In: *Technical Problems about Ocean Exploration. Proceedings of the 8th All-Russian Conference (September 30 – October 3, 2019)*. Vol. 8. Vladivostok, p. 257–261 (in Russian) [Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Ли Н.С., Яцук А.В., Прошкина З.Н., Аксентов К.И., Макеев Д.С., Швалов Д.А. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования северной части Японского моря (2017–2019 гг.) // Технические проблемы освоения мирового океана: Материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции (30 сентября – 3 октября 2019 г.). Владивосток, 2019. № 8. С. 257–261].

Yatsuk A., Shakirov R., Gresov A., Obzhirov A., 2020. Hydrocarbon Gases in Seafloor Sediments of the TATAR Strait, the Northern Sea of Japan. *Geo-Marine Letters* 40, 481–490. <http://doi.org/10.1007/s00367-019-00628-5>.