

ISSN 0016-853X

Номер 2

Март - Апрель 2023



ГЕОТЕКТОНИКА



www.sciencejournals.ru

Журнал основан в январе 1965 года.
Выходит 6 раз в год.



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2023

Локализация очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве с использованием фольклорно-исторических и палеосейсмологических данных <i>А. Н. Овсяченко, Ю. В. Бутанаев, Н. Г. Кошевой</i>	3
Глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры: экспериментальное моделирование при флюидодинамических нагрузках и сравнительный анализ образцов песчаников из пород нефтяных месторождений Западной Сибири <i>Е. А. Данилова</i>	25
Сравнительный анализ газо-геохимических данных наземного и спутникового мониторинга острова Сахалин и его шельфа (Северо-Восток России): тектонические следствия <i>Н. С. Сырбу, А. О. Холмогоров, И. Е. Степочкин, Е. С. Хазанова</i>	39

Contents

Vol. 57, no. 2, 2023

Localization of the Source of a Strong Historical Earthquake in Central Tuva Using Folklore-Historical and Paleoseismological Data <i>A. N. Ovsyuchenko, Y. V. Butanayev, N. G. Koshevoy</i>	3
Orenburg Radial-Concentric Structure at Great Depth: Experimental Modeling under Fluid Dynamic Loads and Comparative Analysis of Sandstone Samples from Oil Fields in Western Siberia <i>E. A. Danilova</i>	25
Comparative Analysis of Gas-Geochemical Data from Ground-Based and Satellite Observations of the Sakhalin Island and Its Shelf (Northeast Russia): Tectonic Consequences <i>N. S. Syrbu, A. O. Kholmogorov, I. E. Steepochkin, E. S. Khazanova</i>	39

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОЧАГА СИЛЬНОГО ИСТОРИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТУВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОЛЬКЛОРНО-ИСТОРИЧЕСКИХ И ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2023 г. А. Н. Овсяченко^{1, 3, *}, Ю. В. Бутанаев^{2, 3}, Н. Г. Кошевой^{1, 3}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Б. Грузинская, д. 10, 123995 Москва, Россия

²Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
ул. Интернациональная, д. 117а, 667010 Кызыл, Республика Тыва, Россия

³Геологический институт РАН,
Пыжевский пер. д. 7, 119017 Москва, Россия

*e-mail: ovs@ifz.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

В статье изложены результаты исследований локализации очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве. Исследования проводились с использованием структурно-геоморфологических, палеосейсмологических и историко-сейсмологических методов. Первичные сведения об очаге и его положении найдены в фольклорных источниках, имеющих топонимическую привязку, с использованием которой следы землетрясения были обнаружены и закартированы на местности. Следы землетрясения представлены сеймотектоническими разрывами в зоне Улугхемского активного разлома и сейсмогравитационными образованиями. Предварительная датировка события – 1715–1758 гг., магнитуда – $M_w = 6.5–7.0$. Интенсивность землетрясения в эпицентре достигла 8–9 баллов по шкале ESI-2007. В зоне Улугхемского активного разлома закартированы последствия катастрофического взрыва 1950 г., который привел к человеческим жертвам и разрушениям. Результаты проведенных исследований позволили четко определить северную границу Кызыльской межгорной впадины как разломную с взбросо-надвигово-левосдвиговой кинематикой смещений в голоцене, а выявление эпицентральной зоны исторического землетрясения важно для оценки сейсмической опасности густонаселенного района Республики Тыва.

Ключевые слова: активная тектоника, палеосейсмология, сеймотектоника, историческая сейсмология, сейсмическая опасность, очаг землетрясения, Алтае-Саянское нагорье, Центральная Тува

DOI: 10.31857/S0016853X23020066, EDN: FZJRAT

ВВЕДЕНИЕ

В современных исследованиях активной тектоники, в том числе и Алтае-Саянского региона, помимо широко распространенного геолого-геоморфологического подхода все чаще привлекаются методы исторической и архео-сейсмологии [22, 24, 30, 32, 44, 55, 59, 60, 63–65, 70]. Комплексное применение структурно-геоморфологических, палеосейсмологических и историко-сейсмологических методов дает сведения о разнообразных проявлениях тектонических деформаций в историческое время по независимым источникам. Это особенно актуально для Республики Тыва, где следы проявления активной тектоники весьма выразительны, сильные землетрясения

неоднократно происходили в историческое время, но даже эпицентры сейсмических событий начала XX в. локализуются с ошибкой до $\pm 2^\circ$ [27].

Данные о возрасте и распределении эффектов сильных землетрясений имеют большое прикладное значение в исследованиях сейсмической опасности, а активные разломы и характеристики смещений по ним заложены в основу фундаментальных моделей современной геодинамики.

В историко-сейсмологическом отношении для внутренних районов Алтае-Саянского нагорья все более очевидными становятся региональные ограничения стандартно используемых письменных источников как по времени, так и по точности восстановления сейсмологических параметров

исторических землетрясений. Имеющиеся тувинские письменные исторические источники ограничены второй половиной XIX в. [39], но тувинский фольклор хранит память о сильных землетрясениях прошлого.

В статье изложены результаты проведенных нами палеосейсмологических и структурно-геоморфологических исследований с привлечением фольклорных источников тувинского народа на примере выявления очага сильного исторического землетрясения в Центральной Туве.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геолого-геоморфологические методы палеосейсмологической направленности дают возможность [35, 61]:

- обнаружить выходы сейсмических очагов на поверхность;
- закартировать вторичные палеосейсмодислокации, возникающие в результате сейсмических сотрясений;
- определить магнитуду по данным о параметрах нарушений;
- оценить возраст палеоземлетрясений методом абсолютного датирования.

Основными являются методы структурной (тектонической) геоморфологии и палеосейсмологии, направленные на изучение тектонических деформаций в позднелайстоцен–голоценовых формах рельефа и отложениях [45, 53]. Идентификация сейсмических очагов наиболее однозначна при выявлении сейсмотектонических разрывов – импульсных смещений древней дневной поверхности, маркирующих собой выход очага сильного землетрясения на поверхность в зоне активного разлома (далее – тренчинг).

Очаги сильных землетрясений сопровождаются сейсмогравитационными нарушениями в виде отседаний склонов гор, обвальных, оползне-обвальных, оползневых смещений, каменных и земляных лавин, селевых потоков, а также сейсмовибрационными разжижениями водонасыщенных грунтов с образованием трещин, грифонов и разливов разжиженного песка на поверхности, которым в разрезе рыхлых толщ соответствуют дайки, диапиры, мелкая внутрислоевая складчатость и конволюции [35]. Все эти нарушения используются в палеосейсмологических исследованиях [10, 36, 55, 66]. Важную геологическую информацию о параметрах очага несут сейсмогенные деформации встряхивания и выброса в скальных массивах, которые используются в качестве кинематических индикаторов направленности сейсмических деформаций [12, 23, 38, 67].

Для определения интенсивности палеоземлетрясений по параметрам нарушений в природной среде разработана шкала ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity), тестированная авторами на нескольких современных аналогах, в том числе и в эпицентральной зоне Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. [37, 62, 67]. Установлено, что шкала ESI-2007 хорошо коррелирует с традиционными шкалами (типа MSK-64, EMS-98), позволяет восстанавливать детальную картину распределения сейсмических эффектов и реконструировать параметры палеоземлетрясений.

Методы исторической и археосейсмологии в настоящее время применяются практически во всех сейсмоактивных регионах мира и дают надежные результаты, используемые в оценке сейсмической опасности. Историческая сейсмология дает независимые данные о распределении и интенсивности сейсмических сотрясений, часто с точной датировкой сейсмических событий и локализацией их эпицентров [26, 43, 69].

Ценная геологическая информация о древних землетрясениях и связанных с ними явлениях часто заключена в фольклоре народов, издавна проживающих в сейсмоактивных регионах [6, 22, 65, 68]. Такую же информацию могут включать топонимы и связанные с ними мифы, легенды, предания и поэмы древности.

Республика Тыва расположена в центральной части Алтае-Саянского сегмента Центрально-Азиатского подвижного пояса, представленного одноименной горной страной. Высокая современная активность Алтае-Саянского региона проявилась несколькими мощнейшими землетрясениями [42, 47]:

- Хангайское (Болнайское) в Северной Монголии (23.07.1905 г., $M = 8.2$);
- Цэцэрлэгское землетрясение в Северной Монголии (9.07.1905 г., $M = 7.6$);
- Фуюнское землетрясение в Китайском Алтае (10.08.1931 г., $M = 8.0$);
- Гоби-Алтайское землетрясение на юге Монголии (4.12.1957 г., $M = 8.1$).

Разрушительный эффект этих событий в эпицентре достиг $I_0 = 11$ баллов по шкале MSK-64.

В наше время сильные землетрясения произошли:

- на юго-востоке Горного Алтая – Чуйское (или Алтайское) (27.09.2003 г., $M_w = 7.2$, $I_0 = 9–10$ баллов);
- на территории Тувы в 2011–2012 гг. ($M_w = 6.6$ и $M_w = 6.7$, $I_0 = 8–9$ баллов);
- на северо-западе оз. Хубсугул (12.01.2021 г., $M_w = 6.7$, $I_0 = 8$ баллов).

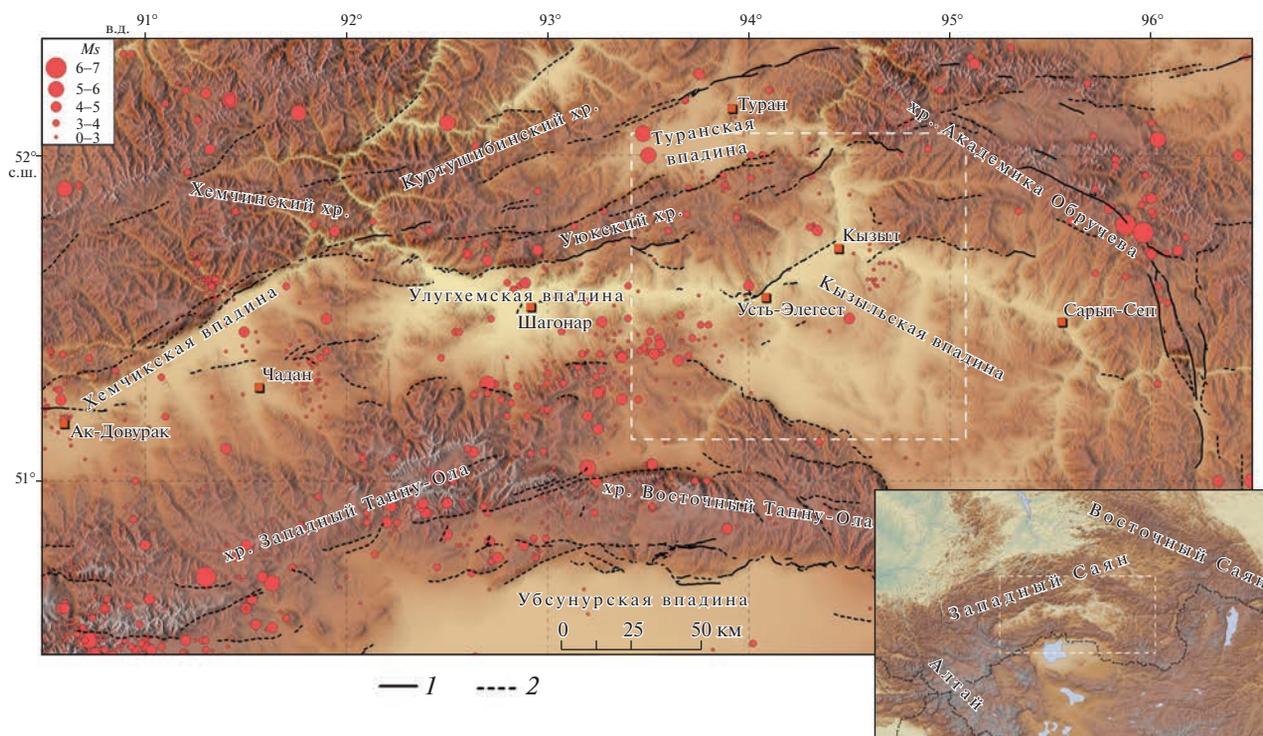


Рис. 1. Обзорная сеймотектоническая схема Центральной Тувы с эпицентрами землетрясений [42, 74].

Обозначен (рамка штрих-линией белым) район Кызыльской впадины.

На врезке: — положение района в системе крупнейших хребтов Алтае-Саянского нагорья. Цифровая модель рельефа разработана по [72].

1–2 — основные активные разломы (по [2, 3, 5, 7, 28–30, 48]): 1 — изученные в результате сеймотектонических исследований, 2 — по структурно-геоморфологическим и дистанционным данным

Инструментальные сейсмологические данные о землетрясениях Алтае-Саянского региона с $M > 5.0$ имеются начиная с 1913 г. С 1963 г., без пропусков регистрируются землетрясения с $M \geq 3.5$ [14]. Период инструментальных наблюдений охватывает небольшой интервал времени, т.к. повторяемость сильных землетрясений в очагах Алтае-Саянского нагорья может достигать нескольких сотен и даже тысяч лет [13, 28, 29, 36, 49]. Поэтому данные инструментального этапа дают ограниченный материал для формализованных методов с использованием различных алгоритмов распознавания прогнозных очагов разрушительных землетрясений [9, 25]. В связи с этим актуальность приобретают постоянно совершенствуемые методы архео- палео- и исторической сейсмологии.

В Туве методами палеосейсмологии очаговые зоны палеоземлетрясений были выявлены в следующих районах (рис. 1):

- горные цепи Академика Обручева [2, 3, 7, 28, 29];
- Хемчикско-Уюкская горная цепь [2, 7, 15, 48];

— зона Эрзино-Агардагского активного разлома [4];

— Билино-Бусингольская впадина Байкальской рифтовой зоны на востоке Тувы [7];

— зона южного склона хр. Западный Танну-Ола [30, 48].

Наиболее детальные палеосейсмологические исследования с определением возраста, магнитуды и положения очага палеоземлетрясений для последних 4–6 тыс. лет, были выполнены в Каахемской зоне активных разломов (хр. Академика Обручева) в связи с Тувинскими землетрясениями 2011–2012 гг. [28, 29].

Историко-сейсмологические исследования

В историко-сейсмологических исследованиях Южной Сибири до сих пор были использованы в основном периодические издания, в меньшей мере — сочинения путешественников и дневники исследователей XVIII–XIX вв. [21, 24, 26, 43, 69].

В Алтае-Саянском регионе скудные сообщения о сейсмическом эффекте нескольких исторических землетрясений известны только для

удаленных районов, где расположены современные города Минусинск, Кузнецк и Барнаул и в регионе Рудного Алтая. Эти сообщения о сейсмических событиях можно рассматривать как сведения, которые относятся ко второй половине XVIII— началу XX в. Очаги большинства этих сейсмических событий были расположены в горных хребтах Алтае–Саянского нагорья.

Для внутренних, наиболее активных районов нагорья, обычно используемые письменные источники имеют существенные ограничения. Тувинцы начали создавать свои литературные и исторические произведения на старомонгольском языке примерно со второй половины XIX в. [39]. Сведения о природных явлениях в тувинских летописях почти отсутствуют.

В такой ситуации ценную информацию о древних землетрясениях и явлениях, связанных с ними, можно получить из фольклорных источников [6, 22, 31, 44, 65]. Устное народное творчество занимает важное место в исторических исследованиях Тувы [40]. У кочевых народов Центральной Азии была особенно широко развита традиция устной историографии. Генеалогические и этногенетические предания во многом заменяли кочевникам письменную историю. В фольклоре отразились все основные события истории кочевых народов, включая и природные явления.

В 1980-х гг. на основе опросов местного населения и проведенных палеосейсмогеологических исследований в Монгольском Алтае был локализован очаг Великого Монгольского землетрясения 1761 г., которое ощущалось на огромной территории, достигнув Рудного Алтая, Бийска и Барнаула [47]. Выяснилось, что в районе эпицентра, где интенсивность сотрясений достигла 11 баллов по шкале MSK-64, память о разрушительном землетрясении передавалась из поколения в поколение. Предпосылки для использования фольклорных источников также дают опыт обнаружения в письменно зафиксированных монгольских преданиях свидетельств вулканического извержения в Восточном Саяне, которое подтвердилось дендрохронологическим и радиоуглеродным датированием [52].

Перечисленные методы и предпосылки были использованы при исследованиях в Центрально-Тувинской котловине, проведенных нами в 2018–2022 гг.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

В тектоническом отношении Алтае–Саянский регион является очень сложным, мозаичным сооружением, объединяющим рифейские, салаир-

ские, каледонские и герцинские складчатые системы, а также докембрийские континентальные блоки с разными размерами и историей развития [20]. В формировании новейшей тектонической структуры рассматриваемого региона в качестве основных механизмов рассматриваются разогрев с поднятием крупных объемов литосферы мантийными плюмами, латеральные верхнемантийные течения, крупномасштабная литосферная складчатость в результате отдаленного воздействия Индо-Евразийской коллизии, и, как результат этих процессов, – перемещения по разломам [46, 54, 56–58]. Наиболее крупные разломы являлись сдвигами и взбросо-надвигами, образовавшимися в эпохи коллизии и орогенеза и способными, в зависимости от изменения поля напряжений, периодически активизироваться [57].

Основная стадия неотектонической активизации относится к позднеплиоцен–четвертичному времени и привела к образованию весьма контрастного горного рельефа [16, 18, 33, 34]. Образование позднекайнозойских структур сопровождалось частичным или полным обновлением древних дизъюнктивов, при этом разломы северо-западного, субмеридионального и северо-восточного простирания получили преобладающую сдвиговую составляющую, а субширотные – взбросовую или надвиговую с существенной сдвиговой компонентой. Определяющими элементами активной тектоники являются субширотные и северо-восточные левые сдвиги или разломы с доминирующей левосдвиговой составляющей смещений [46]. Морфоструктуры заключенные между крупнейшими сдвигами испытывают вращение, вдавливание, выжимание или проседание. По величине резко преобладают горизонтальные смещения по сдвигам и вращению блоков на всех масштабных уровнях.

Крупнейшие морфоструктуры рассматриваемого региона представляют собой системы сводово-глыбовых поднятий, выраженных горными хребтами, межгорными впадинами, нагорными плато, низко и среднегорными массивами. Это – вытянутые в северо-западном направлении Хемчикский, Уюкский и Куртушибинский хребты и отделенные от них Тувинской котловиной (системой межгорных впадин) хребты Танну-Ола и Академика Обручева (см. рис. 1).

Тувинская котловина представлена Хемчикской, Улугхемской и Кызыльской впадинами, выполненными континентальными отложениями преимущественно юрского и неоген-четвертичного возраста, фиксирующими этапы тектонических активизаций и регионального выравнивания рельефа между ними [33].

Современные морфоструктуры не во всей полноте признаков соответствуют структурам предыдущих этапов тектонических активизаций.

Тувинская система впадин дискордантно наложена на разновозрастные тектонические структуры [1]:

– Хемчикско-Систигхемский передовой прогиб Западно-Саянской каледонской складчатой системы в западной части;

– Центрально-Тувинский рифтогенный средне-позднепалеозойский прогиб в центре;

– Ондумская зона салаирской Верхнеенисейской складчатой системы на востоке;

– структуры мезозойской активизации – дайковые пояса и мульды, выполненные угленосными терригенными отложениями юрского возраста.

Основное выражение Тувинская система впадин получила в рельефе. Она представлена приподнятыми блоками или останцами древнего рельефа с развитыми на них денудационными равнинами – поверхностями выравнивания, мелкопочными и низкорными массивами, а также относительно опущенными блоками, которым соответствуют впадины с аллювиальными, аллювиально-пролювиальными, эоловыми и озерными равнинами [18].

Выровненный или реликтовый низкорный рельеф впадин резко контрастирует с окружающими средне- и высокорными массивами. В структурно-вещественном выражении впадины представлены относительно небольшими бассейнами континентального осадконакопления неоген–четвертичного возраста, вытянутыми вдоль крупнейших активных разломов в их опущенных крыльях.

Отложения юрского и палеогенового возраста распространены как во впадинах, так и в прилегающих поднятиях. Мощность неоген–четвертичных отложений невелика, редко превышая несколько десятков метров. Только в наиболее опущенной Хемчикской впадине она достигает 200–300 м по данным метода вертикального электрического зондирования [19]. Площади позднекайнозойского осадконакопления, синхронного формированию впадин, также небольшие, что указывает на общее поднятие региона и их оформление в качестве морфоструктур в результате отставания в поднятии от более быстро растущих окружающих хребтов.

Район исследований расположен в северной части Кызыльской межгорной впадины (рис. 2).

Отметки днища впадины изменяются от 590–650 м в долине р. Верхний Енисей, где расположен наиболее опущенный участок, до 1300–1500 м –

по периферии. Поверхность впадины в целом представляет собой сохранившуюся древнюю денудационную поверхность выравнивания доплиоценового возраста с маломощным рыхлым покровом, выполняющим обширные понижения между реликтовыми мелкопочными и низкорными массивами [33].

Наиболее отчетливо выраженное разломное ограничение Кызыльская впадина имеет на границе с хребтом Танну-Ола, где вдоль уступа в зоне Северо-Таннуольского разлома смещение плейстоценовых террас оценивается в 40–70 м [18]. Со стороны хребта Академика Обручева впадина имеет контрастную разломную границу только на коротком отрезке вдоль зоны Байсютского разлома. Восточнее речные террасы и более высокие геоморфологические уровни испытывают относительно равномерный подъем в сторону осевой части хребта. Юго-восточное замыкание впадины в структурно-геоморфологическом отношении выражено неотчетливо и определение здесь четкой границы пока не представляется возможным.

Северная граница впадины методами неотектоники практически не изучена и на разных схемах новейшей тектоники была показана по-разному [16, 18, 33, 34]. Наиболее определенно резкая граница, разделяющая морфотектонические блоки слабого предгорного поднятия (к северу от Енисея) и слабого опускания (к югу от Енисея), была выделена С.Г. Прудниковым [33]. Поверхность впадины, включая площадки надпойменных террас р. Элегест, имеет общий пологий наклон на север, фиксируя общий перекосяк в северном направлении [18].

Домезозойское основание Кызыльской впадины представлено рифтогенными вулканогенно-терригенно-карбонатными образованиями девон–карбонного возраста Центрально-Тувинского прогиба и гранитоидами раннепалеозойского Таннуольского комплекса [17]. В северной части впадины на эти образования наложена мульда чашеобразной формы, выполненная угленосной молассовой формацией юрско-раннемелового возраста, мощностью до 1.5 км. Структура также известна как Улугхемский угольный бассейн, выполненный ритмичным переслаиванием конгломератов, песчаников, аргиллитов и алевролитов аллювиально-озерного происхождения. Северо-западная граница этой структуры имеет флексуобразный характер, с крутыми углами падения слоев до 50°–80° [11]. Восточная и южная границы более пологие – с падением слоев от 5°–7° до 20°. Внутри мульды выделяются складки второго порядка – овалы и пологие синклинали, отделенные друг от друга асимметричными антиклиналями.

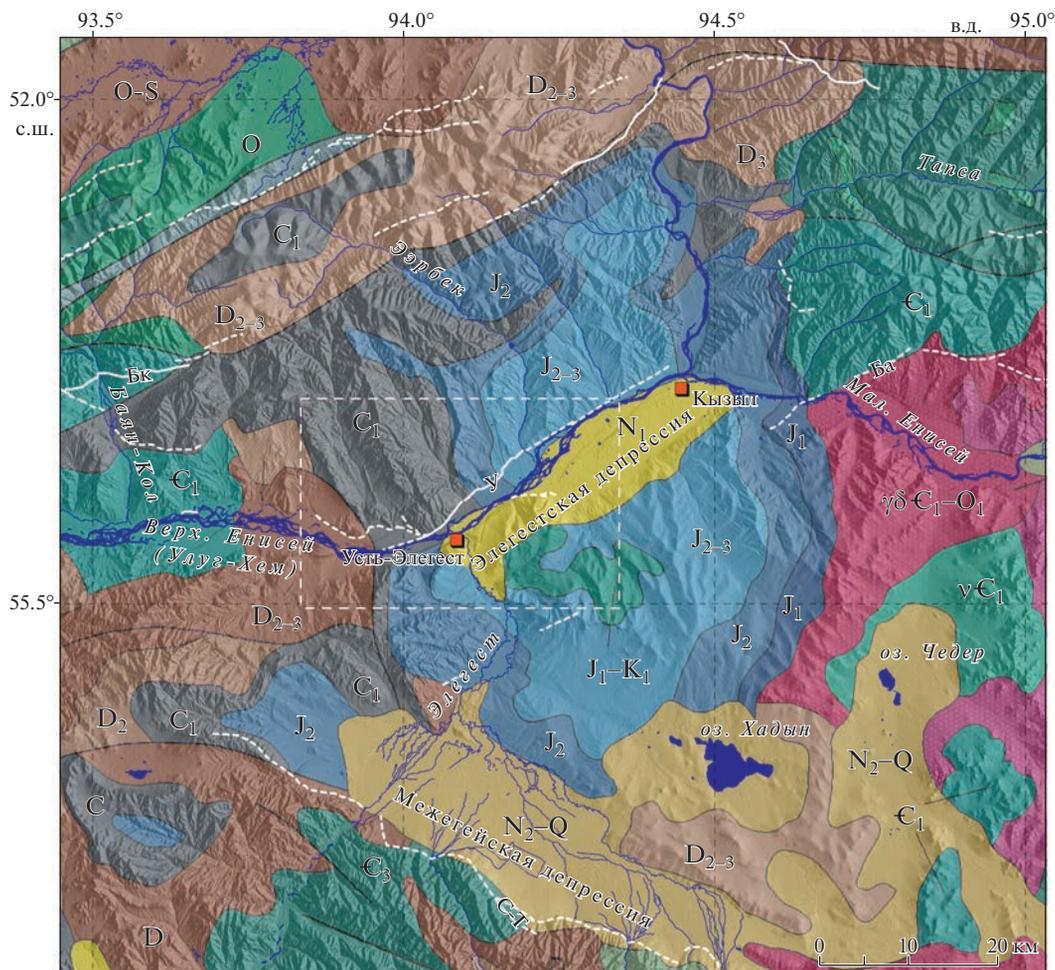


Рис. 2. Обзорная геологическая схема района Кызыльской впадины (по данным [8]). Обозначены (штрих-линии белым) основные активные разломы.

Показано (рамка штрих-линией белым) положение района исследования.

Цифровая модель рельефа разработана по [72].

Активные разломы: У – Улугхемский; С–Т – Северо-Таннуольский; Бк – Баянкольский; Ба – Байсютский.

Новейшую историю развития морфоструктур фиксируют кайнозойские отложения, но в рассматриваемом районе они изучены относительно слабо.

В западинах древней поверхности выравнивания известны немногочисленные фрагменты мелпалеогеновой коры выветривания, представленной охристыми глинистыми и щебнисто-глинистыми пестроцветными (желтоватыми, бурыми, серыми) образованиями мощностью не более 10 м [1].

В северной и юго-западной частях впадины отдельные разобщенные депрессии (Чедерская, Хадынская, Межегейская, Элегестская) выполнены осадками в основном неоген-четвертичного возраста. Более древние, озерные песчано-глинистые отложения олигоцена мощностью 10 м, выделены в пределах Чедерской (район оз. Чедер) и

Межегейской депрессий, где слагают основание кайнозойского разреза [17].

К неогену в пределах Кызыльской впадины отнесены толщи глин, супесей и песков озерно-аллювиального происхождения мощностью до 48 м в Хадынской депрессии, накопление которых по палеонтологическим и палинологическим данным происходило в позднем миоцене–раннем плиоцене.

Из плиоценовых образований наиболее широко представлены красноцветно-бурые глины, суглинки, супеси и пески озерно-аллювиального происхождения мощностью до 112 м, развитые в основном в долине р. Верхний Енисей (Элегестская депрессия), где они по большей части погребены под более молодыми осадками [17]. Перекрываются они эоплейстоценовыми аллювиальными, озерными, делювиально-пролювиальными и

эоловыми отложениями мощностью до нескольких десятков метров.

В долине р. Верхний Енисей наиболее отчетливо проявлены первые три надпойменные террасы. По данным спорово-пыльцевого анализа возраст второй и третьей террас – неоплейстоценовый, первой террасы – неоплейстоцен–голоценовый [17]. Абсолютных датировок надпойменных террас для территории Тувы нет, но известны радиоуглеродные датировки по древесине из аллювия второй надпойменной террасы в среднем течении р. Енисей – $21\,350 \pm 650$ лет (ГИН-310), $26\,300 \pm 900$ лет (ЛГ-19), а также более древняя дата $46\,600 \pm 1500$ лет (ГИН-309) [50]. Отложения 4–8- и 8–12-метровых террас среднего течения Енисея датированы сартанским временем (11–24 тыс. лет) [51].

Геологическая история кайнозойского осадконакопления показывает неоднородность строения и неравномерность развития Кызыльской впадины. В олигоцене оформилась центральная и юго-западная части впадины, прилегающие к хр. Танну-Ола. В миоцене осадконакоплением была охвачена и северная часть впадины (Элегестская депрессия). В плиоцене здесь накопилась относительно мощная толща озерно-аллювиальных отложений. Долина р. Верхний Енисей на этом участке имеет аккумулятивные надпойменные террасы.

Прослеживание террас в долине р. Верхний Енисей позволило оценить величину врезания за плейстоцен в пределах Кызыльской впадины цифрами 30–40 м, что почти в два раза меньше, чем в районе, смежном со впадиной с западной стороны [18]. Это свидетельствует о почти двукратном отставании на фоне общего поднятия региона, т.е. интенсивном относительном опускании северной части Кызыльской впадины на последнем этапе геологического развития.

Улугхемский (Кызыльский) разлом

Самое крупное разрывное нарушение рассматриваемого района – Улугхемский (Кызыльский) разлом, который протягивается вдоль долины р. Верхний Енисей, почему изучен слабо и получил отражение лишь на последних геологических картах масштаба 1 : 50000 и 1 : 200000 [11, 17].

Разлом фрагментарно фиксируется по геофизическим данным. Кинематика разлома не установлена. По разлому закартированы смещения девон–карбоновых образований, а также резкая смена угленосности и строения разреза юрских отложений в разных бортах долины р. Верхний Енисей [11]. В результате постюрских смещений по разлому угленосная юрская мульда оказалась

разобрана на две половины – северная часть была вовлечена в слабое поднятие, тогда как южная продолжила относительное погружение на этапе новейшей тектонической активизации.

Подытоживая выполненный анализ, надо отметить, что, несмотря на неплохую изученность новейшей тектоники Центральной Тувы, почти не изучены горизонтальные смещения по активным разломам, как сдвиговой, так и надвиговой кинематики. Возможно, именно по этой причине некоторыми исследователями делались выводы о снижении тектонической активности в позднем плейстоцене–голоцене [18 и др.]. Нам представляется, что это не так, а отправная точка для развития этого положения была получена с неожиданной стороны.

Фольклорные источники

В фольклорном сборнике, собранном И.Г. Сафьяновым [41], нами были обнаружены три источника – былина “Улу-Дуне” (“Великая ночь”), народная песня “Джарга” и рассказ “О великой ночи”, содержащие описание одного и того же природного события, состоявшегося в середине XVIII в.

Событие предваряется световым эффектом (в фольклорном источнике обозначен, как “белый призрак духа земли” [41]) – атмосферным свечением в результате сейсмoeлектрических явлений или воспламенения горючих газов. После этого возникают молния и удар грома, а береговые утесы обрушиваются в русло реки, на противоположной стороне реки сходят обвалы и осыпи, завалившие пещеры [41]. По всем признакам, – это было сильное землетрясение, которое предварялось световым эффектом. Также хорошо известно, что сильные землетрясения часто сопровождаются звуковыми эффектами – гулом, грохотом, громом. Кроме того, в историческом источнике имеется важное указание на разлив реки и затопление большой территории, что можно трактовать как резкое тектоническое опускание участка долины или изменение русла реки [41]. В фольклорном источнике народной песне “Джарга” ситуация и место аналогичны былинке “Улу-Дуне”, но повествование дополнено описанием сотрясения скал и обвалов, заваливших пещеры в горе Джарга [41].

Письменных источников, позволяющих определить дату события, нами пока не найдено. Событие восстанавливается только по одному источнику [41], с учетом разброса имеющихся дат, сейсмическое событие можно локализовать в интервале 1715–1758 гг., менее уверенно – в 1756–1757 гг.

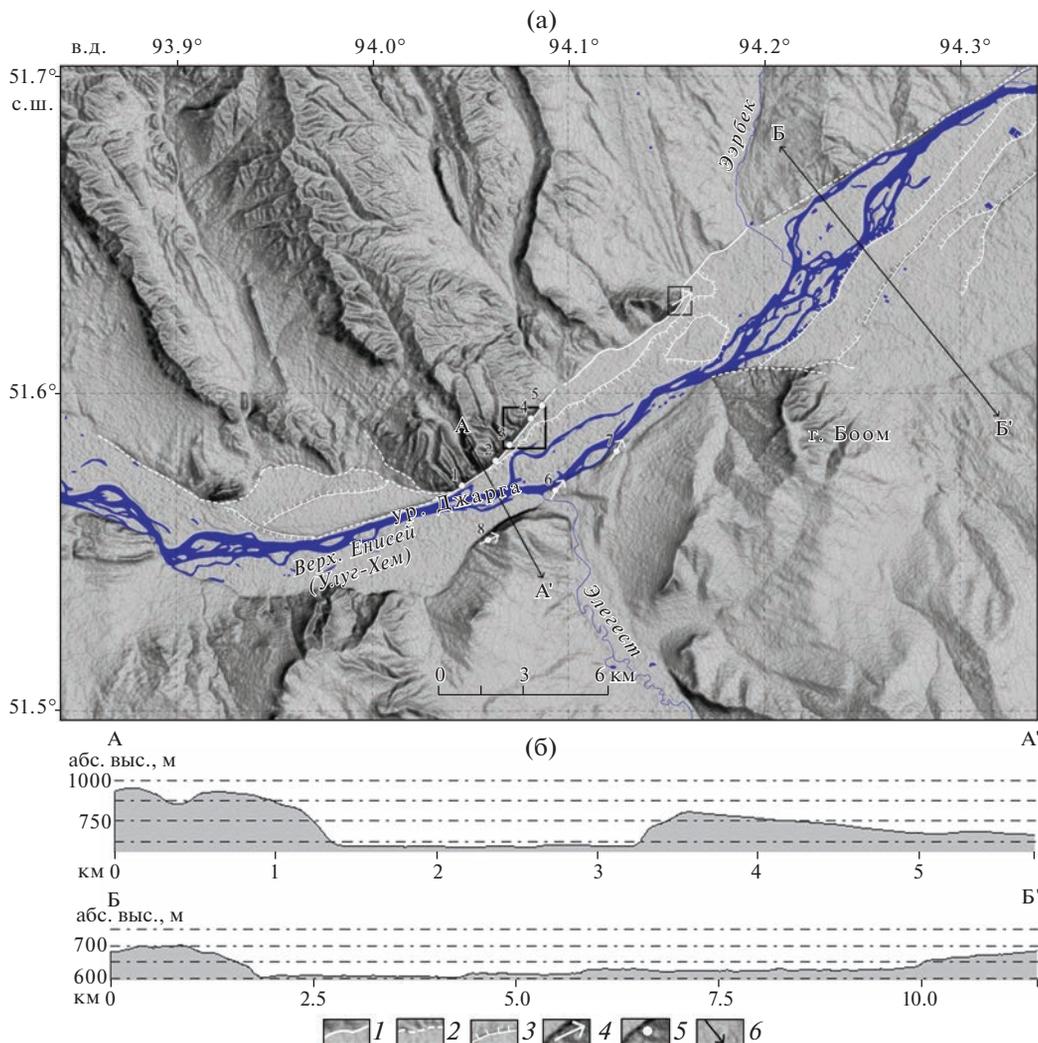


Рис. 3. Схема района исследования (а) с гипсометрическими профилями (б) и расположением детальных участков (рамки).

Профили обозначены А–А', Б–Б'.

Показано положение эрозионно-тектонического уступа в правом борту долины р. Верхний Енисей к северу от ур. Дзарга (рамка жирной линией черным) – см. рис. 5; район расчистки (рамка тонкой линией черным) – см. рис. 9. Цифровая модель рельефа разработана по [72].

1–2 – основные активные разломы: 1 – изученные в результате сейсмотектонических исследований, 2 – по структурно-геоморфологическим и дистанционным данным; 3 – уступы надпойменных террас; 4 – наиболее уверенно определяемые направления резких смещений земной поверхности – кинематические индикаторы положения относительно очага землетрясения; 5 – точки наблюдений (т.н.), упоминаемые в тексте; 6 – положение гипсометрических профилей

Урочище Дзарга расположено в районе пос. Усть-Элегест, на правом берегу р. Верхний Енисей (Улуг-Хем), а рельеф местности хорошо соответствует описанию в фольклорных источниках [41]. Однако далеко не всякую легенду можно рассматривать как источник сведений об особых явлениях природы, необходимо учитывать фольклорные преувеличения, смещения и смещения событий. В связи с этим, имея четкую топонимическую привязку, нами в районе ур. Дзарга были предприняты детальные полевые исследования с использованием методов палео- и археосейсмологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе ур. Дзарга долина р. Верхний Енисей имеет асимметричное строение с отвесным скальным склоном в правом борту высотой до 200 м и корытообразный поперечный профиль (рис. 3).

Днище долины – широкое и плоское, с многочисленными мигрирующими островами, формирование которых связано с частой бифуркацией русла и активной боковой эрозией. Русло шириной до 650 м распадается на отдельные протоки и рукава. Высокая пойменная терраса возвышается над руслом на 1–2.5 м, при ширине площадки до 800 м



Рис. 4. Общий вид эрозионно-тектонического уступа в правом борту долины р. Верхний Енисей (ур. Джарга). (а)–(б) – вид на северо-запад.

и сложена песчано-глинистыми отложениями, налегающими на гравийно-галечно-валунный русловой аллювий. Надпойменные террасы с высотами 5–10, 10–20 и 20–30 м развиты фрагментарно.

На участке ур. Джарга днище долины занято преимущественно пойменной и высокой пойменной террасами. Площадка первой надпойменной террасы шириной до 1 км здесь наблюдается в правом борту. Более высокие вторая и третья террасы появляются в расширениях выше и ниже ур. Джарга, четкая граница между ними наблюдается только на отдельных отрезках.

Геологическое строение бортов долины на этом участке резко различно, – если в правом борту обнажены палеозойские вулканогенно-осадочные (прочные туфы, туфо-песчаники, песчаники) породы каменноугольного возраста, то в левом борту находятся угленосные песчаники, конгломераты и аргиллиты средней юры. Такое различие связано с тектоническими смещениями по разлому, следующему вдоль долины реки.

Выявленные деформации рельефа и молодых отложений четко разделяются на:

- первичные, связанные с выходом очага на поверхность;
- вторичные, возникшие в результате сейсмических сотрясений.

Сейсмотектонические эффекты (первичные)

Обновленный тектонический уступ был выявлен в подножии правого борта долины, который представляет собой крутой скальный обрыв, прорезанный многочисленными каньонами – долинами временных водотоков (рис. 4).

В ур. Джарга уступ почти на всем протяжении приурочен к основанию скального обрыва, представляющего собой почти сплошную зону отрыва обвалов и осыпей. Уступ здесь почти полностью оказался перекрыт колювием, потому показан только на общей схеме, но проявлен в днищах долин временных водотоков, где нам удалось заметить смещения молодых форм рельефа (см. рис. 3).

В днищах долин временных водотоков, уступ представлен водопадами, т.е. русла долин подвешены. На выходе из обрыва долины временных водотоков откладываются грубообломочный материал пролювиальных конусов выноса – сухопутных дельт, фиксирующих собой местный базис эрозии на пересечении с уступом. Конусы приклонены к обрыву и образуют две (возможно – три и более) разновозрастные генерации. Более древняя генерация обнаруживает систематические смещения влево относительно более молодого конуса и каньонов временных водотоков (рис. 5).

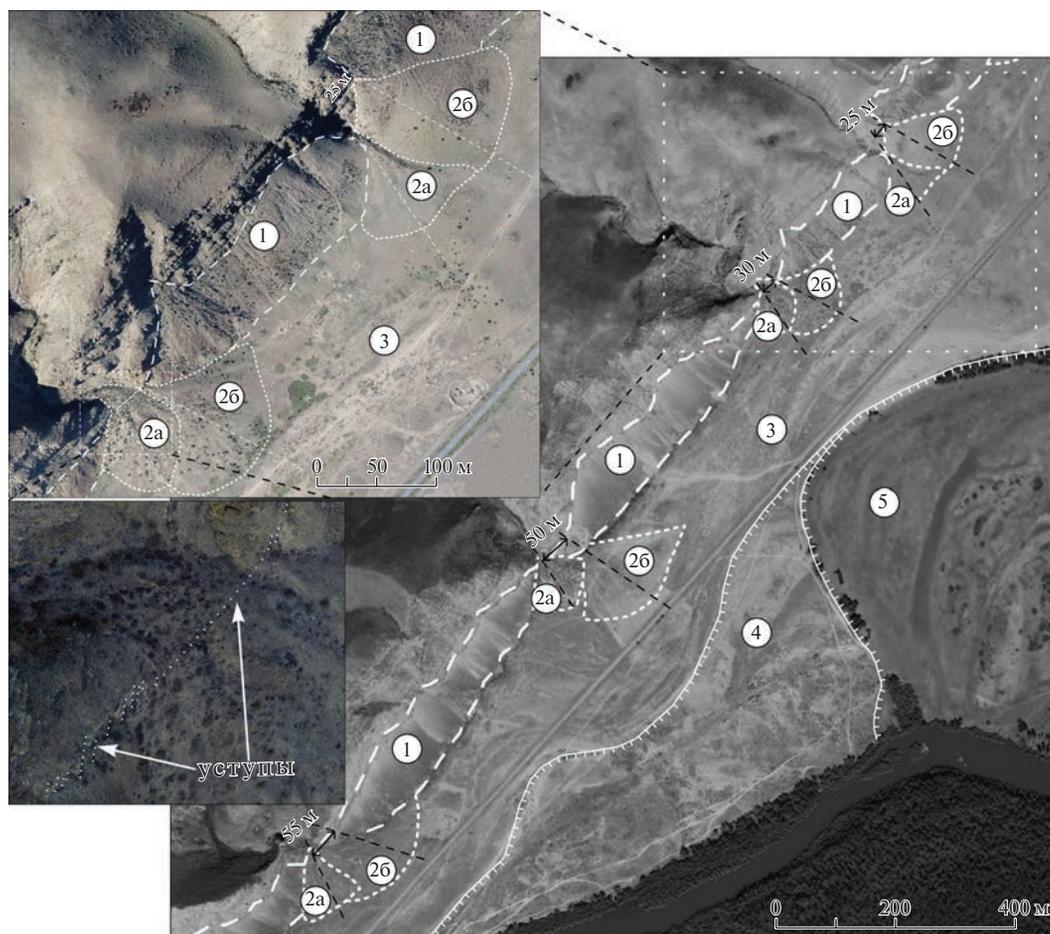


Рис. 5. Геоморфологические схемы аккумулятивных форм рельефа в районе эрозионно-тектонического уступа в правом борту долины р. Верхний Енисей к северу от ур. Джарга. Положение схемы – см. на рис. 3. Основа – космоснимок [73].

На врезках: разномасштабные фотопланы по данным аэрофотосъемки.

Обозначены (цифры в кружках): 1 – обвальнo-осыпной шлейф; 2 – пролювиальные конусы выноса разных генераций: 2a – поздняя; 2b – ранняя; 3 – поверхность первой надпойменной террасы; 4 – поверхность высокой пойменной террасы; 5 – поверхность пойменной террасы.

Величины горизонтальных смещений группируются в интервалах 25–30 м и 50–55 м. В точках наблюдения (т.н.) 4 и 5 на склонах уступ представлен зигзагообразной скальной поверхностью, сформированной косыми левосдвиговыми сколами с величиной горизонтального смещения до 70 см (см. рис. 5).

Левосторонние смещения вдоль основания скального уступа наблюдаются также в сухих руслах временных водотоков. В т.н. 1 наблюдаются две разновозрастные брошенные долины, смещенные на 9 и 16 м (рис. 6, а).

Смещения замерены также в т.н. 2, 3 (4–5 м) и т.н. 4 (6 м) (см. рис. 6, б).

В т.н. 3 наиболее молодой уступ на поверхности конуса выноса имеет высоту до 80 см (рис. 7).

Две крупные глыбы на этом уступе оказались разорванными и были смещены влево на 50–70 см. Поверхности смещения почти не покрыты лишайниками и пустынным загаром, что указывает на возраст подвижки в первые сотни лет.

К северо-востоку от рассмотренного участка нарушения рельефа представлены не столь выразительно. Здесь прослеживается уступ, ограничивающий долину р. Верхний Енисей, отличия которого от типично эрозионного заключаются в его изменчивости:

– от прямолинейного вертикального скального обрыва высотой до 8 м, развитого вдоль ровной плоскости скольжения с разно-ориентированными бороздами;



Рис. 6. Геоморфологические схемы аккумулятивных форм рельефа в районе эрозионно-тектонического уступа в правом борту долины р. Верхний Енисей.

(а)–(б) – точки наблюдения (т.н.): (а) – т.н. 1; (б) – т.н. 5.

Положение т.н.1, т.н.5 – см. рис. 3.

Основа – фотопланы по данным аэрофотосъемки.

Обозначено (цифры в кружках): 1 – овально-осыпной шлейф; 2 – пролювиальные конусы выноса разных генераций: 2а – поздняя; 2б – ранняя; 3 – поверхность первой надпойменной террасы.



Рис. 7. Смещения наиболее молодых форм рельефа в т.н. 3.

Положение т.н. 3 – см. рис. 3.

(а) – общий вид эрозионно-тектонического уступа в т.н. 3 (вид на север);

(б) – общий вид уступа и смещенного русла временного водотока (вид на северо-восток);

(в) – уступ с левосдвиговым смещением (вид на юго-запад);

(г) – левосдвиговое смещение отдельной глыбы (вид на юго-запад).

– до более пологого (крутизна 10° – 30°) и извилистого перегиба, частично перекрытого обвальнo-осыпным материалом.

На пересечении с сухими долинами, правым притоками р. Енисей, наблюдаются либо скальные уступы, либо сложенные перегибы с появлением локальных террас и повсеместные локальные конусы выноса. Горизонтальные смещения конусов выноса на этом участке уже не так выразительны.

Строение уступа изучено в расчистке, пройденной в западном борту портала угольной штольни в угленосных юрских песчаниках и продуктов их переотложения на склоне уступа (рис. 8).

В основании макро-уступа прослеживается пологий (до 25°) и широкий (10–20 м) вертикальный изгиб конуса выноса соседнего временного ручья. Ниже изгиба появляется современный, слабо задернованный конус выноса мощностью до 1 м.

В северной части расчистки вскрыт крутой (угол падения $\perp 75^{\circ}$ – 80°) тектонический контакт коренных песчаников с грубообломочными коллювиально-осыпными накоплениями. Коренные песчаники смяты в симметричную антиклиналь с горизонтальной осью.

Открытый в верхней части основной разрыв выполнен рыхлой тектонической брекчией, представленной несортированными, неокатанными обломками (щебень, дресва, песок, пыль) с выдавленной снизу щебнисто-угольной смесью. Разрыв проникает до дневной поверхности и смещает все слои разреза.

В опущенном крыле основного разрыва в рыхлые отложения выдавлена рыхлая, сортированная (а точнее – структурированная в результате давления), грубообломочная брекчия, представленная преимущественно щебнем и мелкими глыбами (обугленные песчаники) с заполнителем из рыхлой угольной крошки. Угольная крошка в результате давления оказалась сконцентрирована

в виде каймы вдоль верхнего контакта брекчии, который описывает контур асимметричной антиклинали, разорванной серией взбросо-надвигов. Вдоль разрыва в осевой части антиклинали залегает линза светло-серого грубозернистого песка – результат дробления и выдавливания песчаников. Брекчия имеет чрезвычайно рыхлую консистенцию и постоянно осыпалась. В силу этого, проходка расчистки глубже вскрытого интервала разреза была уже невозможна.

Ниже по склону, в опущенном крыле основного разрыва залегает толща грубообломочных коллювиально-осыпных отложений, нарушенных сериями взбросо-надвигов. Грубообломочная толща слабо стратифицирована и сильно деформирована неоднократными смещениями и вторичными изменениями, что сильно затрудняет четкое выделение и прослеживание в ней “событийных” горизонтов, фиксирующих конкретные сейсмо-тектонические подвижки.

В грубообломочной толще можно отметить закономерную вертикальную градацию с постепенным переходом от крупноглыбового коллювия к обвальнo-осыпным и осыпным, относительно хорошо сортированным отложениям и делювиально-эоловому слою (см. рис. 8, слой 2). Градация намечается и в латеральном направлении – вниз по склону происходит постепенное уменьшение количества глыб и увеличивается сортировка обломков. Вертикальная градация нарушена вдоль серии взбросо-надвигов, ответвляющихся от основного разрыва и выражена резким появлением в разрезе переотложенного коллювиального клина.

В данном случае разрывная деформация грубообломочной толщи восстанавливается вполне определенно в виде резкой ступени – взбросо-надвигового смещения грубообломочного слоя 5 на 1.2–1.5 м в вертикальной плоскости. В опущенном крыле слой 5 перекрыт коллювиальным

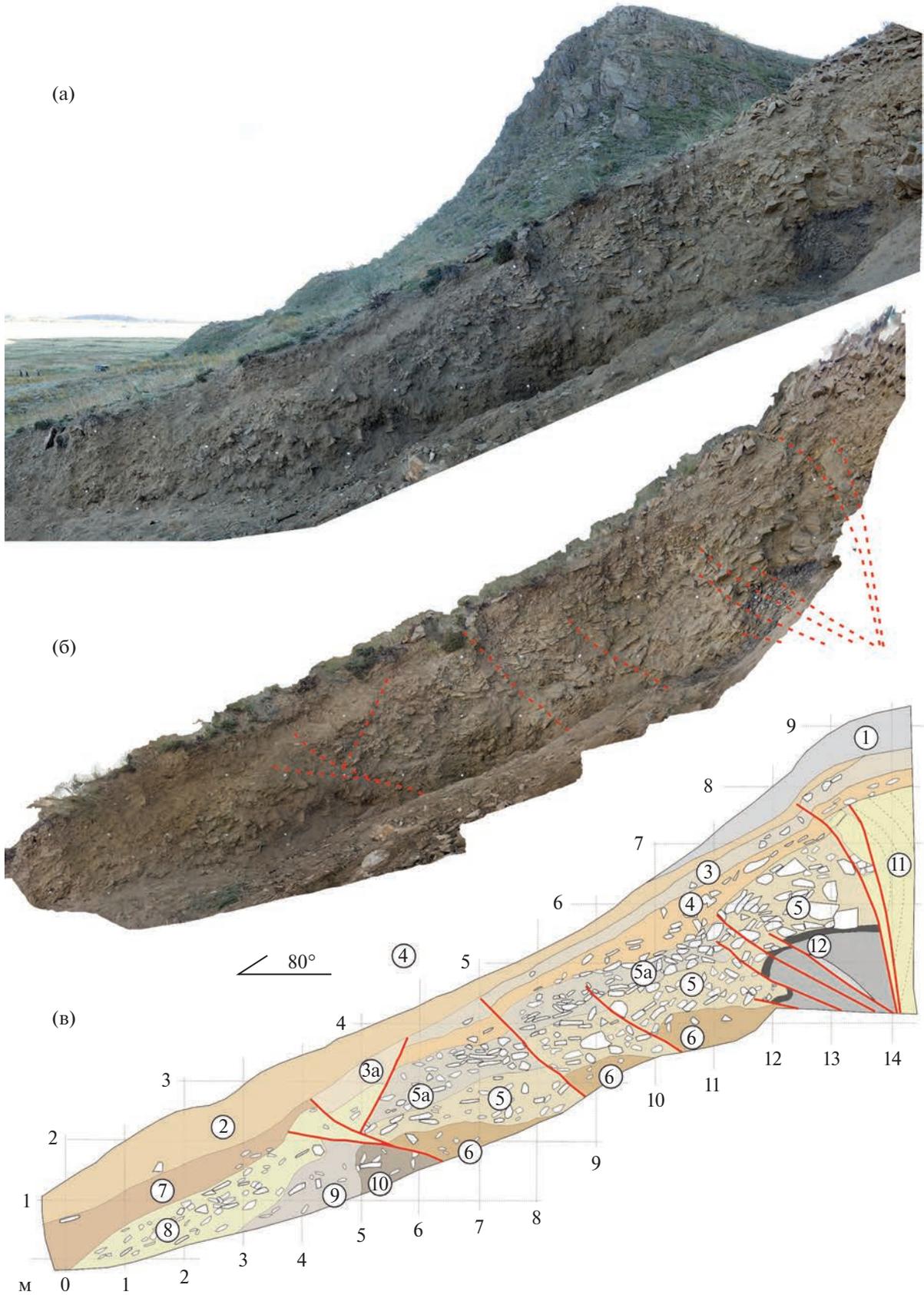
Рис. 8. Фото (а), (б) и зарисовка (в) расчистки вкостр простирания уступа.

Положение района расчистки – см. рис. 9.

Обозначены (линии красным) тектонические разрывы.

Номера слоев:

1 – отвалы штольни; 2 – пылеватая светло-коричневая супесь с редким щебнем и дресвой (делювиально-эоловые отложения); 3 – грубосортированный плитчатый щебень с редкими мелкими глыбами и светло-серым пылеватым заполнителем (осыпь); 3а – светло-серая пылеватая супесь с редким плитчатым щебнем (латеральное окончание осыпи); 4 – плитчатые глыбы с щебнем и светло-серым пылеватым заполнителем (обвальнo-осыпные отложения); 5 – крупноглыбовый коллювий с желтовато-серым пылевым, супесчаным заполнителем; 5а – то же, переотложенный с примесью плитчатого щебня из вышележащего слоя; 6 – темно-серый пылеватый грубозернистый песок с щебнем и глыбами (переотложенный элювий (?)); 7 – пылеватая светло-коричневая супесь с плитчатым грубосортированным щебнем и редкими глыбами (делювиально-эоловые отложения); 8 – плитчатые глыбы со щебнем и светло-коричневым грубозернистым песчано-пылевым заполнителем (обвальнo-осыпные отложения); 9 – щебень с редкими глыбами и темно-коричневым грубозернистым песчано-пылевым заполнителем (осыпь); 10 – осыпь с преобладанием глыб; 11 – коренные юрские песчаники, пунктирными линиями показана слоистость; 12 – рыхлая, структурированная, грубообломочная брекчия с заполнителем и каймой из рыхлой угольной крошки и линзой светло-серого грубозернистого песка.



клином, который оказался смещенным последующей подвижкой (подвижками).

У основания уступа расположен ветвистый разрыв сложной морфологии, маркируемый на поверхности изгибом конуса выноса временного ручья. В опущенном (восточном) крыле разрыва происходит резкая смена в строении разреза. Грубообломочные отложения верхней части обвальнo-осыпного разреза по разрыву резко сменяются на супесчано-обломочную фацию нижней части обвальнo-осыпного шлейфа. Крутизна залегания слоев постепенно увеличивается вниз по разрезу вплоть до субвертикального. Слои разреза здесь смяты в асимметричную антиклиналь с крутым восточным крылом, к осевой части которой приурочен ветвистый разрыв. Он имеет структуру “цветка”, характерную для сдвигов и пологое падение (5° – 20°) в западном направлении. Элементы разреза в разных крыльях разрыва по составу практически не сопоставляются, в связи с чем остается предположить существенную сдвиговую кинематику смещений.

Выходы угля вскрыты тремя штольнями в основании уступа. Они прослеживаются несогласно по отношению к крутому залеганию слоев юрских песчаников, обнаженных на склоне и бровке уступа. Вероятно, уголь был затерт в зону разлома, а его выходы оказались вытянуты вдоль основания склона уступа.

Проходка штольни в 1950 г. привела к катастрофическому взрыву. В результате взрыва штольня была завалена, добыча угля была прекращена, Эрбекское месторождение каменного угля было законсервировано [17]. Взрыв сопровождался возгоранием разрабатываемого угольного пласта. Выходы горячих газов и дыма из открытой трещины север-северо-восточного простирания свидетельствуют о продолжении подземного пожара до сих пор.

В результате взрыва возникла система разрывов длиной от 70 до 220 м, приуроченных к привершинной части водораздела (рис. 9, рис. 10).

О возрасте разрывов свидетельствуют незадернованные уступы высотой до 50 см и смещение разведочных шурфов, пройденных вкрест простирания выходов угольных пластов во второй половине 1940-х гг. [17]. Вдоль пластов угля, где уже существовали разломные зоны, представленные крупноглыбовыми тектоническими брекчиями, образовалось два разрыва субширотного простирания. Высота свежих уступов по южному разрыву до 50 см. Между субширотными разрывами расположен опущенный участок гребня отрога. Северный субширотный разрыв имеет правосдвиговую компоненту на 20–30 см, восста-

навливаемую по смещению выходов слоев песчаников и расхождению зигзагообразных бортов разрыва, южное крыло опущено – высота свежего уступа составляет 10–30 см.

О предыдущих подвижках по субширотным разрывам свидетельствуют более древние скальные уступы двух генераций высотой по 20–30 см, покрытые сажей от подземных пожаров. Кроме них, вблизи бровки скального приразломного обрыва образовалось два левых сдвига север-северо-восточного простирания, распадающихся на эшелонированную систему коротких (до 7 м) трещин растяжения субмеридиональной ориентировки. Эшелонированная система расселин, шириной до 10 м, обновилась также на скальном гребне (бровке скального обрыва). Расселины послужили источником для мелких обвалов, покрывших древний обвальнo-осыпной склон. Многочисленные крупные глыбы (размером до 8×3 м) наблюдаются на расстоянии до 160 м от основания обрыва на ровной поверхности первой надпойменной террасы. От более древнего обвала, скатившиеся глыбы отличаются полным отсутствием лишайников и пустынного загара на свежих сколах.

Таким образом, взрыв имел огромную мощность и породил активизацию горного массива с образованием разрывов, имеющих признаки сейсмотектонических, расселин на скальном гребне и аномальных перемещений крупных глыб. Перечисленные явления имели катастрофический характер, но охватили незначительную площадь, распространившись на расстояние не более 1 км от заваленной штольни. Кинематика смещений по разрывам соответствует голоценовым смещениям по основному разлому в подножии скального обрыва. Согласно шкале ESI-2007 [62] параметры эффектов отвечают интенсивности сотрясений 8 баллов.

Вторичные эффекты

Вдоль эрозионно-тектонического уступа в правом борту долины р. Верхний Енисей в ур. Джарга почти сплошным шлейфом протянулась цепочка крупноглыбовых одноактных обвалов и вторичных активных осыпей. Судя по степени покрытия лишайниками и пустынным загаром, последняя генерация возникла одновременно на всем протяжении высокого эрозионно-тектонического уступа. Отдельные крупные неокатанные глыбы (размером до 2×2 м) наблюдаются и на острове в пойме реки, фиксируя аномальный отброс в горизонтальном направлении примерно на 50 м. Самая крупная из обнаруженных глыб размером

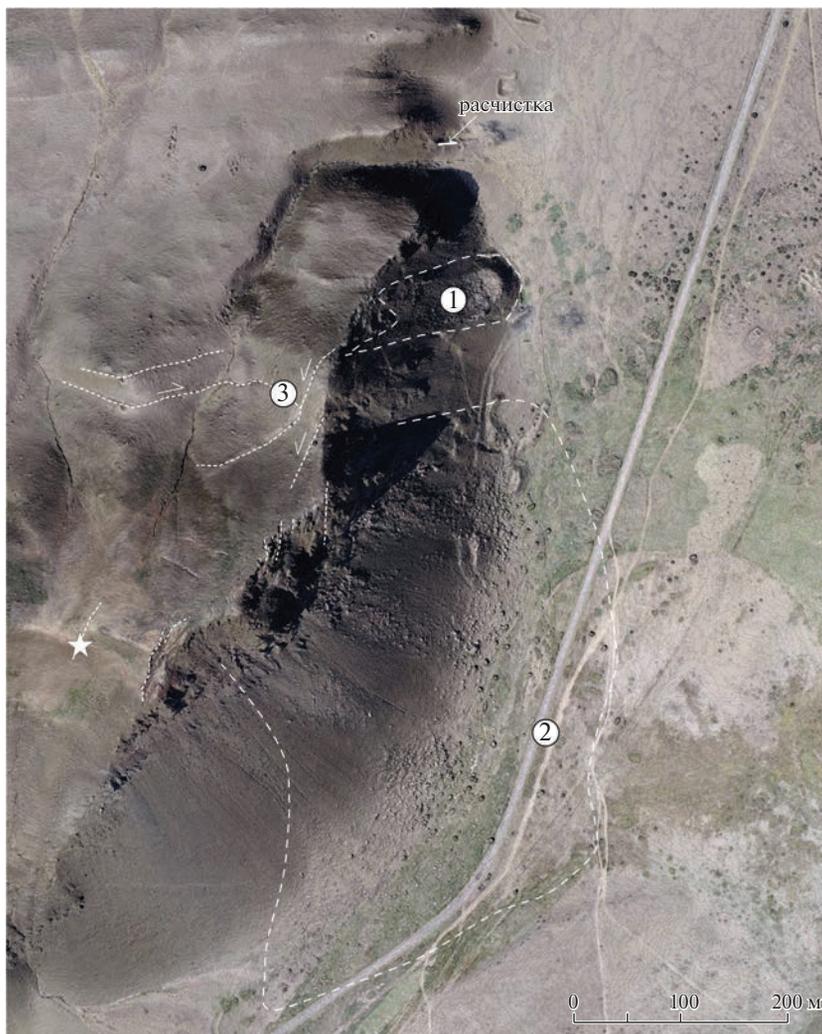


Рис. 9. Схема района расчистки.

Положение района – см. рис. 3.

Основа – фотоплан и цифровая модель рельефа по данным аэрофотосъемки. Показано (звездочка) место выхода горячих газов из трещины в результате подземного пожара.

Обозначены (цифры на схемах): 1 – древний аномальный обвал; 2 – область свежих камнепадов с аномально далеким отбросом; 3 – свежие расселины и разрывы с указанием направления горизонтальных смещений.

3 × 4 м расположена в 40 м от основания обвального шлейфа (рис. 11, а).

Эта глыба, целая во время перемещения, впоследствии раскололась на несколько частей. Вероятнее всего это произошло при ударе в результате приземления, что наблюдается в эпицентральных зонах сильных землетрясений [37].

К северо-востоку от ур. Джарга обвалы этой генерации становятся единичными. Самый северо-восточный отмечен в районе расчистки, где он соседствует с камнепадами, порожденными взрывом 1950 г. (см. рис. 9, см. рис. 10). Обвал имеет аномальное направление перемещения (по азимуту 65°), которое отклонилось от направ-

ления склона (азимут 90°–95°) на 25°–30°. Примечательно, что в противоположном, левом борту р. Верхний Енисей при схожей прочности пород, высоте и крутизне склонов такой обвальный шлейф отсутствует.

В определенных геоморфологических условиях (скальные выходы на гребнях водоразделов или бровках высоких эрозионных уступов) были обнаружены следы встряхивания глыб с аномальными смещениями против уклона рельефа, косо по отношению к нему или с разворотом вдоль оси в вертикальной плоскости, что не может быть связано с обычными склоновыми или морозобойными процессами.

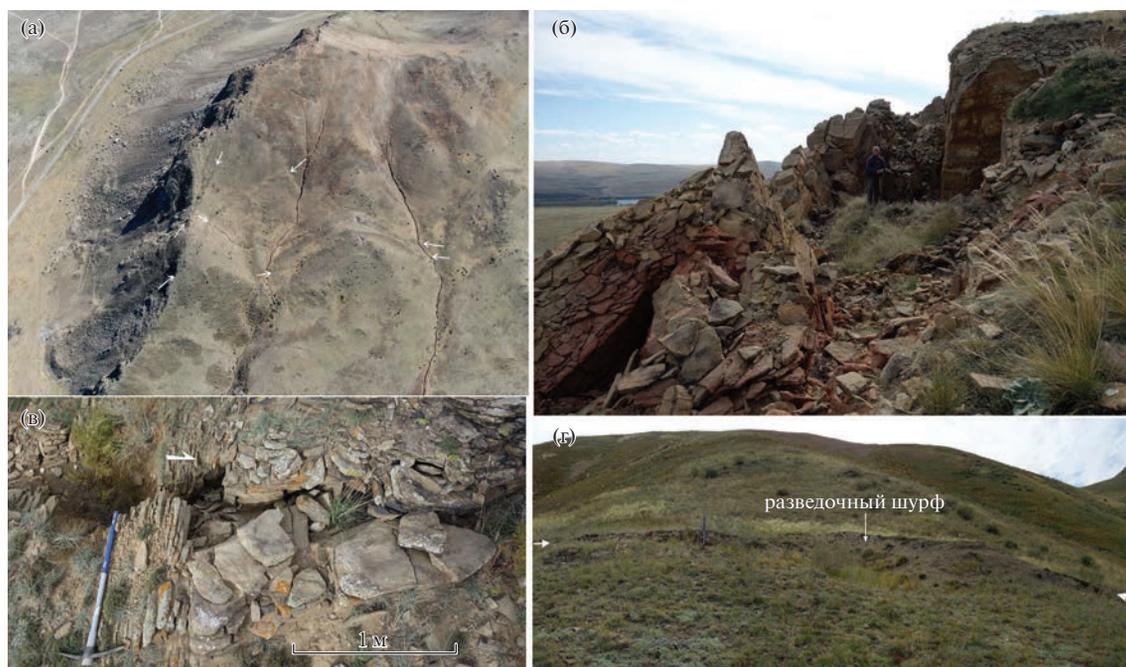


Рис. 10. Разрывы, возникшие в результате подземного техногенного взрыва в 1950 г.

(а) – общий вид активизированного массива, разрывы между стрелками, вид на юг; (б) – расселина на скальном гребне; (в) – правый сдвиг – северный субширотный разрыв; (г) – свежий уступ высотой до 50 см вдоль южного субширотного разрыва, вид на юг.

На высоком скальном обрыве в левом борту долины р. Верхний Енисей смещения носили массовый характер. На бровках скальных обрывов, скальных гребнях мелких отрогов и на поверхности водораздельного плато наблюдаются отброшенные и развернутые блоки песчаников, размер которых достигает 2×3 м. Они имеют четкие признаки воздействия мощных сейсмических импульсов – выброс в горизонтальном направлении на ровной поверхности, косо по отношению к уклону рельефа, с разворотами относительно их первичного положения вдоль оси в вертикальной плоскости, образованием расселин (см. рис. 11, б–г).

Эти нарушения можно квалифицировать как сейсмогенные деформации встряхивания и выброса [23], которые возникают при колебательных сейсмических воздействиях за счет нарушения прочностных свойств, структурных связей и сплошности пород. Деформации выброса отражают перелеты глыб по траекториям разной крутизны, возникающие, когда локальные пиковые ускорения мгновенно превышают ускорение силы тяжести. Необратимые смещения блоков пород вдоль трещин или слоев возникают в результате инерции горных масс при резких сейсмических

колебаниях или сейсмотектонических рывках горных массивов.

По результатам полевых исследований нами составлена карта, на которую вынесены наиболее уверенно определяемые деформации (см. рис. 3). Они имеют признаки аномальных смещений, которые могут использоваться как кинематические индикаторы положения относительно очага землетрясения. В качестве кинематических индикаторов рассматриваются выбросы и развороты крупных глыб, дающие преимущественную ориентацию направленности деформаций в соответствии с локальным направлением сейсмотектонического смещения, в случае близости к очагу, или распространения сейсмической волны на удалении от очага.

Замеренные направления выброса и разворота (против часовой стрелки) имеют систематический характер. Преобладают выбросы в северо-восточных румбах. Направленность выбросов скальных блоков соответствует направлению рывка земной поверхности в северо-восточном направлении в результате левосдвигового сейсмотектонического смещения юго-восточного крыла разрыва в очаге землетрясения. Согласно шкале ESI-2007 [62] параметры эффектов отвечают интенсивности сотрясений 8–9 баллов.



Рис. 11. Выбросы и развороты (их направления показаны стрелками) блоков песчаников в левом борту долины р. Верхний Енисей.

Положение точек — см. рис. 3.

(а) — отброшенная на 50 м глыба размером 3×4 м, т.н. 2 (вид на северо-запад); (б) — последовательные выдвигания плит песчаников вдоль слоистости относительно коренного залегания с разворотом против часовой стрелки, т.н. 6; (в) — выброс глыбы размером 1.5×2 м на $0.6\text{--}0.7$ м в горизонтальном направлении косо по отношению к склону, т.н. 8; (г) — выброс плиты размером 1×2 м на $0.5\text{--}0.8$ м в горизонтальном направлении с разворотом с разворотом против часовой стрелки и расщелина, сужающаяся в восточном направлении, фиксирующая выбивание скального блока в том же направлении, т.н. 7.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показали, что использование фольклора существенно расширяет рамки историко-сейсмологических исследований, накладываемые при анализе традиционно используемых письменных источников в Алтае-Саянском регионе в целом, и в Туве в частности. Но использование фольклорных данных информативно только при заверке в ходе детальных полевых исследований с использованием методов палеосейсмологии и проверке соответствия историческому контексту в письменных источниках. На основании результатов полевых исследований и фольклорных источников мы полагаем, что землетрясение произошло в интервале 1715–1758 гг. При отсутствии абсолютных датиро-

вок, эту дату вряд ли можно считать сколько-нибудь однозначной. Возможно, она будет пересмотрена в ходе более детальных исследований.

При датировании сейсмических событий на таком, относительно небольшом, удалении от современности с использованием наиболее распространенного, радиоуглеродного метода маловероятно добиться необходимой точности. Точность метода значительно варьирует в зависимости от типа датируемой органики, а обычно используемые для этого погребенные почвы — один из наименее точно датируемых субстратов в силу специфики своего длительного и сложного биогенного формирования. Поэтому исторические данные для такого интервала времени, при наличии источников, гораздо точнее.

Полученные данные показывают, что рассмотренный район заслуживает самого пристального внимания с точки зрения высокой потенциальной сейсмической опасности в столице Республики Тыва – г. Кызыл даже, если это землетрясение произошло не в 1715–1758 гг., или легенда “Джарга” повествует о каком-то другом событии.

Тем не менее, использованный подход показал свою эффективность и позволил выявить очаг сильного исторического землетрясения в зоне Улугхемского разлома. На это указывают разнообразные сеймотектонические деформации голоценового возраста – систематические левосдвиговые смещения сухих долин, конусов выноса и отдельных глыб, вписывающиеся в общерегиональные закономерности проявлений активной тектоники [46], а также сеймотектонические смещения голоценовых отложений в расчистке.

Немаловажно, что эти смещения были выявлены в стенке портала штольни, разрушенной мощнейшим взрывом, который был вызван попыткой добычи угля в зоне активного разлома. Этот трагический пример показывает, для чего нужны исследования активной тектоники в прикладных целях. По своей силе взрыв был сопоставим с землетрясением интенсивностью 8 баллов на очень ограниченной территории (в радиусе примерно 1 км), т.е. с неглубоким (сотни м–первые км) положением очага в недрах.

Закартированные сеймотектонические смещения наиболее древних форм рельефа – конусов выноса варьируют в двух интервалах: 25–30 м и 50–55 м. Возможно, различия в величине смещений напрямую связаны с возрастом долин, а точнее – конусов выноса. Смещения более молодых форм рельефа – русел временных водотоков составили:

- 16 м (см. рис. 6, а: т.н. 1);
- 9 м (см. рис. 6, а: т.н. 1);
- 6 м (см. рис. 6, б: т.н. 4);
- 4–5 м (см. рис. 7: т.н. 2, т.н. 3).

Левосдвиговые смещения глыб составили 50–70 см (см. рис. 7: т.н. 3).

Полученные цифры дают очень большой разброс. Левый сдвиг глыб на 50–70 см мог быть связан с частным разрывом в пределах зоны сеймотектонического нарушения и не отражать полную амплитуду подвижки. Амплитуды смещений 4–9 м также могли накопиться за несколько подвижек. В тоже время, величина 50–70 см получена нами не по одному определению, а сдвиги русел на 4–9 м могут быть тесно связаны с изменениями климата, а точнее – увлажненности, т.е. полученные величины сдвигов привязаны к интервалу време-

ни, прошедшего не только после смещения (смещений), но и после формирования долины. Кроме того, в этих оценках не учитывается вертикальная компонента подвижки, что характеризует полученные цифры смещения глыб на 50–70 см как минимальные величины смещений, тогда как величину 4 м можно использовать в качестве максимального смещения.

Для оценки магнитуды также используется длина сейсморазрыва. Длина прослеженного уступа, смещения вдоль которого изучены и в рельефе, и в молодых отложениях, составляет 15 км. С возможным его продолжением на запад, длина составит 27 км. В случае продолжения одноактного уступа до окрестностей г. Кызыл, куда протягивается неизученный нами прямолинейный уступ в правом борту долины р. Верхний Енисей, длина его может составить 46 км.

Полученные в результате проведенного исследования данные дают разброс для оценки магнитуды события для нескольких доверительных интервалов. Согласно соотношениям [71] разброс составляет:

- по величине смещений $M_w = 6.8–6.9$ (50–70 см), $M_w = 7.3$ (4 м);
- по длине разрыва – $M_w = 6.5$ (15 км), $M_w = 6.8$ (27 км), $M_w = 7.0$ (46 км).

Полученный разброс можно рассматривать в качестве отправных точек в исследованиях сейсмической опасности и энергетического потенциала недр района Кызыльской впадины. Наиболее надежны оценки по длине сейсморазрыва – $M_w = 6.5–7.0$.

ВЫВОДЫ

Проведенное нами исследование и полученные результаты привели к следующим выводам.

1. Интенсивность землетрясения в эпицентре, расположенном в районе п. Усть-Элегест, достигла 8–9 баллов по шкале ESI-2007, магнитуда составила $M_w = 6.5–7.0$ (6.8–7.3).

2. Полученные результаты позволили четко определить северную границу Кызыльской межгорной впадины как разломную с взбросо-надвигово-левосдвиговой кинематикой смещений в голоцене.

3. По отношению к структурам предыдущего этапа тектонической активизации (мезозойского), эта граница не является унаследованной, т.к. зона Улугхемского разлома пересекает примерно посередине мезозойскую впадину. Северная часть мезозойской впадины оказалась вовлеченной в поднятие и представлена среднегорным массивом.

Южная часть мезозойской впадины частично перекрыта неоген–четвертичными отложениями.

4. Выявление эпицентральной зоны исторического землетрясения имеет принципиальную важность для исследований сейсмической опасности г. Кызыл – столицы Республики Тыва.

Благодарности. Авторы благодарят рецензента Л.П. Имаеву (ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия) и анонимных рецензентов за комментарии. Авторы благодарят редактора М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Обработка материалов и завершающие полевые работы 2022 г. выполнены в рамках гранта РНФ № 22-17-00049, полевые исследования 2018–2021 гг. выполнены по госзадачу ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский Ю.С., Алексеенко В.Д., Беляев Г.М., Блюман Б.А., Булычев А.В., Должковой Б.М., Кудрявцев В.Е., Кухаренко Е.А., Минаков А.Н., Минина Е.А., Мухин В.Н., Никитина Л.С., Попова Н.Н., Радюкевич Н.М., Сахибгареев Ю.З., Шор Г.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. – М-б 1 : 1000000 (третье поколение). – Лист М-46 – Кызыл. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. 349 с.
2. Аржанников С.Г. Палеосейсмодислокации в зоне влияния Оттугтайгино-Азасского разлома (Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 11. С. 1501–1510.
3. Аржанников С.Г., Зеленков П.Я. Сильные палеоземлетрясения хребта Академика Обручева (Восточная Тува). – В сб.: *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. – Под ред. В.И. Уломова. – М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2–3. С. 323–330.
4. Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. Палеосейсмогенная активизация Большеозерского сегмента Эрзино-Агардагского разлома // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 56–66.
5. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
6. Бутанаев Ю.В., Овсюченко А.Н., Сугоракова А.М. Первые результаты историко-сейсмологического анализа тувинского фольклора для оценки сейсмической опасности Республики Тыва // Новые исследования Тувы. 2018. № 3. С. 190–204. <https://doi.org/10.25178/nit.2018.2.12>
7. Вдовин В.В., Зеленков П.Я. Сейсмогенные формы рельефа Тувы и Западного Саяна. – В кн.: *Закономерности развития рельефа Северной Азии*. – Под ред. В.А. Николаева, Н.А. Флоренсова. – Новосибирск: Наука, 1982. С. 99–106.
8. Геологическая карта России и прилегающих акваторий. – М-б 1 : 2500000. – Под ред. О.В. Петрова. – СПб.: ВСЕГЕИ, ВНИИОкеангеология, 2016. 1 л.
9. Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Сергеева Н.А., Белов И.О., Рыбкина А.И. Зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны // Физика Земли. 2018. № 3. С. 18–28. <https://doi.org/10.7868/S000233371803002X>
10. Гладков А.С., Лунина О.В. Сейсмита юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 3. С. 249–272. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0020>
11. Глушков Ю.В., Куртенков К.Е., Покояков С.Н., Орехова О.И., Гуменюк А.А., Гуменюк М.А., Куртенкова Т.В. Групповая геологическая съемка масштаба 1 : 50000 и общие поиски полезных ископаемых на Элегестской площади в пределах листов М-46-8-Г; -9-А, Б, В, Г; -10-А, В; -20-В, Г; -21-А, Б, В, Г; -22-А, В; -33-А, Б. – Кызыл: Тувинская ГРЭ, ГП Красноярскгеология, 1991. 988 с.
12. Горбатов Е.С., Разумный С.Д., Стрельников А.А., Родина С.Н. Выявление Чупинской сейсмогенной структуры (Северная Карелия) и параметризация палеоземлетрясений в районе Кандалакшского грабена // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 1. С. 24–50. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.1-2>
13. Деев Е.В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // Физика Земли. 2019. № 3. С. 71–96. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>
14. Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 20–30.
15. Зеленков П.Я. Сейсмогенные деформации земной поверхности Западного Саяна. – В кн.: *Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области*. – Под ред. В.П. Солоненко, В.А. Николаева. – Новосибирск: Наука, 1978. С. 28–42.
16. Зятькова Л.К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. – Под ред. В.А. Николаева. – Новосибирск: Наука, 1977. 215 с.
17. Колямкин В.М., Поваров М.Ю., Александровский Ю.С., Аляев В.А., Берзон Е.И., Петрухина О.Н., Минина В.С., Шаталина Т.А., Сосновская О.В., Корневская Т.Н., Пиманова Г.П. Геологическое доизучение масштаба 1 : 200000 листа М-46-V (Кызыл). – Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 2015. 392 с.
18. Масарский С.И., Рейснер Г.И. Новейшие тектонические движения и сейсмичность Западного Саяна и Западной Тувы. – Под ред. В.А. Петрушевского. – М.: Наука, 1971. 156 с.
19. Минина Е.А., Борисов Б.А. Карта четвертичных отложений Тувинской АССР. – М-б 1 : 500000. – Объяснительная записка. – Л.: ВСЕГЕИ. 1988. 120 с.

20. *Моссаковский А.А., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н.* Центрально-Азиатский складчатый пояс: геодинамическая эволюция и история формирования // *Геотектоника*. 1993. № 6. С. 3–32.
21. *Мушкетов И.В., Орлов А.П.* Каталог землетрясений Российской империи. — СПб.: Типогр. Императорской Академии наук, 1893. 582 с.
22. *Никонов А.А.* Землетрясения в легендах и сказаниях // *Природа*. 1983. № 11. С. 66–75.
23. *Никонов А.А.* Терминология и классификация сейсмогенных нарушений рельефа // *Геоморфология*. 1995. № 1. С. 4–10.
24. *Никонов А.А.* О сильнейших исторических землетрясениях и сейсмическом потенциале Горного Алтая // *Физика Земли*. 2005. № 1. С. 36–50.
25. *Никонов А.А., Медведева Н.С., Шварев С.В., Флейфель Л.Д.* Главные особенности развития сейсмического процесса 2011–2012 гг. в Республике Тыва (прогностический аспект) // *Вестн. ОНЗ РАН*. 2012. № 4. NZ5001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000113>
26. *Никонов А.А., Нечаев С.Ю., Флейфель Л.Д.* О сейсмичности Алтайского региона во второй половине XVIII века. — В сб.: *Необычные и экстремальные явления XVIII века*. — Под ред. Н.В. Колпаковой. — СПб.: БАН, 2019. Вып. 2. С. 152–188.
27. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. — Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. — М.: Наука, 1977. 535 с.
28. *Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кузугет К.С.* О повторяемости сильных сейсмических событий в районе Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. по данным палеосейсмологических исследований // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 11. С. 1784–1793. <https://doi.org/10.15372/GiG20171112>
29. *Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Сугоракова А.М., Ларьков А.С., Мараханов А.В.* Исследования Каахемской системы активных разломов в Туве: сегментация и модель характерных землетрясений // *Геосферные исследования*. 2019. № 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.17223/25421379/9/1>
30. *Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Тулуш Д.К.* Палеосейсмологические и археосейсмологические исследования южной части хребта Танну-Ола // *Природные ресурсы: Среда и общество*. 2019. № 4. С. 26–33.
31. *Овсюченко А.Н., Новичихин А.М., Быхалова О.Н., Рогожин Е.А., Корженков А.М., Ларьков А.С., Бутанаев Ю.В., Лукашова Р.Н.* Междисциплинарное датирование Утришских сейсмодислокаций: к локализации очага сильного исторического землетрясения на Западном Кавказе // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2019. Т. 46. № 3. С. 32–49. <https://doi.org/10.21455/VIS2019.3-4>
32. *Панин А.В.* Первые данные о позднеголоценовой сейсмике юго-западного замыкания Байкальской рифтовой зоны // *ДАН*. 2011. Т. 438. № 1. С. 76–81.
33. *Прудников С.Г.* Морфоструктурное районирование территории Саяно-Тувинского нагорья // *География и природные ресурсы*. 2016. № 3. С. 111–117. <https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2016-3>
34. *Раковец О.А.* Неотектоника Тувы. // *Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области*. — Под ред. В.П. Солоненко, В.А. Николаева. — Новосибирск: Наука, 1978. С. 48–58.
35. *Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмоструктуры. — М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.
36. *Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В.* Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 31–51.
37. *Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С.* Очаг сильного землетрясения как геологический объект // *Геотектоника*. 2021. № 3. С. 3–30. <https://doi.org/10.31857/S0016853X21030073>
38. *Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В.* Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3. № 3. С. 203–237. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0072>
39. *Самдан А.А.* Тувинские монголоязычные летописи. — Под ред. А.Д. Цендиной. — Абакан: ТИГПИ, 2016. 185 с.
40. *Самдан З.Б.* Миф в фольклорной традиции тувинцев. — Отв. ред. М.М.-Б. Харунова — Новосибирск: Наука, 2016. 180 с.
41. *Сафьянов И.Г.* Тува в прошлом. — Т. 1. — Художественное творчество тувинского народа. — М.: ТувИГИ, 2012. 232 с.
42. СКЗ ОСР-2012. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии для общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. — Отв. ред. В.И. Уломов. — М.: 2012. www.seismorus.ru
43. *Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г.* Макросейсмические сведения об Алтайских землетрясениях 1764–1913 гг. // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2014. Т. 41. № 4. С. 25–56.
44. *Трифонов В.Г., Караханян А.С.* Геодинамика и история цивилизаций. — Под ред. Ю.Г. Леонова. — М.: Наука, 2004. 668 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 553).
45. *Трифонов В.Г., Кожурин А.И.* Проблемы изучения активных разломов // *Геотектоника*. 2010. № 6. С. 79–98.
46. *Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М.* Активная тектоника Центральной Азии // *Геотектоника*. 2021. № 3. С. 60–77. <https://doi.org/10.31857/S0016853X21030097>
47. *Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д.* Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. — Под ред. В.П. Солоненко и Н.А. Флоренсова — М.: Наука. 1985, 244 с.
48. *Чернов Г.А., Зеленков П.Я.* Сейсмогеология области Западно-Тувинских поднятий. — В кн.: *Сейсмогео-*

- логия восточной части Алтае-Саянской горной области. – Под ред. В.П. Солоненко, В.А. Николаева. – Новосибирск: Наука, 1978. С. 58–68.
49. Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–947.
 50. Шпанский А.В., Михаревич М.В., Новиков И.С., Зольников И.Д., Прудников С.Г., Кальная О.И. Дискуссионные вопросы геоморфологии и палеогеографии долины Верхнего Енисея // Геоморфология. 2020. №. 3. С. 98–105.
<https://doi.org/10.31857/S0435428120030104>
 51. Ямских А.Ф. Осадконакопление и террасообразование в речных долинах Южной Сибири. – Красноярск: КГПИ. 1993. 226 с.
 52. Arzhannikov S.G., Ivanov A.V., Arzhannikova A.V., Demanterova E.I., Jolivet M., Buyantuev V.A., Oskolkov V.A., Voronin V.I. The most recent (682–792 CE.) volcanic eruption in the Jombolok lava field, East Sayan, Central Asia triggered exodus of Mongolian pre-Chinggis Khaan tribes (778–786 CE) // J. Asian Earth Sci. 2016. Vol. 125. No. 1. P. 87–99.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.017>
 53. Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic geomorphology, (Wiley&Blackwell, Chichester. GB. 2012. 2nd edn.), pp. 454.
 54. Cloetingh S., Burov E.B., Poliakov A. Lithospheric folding: primary response to compression? (from Central Asia to Paris basin) // Tectonics. 1999. Vol. 18. P. 1064–1083.
 55. Deev E., Turova I., Borodovskiy A., Zolnikov I., Pozdnyakova N., Molodkov A. Large earthquakes in the Katan Fault zone (Gorny Altai): Paleoseismological and archaeoseismological evidence // Quaternary Sci. Rev. 2019. No. 203. P. 68–89.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.11.009>
 56. Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // Tectonophysics. 2013. Vol. 602. P. 194–222.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.010>
 57. Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes // Int. Geol. Rev. 1996. Vol. 38. No. 5. P. 430–466.
 58. Huang Z., Zhao D. Seismotectonics of Mongolia and Baikal rift zone controlled by lithospheric structures // Geophys. Res. Lett. 2022. No. 49. e2022GL099525.
<https://doi.org/10.1029/2022GL099525>
 59. Korjenkov A.M., Arrowsmith J.R., Crosby C., Mamyrov E., Orlova L.A., Povolotskaya I.E., Tabaldiev K. Seismogenic destruction of the Kamenka medieval fortress, northern Issyk-Kul region, Tien Shan (Kyrgyzstan) // J. Seismology. 2006. No. 10. P. 431–442.
<https://doi.org/10.1007/s10950-006-9029-8>
 60. Marco S. Recognition of earthquake-related damage in archaeological sites: Examples from the Dead Sea fault zone // Tectonophysics. 2008. Vol. 453. P. 148–156.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.04.011>
 61. McCalpin J.P. (Ed.) Paleoseismology, (Elsevier, NY. USA. 2009. 2nd edn.), pp. 613.
 62. Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpinar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007 // Spec. Pap. APAT. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia. 2007. Vol. 74. pp. 41.
 63. Molev E.A., Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Potential traces of earthquakes in the ancient city of Kytaia, Kerch Peninsula, Crimea // Geodes. Geodynam. 2019. No. 10. P. 331–338.
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.03.006>
 64. Nikonov A.A. “On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments,” in *Monuments and Historical Sites, Preservation and Protection. Rotterdam: Balkema*, – Ed. by P.G. Marinou, G.S. Koukis, (Engineer Geol. Ancient Works, 1988), P. 1315–1320.
 65. Nur A., Burgess D. Apocalypse: Earthquakes, Archaeology, and the Wrath of God. Princeton: Princeton Univ. Press, 2008. pp. 310.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1t1kfgz>
 66. Obermeier S.F., Jibson R.W. Using ground-failure features for paleoseismic analysis // US Geol. Surv. Open-File Rep. 1994. No. 94–663.
 67. Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Marakhanov A.V., Butanaev Yu.V., Larkov A.S., Novikov S.S. Environmental effects of the 2011–2012 Tuva earthquakes (Russia): Application of ESI 2007 macroseismic scale in the Siberian mountains // Rus. J. Earth Sci. 2017. Vol. 17. No. 1. ES1002.
<https://doi.org/10.2205/2017ES000590>
 68. Piccardi L., Masse W.B. Myth and Geology, (Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2007. Vol. 273), pp. 350.
 69. Radziminovich Ya.B., Shchetnikov A.A. Historical earthquakes studies in Eastern Siberia: State-of-the-art and plans for future // J. Asian Earth Sci. 2013. Vol. 62. P. 134–145.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.017>
 70. Stiros S.C. Archaeology – A tool to study active tectonics // Eos, AGU Transact. 1988. Vol. 69. No. 50. P. 1633–1639.
 71. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // Bull. Seis. Soc. Am. 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974–1002.
 72. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global.
<https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>
 73. Esri ArcGIS Desktop, <https://www.esri.com/en-us/home/> (December, 2022).
 74. FRC EGS RAS. <http://www.ceme.gsras.ru> (Accessed December, 2022).

Localization of the Source of a Strong Historical Earthquake in Central Tuva Using Folklore-Historical and Paleoseismological Data

A. N. Ovsyuchenko^{a, c, *}, Y. V. Butanayev^{b, c}, N. G. Koshevoy^{a, c}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bol'shaya Gruzinskaya St. bld. 10, 123995 Moscow, Russia*

^b*Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources SB RAS,
Internatsionalnaya St. bld. 117a, 667010 Kyzyl, Republic of Tyva, Russia*

^c*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane bld. 7, 119017 Moscow, Russia*

**e-mail: ovs@ifz.ru*

The article presents the results of studies of the source of a strong earthquake in Central Tuva. The studies were carried out using both the widespread geological and geomorphological approach of paleo-seismological orientation, and the methods of historical seismology. Primary information about the source and its location was found in folklore sources with a toponymic reference, using which traces of the earthquake were found and mapped on the field. Traces of earthquakes are confirmed by seismic ruptures in the zone of the Ulugkhem active fault and secondary evidences. Preliminary dating of the event is 1715–1758, magnitude $M_w = 6.5–7.0$. The intensity of the earthquake at the epicenter reached VIII–IX (ESI-2007 scale). In the zone of the Ulugkhem active fault, the consequences of the catastrophic explosion of 1950, which led to human casualties and destruction, were mapped. The results of the research make it possible to clearly define the northern boundary of the Kyzyl intermountain basin as a fault with reverse-sinistral kinematics of displacements in the Holocene, and identification of the epicentral zone of a historical earthquake is necessary to assess the seismic hazard of the most densely populated region of Tyva Republic.

Keywords: active tectonics, paleoseismology, seismotectonics, historical seismology, seismic hazard, earthquake source, Altai–Sayan Highlands, Central Tuva

УДК 551.243.6(470.56)

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ОРЕНБУРГСКОЙ РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ПЕСЧАНИКОВ ИЗ ПОРОД НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Е. А. Данилова*

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Амундсена, д. 100, 620016 Екатеринбург, Россия*

**e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru*

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

После повторной доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Проведено исследование глубинного строения Оренбургской радиально-концентрической структуры в фундаменте Русской платформы по сеймотектоническим и геоморфологическим данным. Для этого выполнена интерпретация временных региональных сейсмических профилей, пересекающих структуру, с выделением главных глубинных разломов и замером углов падения. Выявлено, что радиально-концентрическая структура представляет собой крупную цветковую структуру. В ее строении участвуют основные разнонаправленные глубинные нарушения, падающие под углами $\angle 60^{\circ}–85^{\circ}$ и ограничивающие в фундаменте зоны горстов или взбросов. Установлено иерархическое строение разломов структуры. Месторождения нефти и газа приурочены к основным глубинным дислокациям Оренбургской структуры и представляют собой морфологические цветковые структуры малых размеров. Выполнено экспериментальное моделирование формирования цветковых структур с использованием данных акустической эмиссионной активности пород и под действием флюидодинамических нагрузок, произведенных на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия) на образцах зерна песчаников из пород-коллекторов нефтяных месторождений Западной Сибири. Разработанная модель показала, что образование цветковых структур может происходить без горизонтального сдвига за счет бокового сжатия и глубинного давления. С помощью метода сейсмоакустической эмиссии были зафиксированы характерный шум при образовании трещин в образцах зерна, затихание звука перед раскалыванием и затем его резкое взрывное увеличение от разрыва сплошности породы. Анализ зерна скважин, пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявил, что в породах осадочного чехла имеется достаточно много признаков гидротермальных флюидных разгрузок, таких как волнистая (или плейчатая) слоистость, своеобразные текстуры и интервалы брекчий, скорлуповидная форма включений, стиллотитовые швы, флюидалные текстуры. Сделан вывод о том, что генезис Оренбургской радиально-концентрической структуры связан с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов, высокого давления и имеет общность со взрывными кольцевыми структурами шитов и платформ.

Ключевые слова: Оренбургская радиально-концентрическая структура, временные сейсмические разрезы, глубинные разломы, цветковая структура, экспериментальное моделирование, взрывные структуры, месторождения нефти и газа, признаки гидротермальных флюидных нагрузок

DOI: 10.31857/S0016853X23020029, **EDN:** FZHXP

ВВЕДЕНИЕ

В 2021–2022 гг. в фундаменте Русской платформы по сеймотектоническим и геоморфологическим данным автором была выявлена Орен-

бургская радиально-концентрическая структура $\varnothing > 250$ км, генетически связанная с современными геодинамическими процессами в земной коре [9, 10] (рис. 1).

Внутри нее в осадочном чехле закономерно распределены уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение, более мелкие залежи углеводородов и структуры, выявленные сейсморазведочными работами [10].

Оренбургское месторождение, приуроченное к центру структуры, предположительно стало результатом функционирования главных очагов генерации углеводородов в фундаменте [19]. Вдоль радиальных и концентрических разломов Оренбургской радиально-концентрической структуры, а также в зонах их пересечения, сосредоточены месторождения углеводородного сырья меньшего размера (см. рис. 1).

По этим зонам происходит миграция углеводородов [16, 20, 24, 31, 33, 36, 37, 39, 41]. К образованию месторождений нефти и газа или перераспределению сформировавшихся залежей углеводородов в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры привели неотектонические сдвиговые деформации [1, 33, 34].

Радиально-концентрические структуры связаны с процессами очаговой геодинамики, мантийного диапиризма и вулканизма [4, 15, 16, 20, 24].

В работе В.И. Ваганова и др. [3] на примере Западной Сибири описано образование подобных структур на платформах и щитах, связанное с природными газовыми взрывами. Было показано, как под воздействием глубинных потоков тепла и флюидов в фундаменте под огромным давлением, происходило куполообразование, при котором сначала возникает система конических трещин и начинается подъем диапира, сопровождающийся мощными подземными взрывами, а затем происходит взрыв в центре структуры, при котором образуются система радиальных и кольцевых разломов, конических и наклонных трещин [3]. В строении разломов подобных структур наблюдается иерархия, т.к. при последующих взрывах формируются системы более мелких кольцевых и радиальных разломов, приуроченных к главным тектоническим нарушениям.

Результаты мониторинга современных геотектонических процессов свидетельствуют о том, что сейсмическая активность на древней Русской платформе еще не прекратилась [17]. За последние годы в центре Оренбургской радиально-кон-

центрической структуры, в зонах пересечения радиальных и концентрических разломов зарегистрировано значительное количество эпицентров сейсмических событий [10], поэтому модель Ваганова В.И. и др. [3] вполне может быть применена для объяснения ее природы [28–30, 32, 38, 42–44].

Целью нашей работы является изучение глубинного строения Оренбургской радиально-концентрической структуры, экспериментальное моделирование ее структур и анализ имеющихся и полученных данных, свидетельствующих о связи данной структуры с природными газовыми взрывами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения глубинного строения выполнена интерпретация временных региональных сейсмических профилей, пересекающих Оренбургскую радиально-концентрическую структуру (см. рис. 1), с выделением главных глубинных разломов, которые можно трассировать из пород фундамента в осадочный чехол, и замером углов падения.

Автором для проведения экспериментального моделирования радиально-концентрических структур были проанализированы результаты исследований акустической эмиссионной активности пород под действием флюидодинамических нагрузок, выполненных в ИГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия) на установке УИК-АЭ (произведена в ИГ УрО РАН, Россия [12, 14, 25, 26]).

Визуальный анализ признаков гидротермальных флюидных разгрузок в породах производился в соответствии с атласом структур и текстуру флюидно-эксплозивных пород [27] по керну 319 скважин, пройденных бурением в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ОРЕНБУРГСКОЙ РАДИАЛЬНО- КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Оренбургская радиально-концентрическая структура, существование которой подтверждается результатами дешифрирования космического снимка [10], большей своей частью приурочена

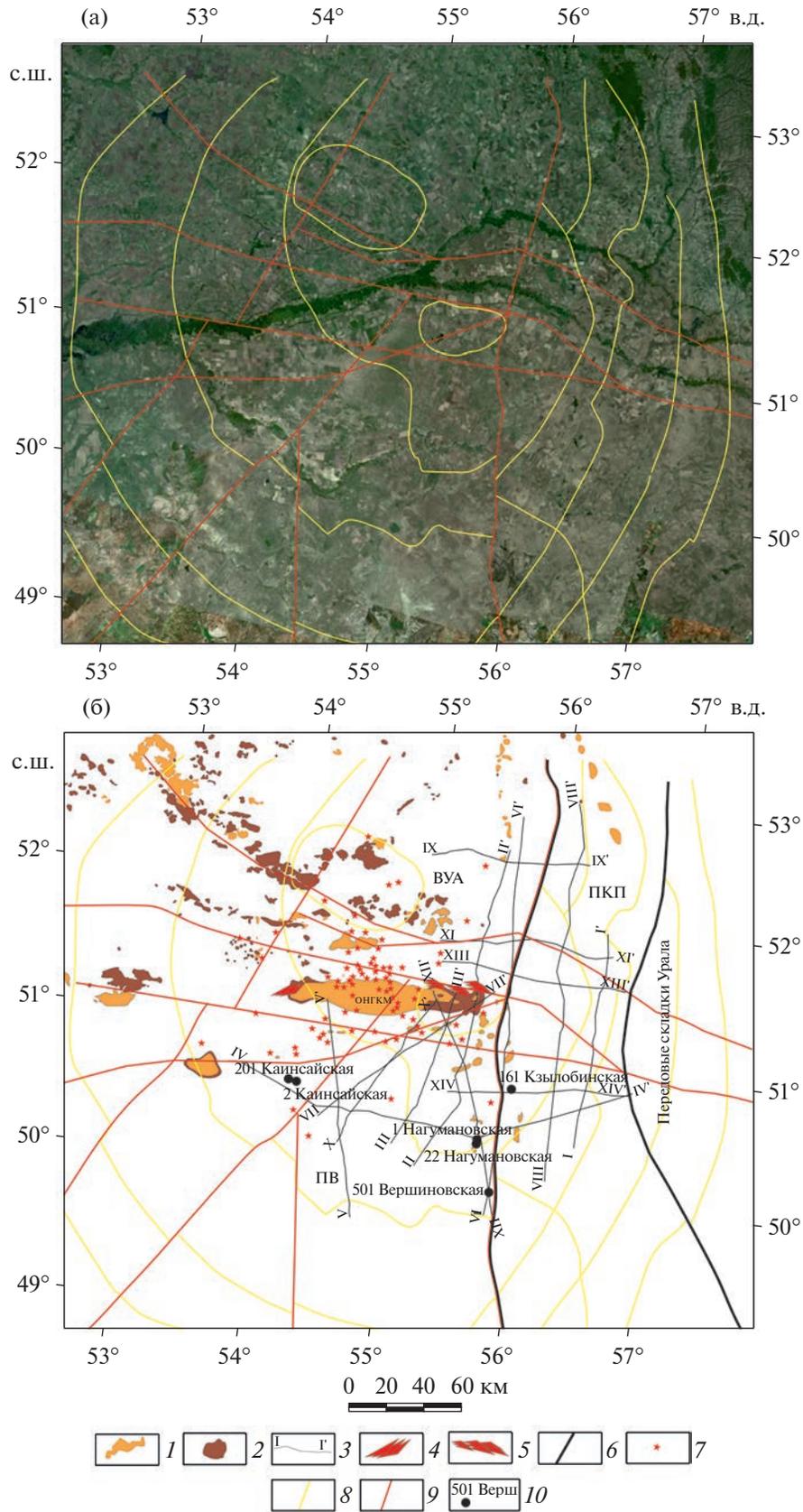
Рис. 1. Геологическая карта Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – космический снимок региона, по [45];

(б) – карта-схема региона.

Обозначено: I – Волго-Уральская антеклиза, II – Прикаспийская впадина, III – Предуральский краевой прогиб, IV – передовые складки Урала.

I–2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – сейсмические профили и их обозначение; 4–5 – геодинамически активный очаг генерации углеводородов: 4 – Западно-Оренбургский, по [19], 5 – Восточно-Оренбургский, по [19]; 6 – границы Предуральского краевого прогиба; 7 – сейсмические события, по [17]; 8 – концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 9 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа; 10 – скважина, ее номер, название площади



к Волго-Уральской антеклизе, на юге переходит в Прикаспийскую впадину, на востоке – в Предуральский краевой прогиб и передовые складки Урала (см. рис. 1).

В строении разреза Оренбургской радиально-концентрической структуры участвуют породы архейско-протерозойского фундамента и нижнеордовикско-четвертичного осадочного чехла.

Предуральский краевой прогиб характеризуется постепенным опусканием фундамента с севера на юг и резким погружением по субмеридиональным разломам от бортовых зон к центральной части, достигая в некоторых местах глубины до 20 км [8].

В районе Волго-Уральской антеклизы и Прикаспийской впадины наблюдается погружение фундамента в южном направлении, глубина залегания составляет от 5 до 14 км. В том же направлении возрастает мощность терригенно-карбонатного осадочного чехла, геологическое строение которого осложнено солянокупольной тектоникой. Протяженные соляные гряды кунгурских отложений вытянуты вдоль бортовых зон Прикаспийской впадины и Предуральского краевого прогиба [9, 10].

На территории Оренбургского месторождения эвапориты образуют субширотные гряды северо-западного простирания, кулисообразно смещающиеся по линиям сдвигов северо-восточной ориентировки [8–10]. Это же направление простирания имеют глубинные разломы, пересекающие Оренбургскую радиально-концентрическую структуру, выявленные при дешифрировании космического снимка [10] (см. рис. 1).

В осадочном чехле юго-запада Оренбургской области открыто большое количество залежей нефти и газа, приуроченных к терригенным и карбонатным пластам-коллекторам отложений девонской, каменноугольной и пермской систем. Нами было установлено, что большая их часть – это неотектонические структуры “цветка” [8].

Вертикальное смещение и значительное опускание фундамента в районе Предуральского краевого прогиба фиксируется геофизическими методами [8]. Контуры Оренбургской радиально-концентрической структуры свидетельствуют о том, что это событие произошло после формирования структуры при незначительном смещении фрагментов кольцевых разломов структуры [10] (см. рис. 1).

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР

По результатам интерпретации временных региональных сейсмических профилей были составлены схематические разрезы, демонстрирующие строение поверхности кристаллического

фундамента, солевых (кунгурских) и подсолевых (верхнепротерозойско-нижнепермских) отложений, а также углы падения основных глубинных разломов, трассирующихся из фундамента в солевые и надсолевые (уфимско-четвертичные) породы (рис. 2).

Установлено, что в центре Оренбургской радиально-концентрической структуры углы падения глубинных разломов составляют от $\angle 60^\circ$ до 85° (см. рис. 1 и 2 профили II–II', III–III', V–V', VII–VII', X–X', XII–XII', XIII–XIII'). Нарушения ограничивают в фундаменте зоны горстов или взбросов, направлены в противоположные стороны, образуя структуру цветка. Аналогичные углы падения глубинных разломов зафиксированы в направлении от центра Оренбургской структуры в сторону Прикаспийской впадины (см. рис. 1; см. рис. 2, профили II–II', III–III', V–V', VII–VII', X–X'). На разрезах, пересекающих Предуральский краевой прогиб, углы падения тектонических нарушений составляют от $\angle 75^\circ$ до 85° , дислокации разнонаправлены (см. рис. 1; см. рис. 2, профили I–I', IV–IV', VIII–VIII', IX–IX', XI–XI', XIV–XIV').

На геологической карте красным цветом мы выделили радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявленные при дешифрировании космического снимка, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа [10] (см. рис. 1). На схематических разрезах данные разломы также отмечены красным цветом, имеют углы падения от $\angle 60^\circ$ до 90° . Возможно, являясь главными путями миграции углеводородов, именно они повлияли на формирование и перераспределение залежей нефти и газа, а значит, новые месторождения стоит искать в районах их развития.

Если принять во внимание, что месторождения нефти и газа, сосредоточенные в зонах пересечения радиальных и концентрических разломов Оренбургской радиально-концентрической структуры, также представляют собой цветковые структуры, но значительно меньшего размера, с углами падения разломов $\angle 50^\circ$ – 85° [8], то в ее облике мы наблюдаем иерархию разломов, аналогичную строению взрывных кольцевых структур молодых платформ и шитов [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЦВЕТКОВЫХ СТРУКТУР

Цветковые структуры – это тектонические элементы в земной коре, образование которых связано с деформациями сдвига, сопряженного с боковым сжатием [5, 13, 21, 35]. К ним приурочены месторождения нефти и газа Восточно-Европейской платформы, Предуральского краевого

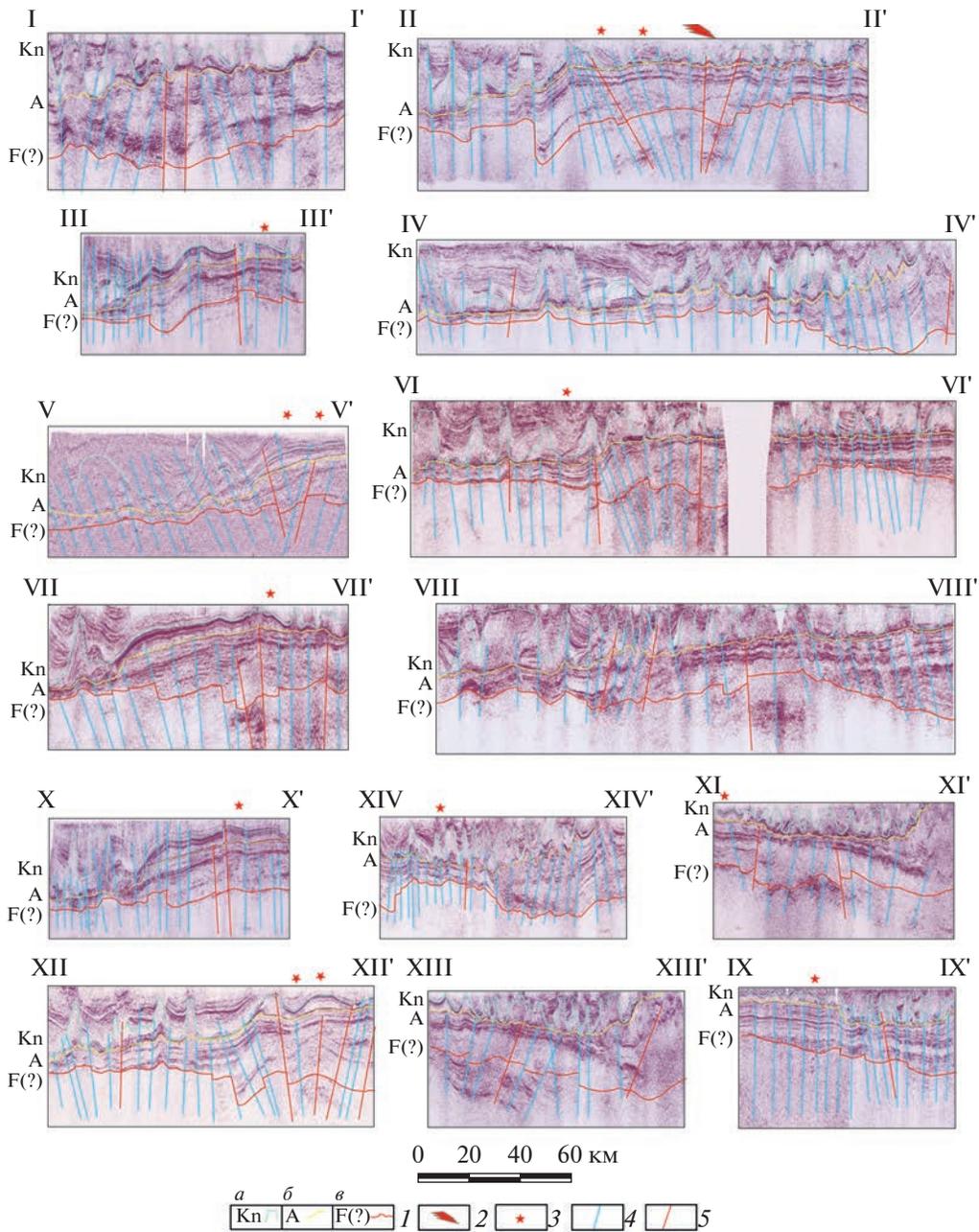


Рис. 2. Схематические временные разрезы.

Обозначены профили:

I-I' – 27072004 (с/п 7/04); II-II' – 09050708 (с/п 5/2007-08); III-III' – 08259902 (с/п 25/1999-02); IV-IV' – 22250102 (с/п 25/1999-02); V-V' – 7a099699 (с/п 9/96-99); VI-VI' – 40052006 (с/п 5/2006-07); VII-VII' – 0709799 (с/п 9/96-99); VIII-VIII' – 41052006 (с/п 5/2006-07); IX-IX' – 370505 (с/п 5/2005); X-X' – 06259902 (с/п 25/1999-02); XI-XI' – 30050607 (с/п 5/2006-07); XII-XII' – 25250102 (с/п 25/01-02); XIII-XIII' – 31050607 (с/п 5/2006-07); XIV-XIV' – 26050102 (с/п 25/01-02).

1 – отражающие поверхности: *a* – кровля пород кунгурского яруса, *b* – кровля подсолевых пород, *v* – кристаллический фундамент; 2 – Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов (см. рис. 1); 3 – сейсмические события (см. рис. 1); 4 – выявленные разломы, трассирующиеся из пород фундамента в осадочный чехол; 5 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа (см. рис. 1)

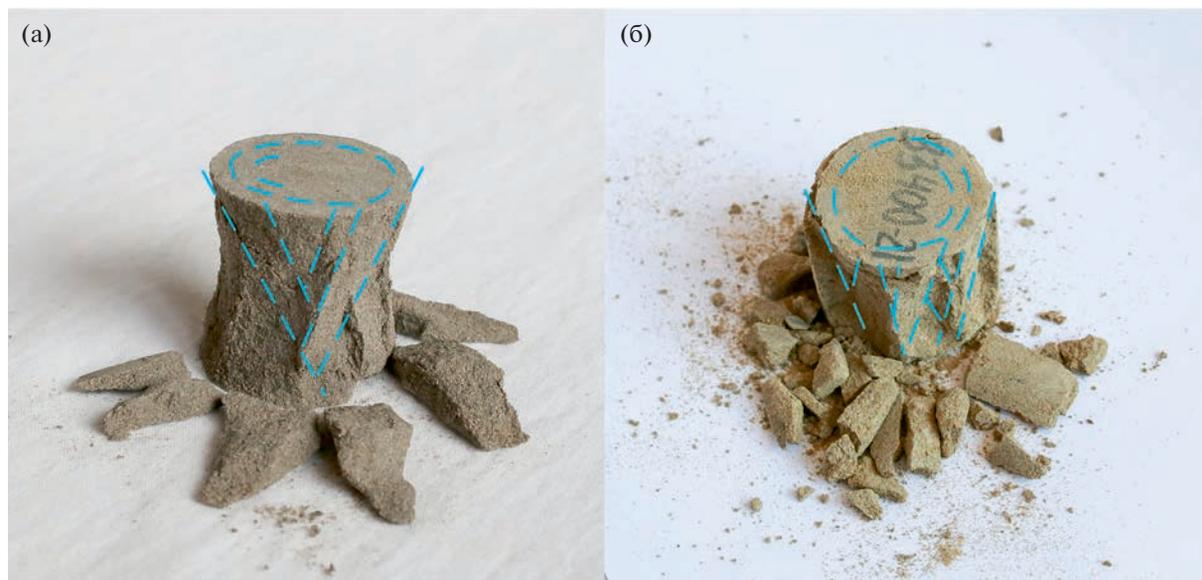


Рис. 3. Экспериментальное моделирование структуры “цветка” на образцах керна во время исследований акустической эмиссионной активности пород под действием флюидодинамических нагрузок, выполненных на установке УИК-АЭ (произведена в ИГ УрО РАН, Россия).

(а) – образец керна, представленный мелкозернистым песчаником, после извлечения из установки;
 (б) – образец керна с номером, представленный алевролитовым песчаником, после извлечения из установки. Показано (линии голубым) трещины скола.

прогиба, Западной Сибири, Туркмении [5–8, 21, 35]. Образование структур цветка в сдвиговых зонах ранее было воспроизведено экспериментально и проведено математическое моделирование [13, 18, 23, 40]. Строение структур цветка, по мнению некоторых исследователей, напоминает лопасти пропеллера за счет того, что на разных крыльях сдвига, сместители сбросов падают в противоположные стороны [13].

Нами были проведены исследования керна на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия), которые показали, что образование цветковой структуры может происходить без горизонтального сдвига.

При исследовании акустической эмиссионной активности керна в условиях напряжено-деформированного состояния и фильтрации флюида были изучены мелкозернистые и алевролитовые песчаники различной пористости и проницаемости из пород-коллекторов нефтяных месторождений Западной Сибири [11, 12, 14, 25, 26]. Создание напряженного состояния в образцах на установке обеспечивалось за счет гидростатического обжатия керна, имитирующего пластовое давление, и осевого сжатия, направленного снизу-вверх, воспроизводящего глубинное давление. Отмечаются общие закономерности разрушения образцов (рис. 3):

– образцы раскололись до конусообразной формы, с круглым сечением сверху;

– отколовшиеся части образцов имели строе- ние лопастей пропеллера с изогнутой винтовой формой;

– сколы образовывали трещины, падающие под углами $\angle 60^{\circ}–80^{\circ}$ и совпадающие с углами падения разломов “цветковых” структур.

В плане разрушенные образцы керна имели кольцевые трещины в верхней части конуса (см. рис. 3). С помощью метода сейсмоакустической эмиссии были зафиксированы характерный шум при образовании трещин, затихание звуков перед раскалыванием образца и затем резкое увеличение взрывных шумов от разрыва сплошности породы [12].

ПРИЗНАКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ В ПОРОДАХ

В породах осадочного чехла Оренбургской радиально-концентрической структуры значительную роль играют трещиноватость и вторичные процессы [8]. Протекающие гидротермальные процессы в тектонически ослабленных зонах подтверждают широко развитые здесь вторичная пористость и кавернозность [2]. Каверны выполнены кристаллическим кальцитом и доломитом. Повсеместно отмечаются интервалы, содержащие включения пирита. По трещинам развита кальцитизация, ангидритизация, доломитизация, сульфатизация и битуминозность [8].

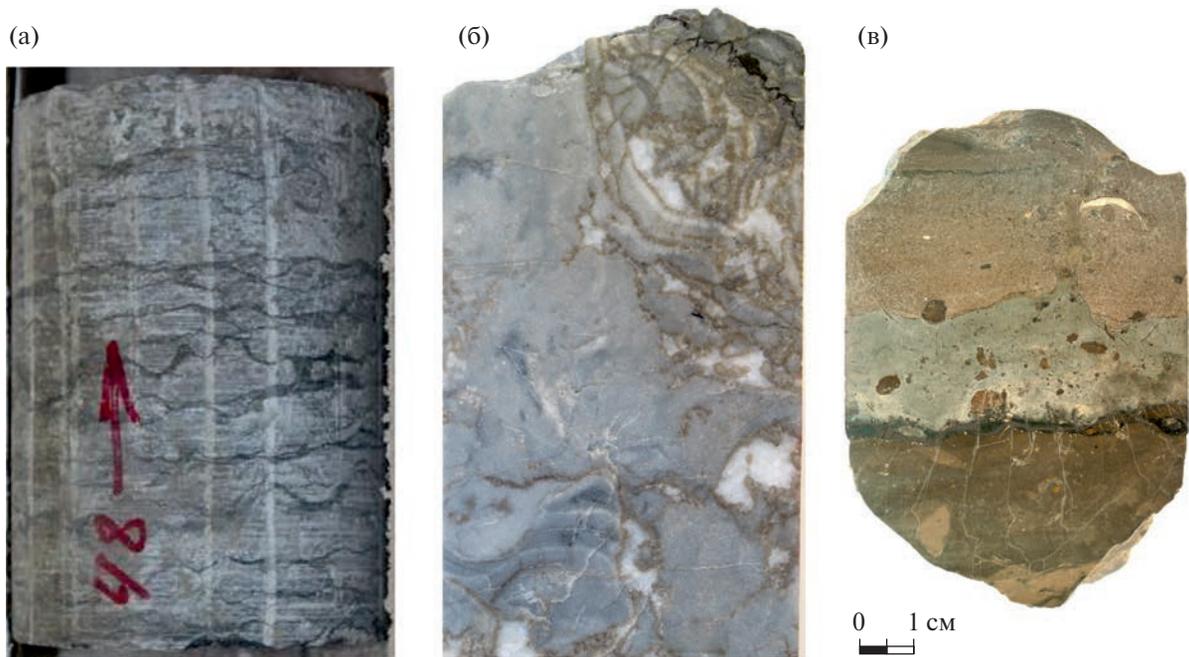


Рис. 4. Признаки воздействия флюидных разгрузок в подсолевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – доломит ангидритовый светло-серый плотный с волнистой слоистостью, подчеркнутой глинистым материалом (скв. 2 Каинсайская, D_3fm , глубина 6172 м);

(б) – доломит вторичный тонкозернистый серый с узорчатой текстурой, с инкрустационными полостями удлиненной формы, выполненными белым крупнокристаллическим доломитом (скв. 501 Вершиновская, D_1vz-kv , глубина 6702 м);

(в) – контакт брекчиевидного известняка и глинистого брекчированного прослоя (скв. 161 Кзылобинская, P_1a , глубина 5012 м).

Положение скважин – см. рис. 1.

На образце (а): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

Есть мнение, что метаморфические процессы в породах осадочного чехла Русской платформы осуществляются за счет гидротермальных вод и глубинных рассолов, которые в эпохи тектонической активности мигрируют по проницаемым зонам и разломам из фундамента [22]. Мы провели визуальный анализ керна пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры скважин на наличие признаков разгрузки гидротермальных флюидов в отложениях осадочного чехла.

Проведенное нами исследование показало, что самые значительные преобразования под воздействием флюидов в подсолевых отложениях претерпели карбонатные породы, преимущественно доломиты. В данных породах часто встречаются волнистая или, так называемая, плейчатая слоистость, своеобразные текстуры и интервалы брекчий, подобные структурам и текстурам флюидно-эксплозивных пород [27] (рис. 4, а, б).

В карбонатах и аргиллитах подсолевых отложений отмечаются светлые скорлуповидные включения, характерные для структур флюидных потоков [27] (см. рис. 4, в). Встречаются брекчии с примесью битуминозно-глинистого материала,

стиллотовыми швами, включениями и пятнами удлиненно-округлой формы, ориентированными, вероятно, в направлении флюидного потока [27] (см. рис. 4, в). Отмечаются вертикальные контакты темных и светлых доломитов, известняков и доломитов.

В солевых отложениях, как и в подсолевых, под воздействием флюидов карбонаты претерпели заметные преобразования (рис. 5).

В солевых отложениях находятся столбчато-зубчатые стиллитовые швы, волнистые и флюидальные текстуры, а также происходило брекчирование, перемешивание ангидритов, карбонатов и битуминозно-глинистого материала [27] (см. рис. 5, а–в).

В керне надсолевых отложений Оренбургской радиально-концентрической структуры также обнаруживаются флюидальные текстуры [10] (рис. 6, а).

Отмечены вертикальные контакты солей и ангидритов, ожежененных и нежежененных песчаников (см. рис. 6, б, в).

Соляные купола и гряды являются самыми значимыми результатами поступления гидротермальных флюидов по глубинным разломам в

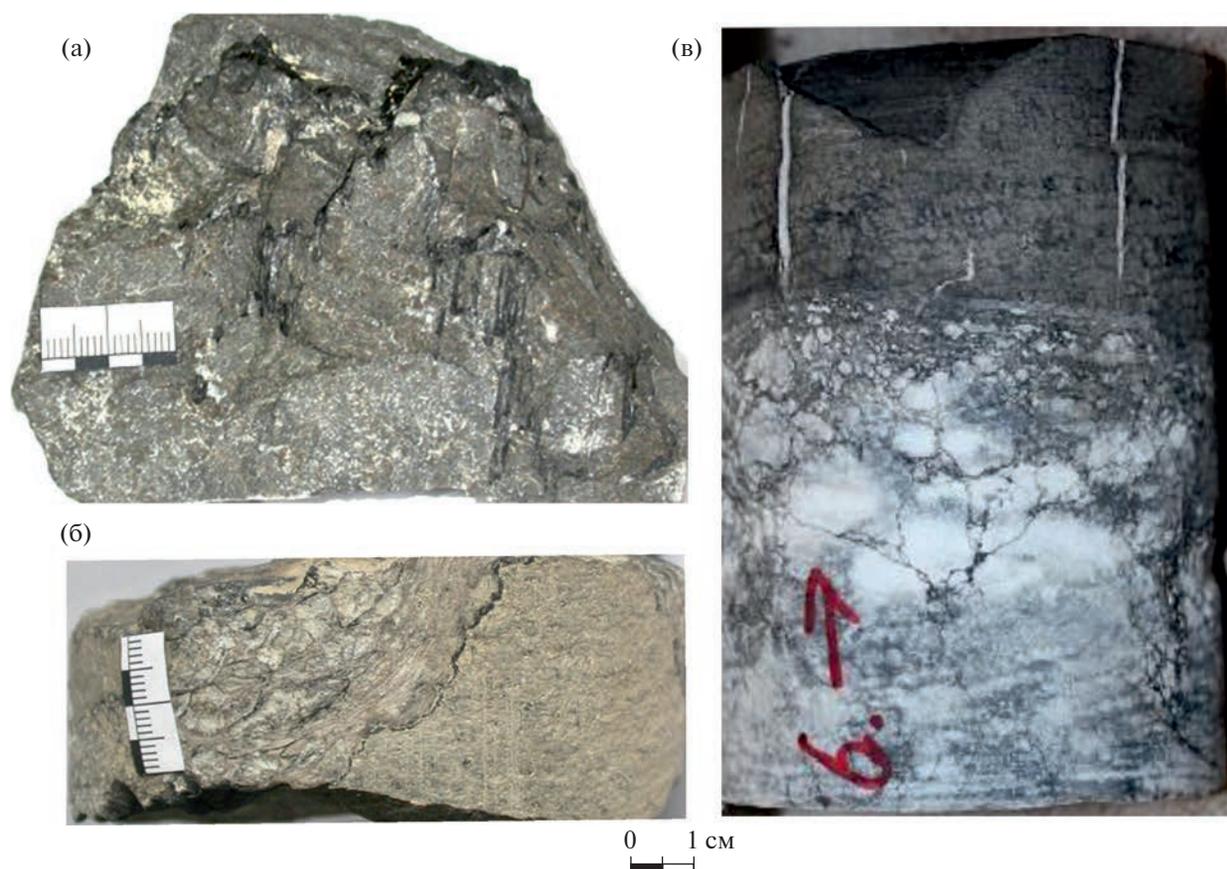


Рис. 5. Признаки воздействия флюидных разгрузок в солевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

- (а) – столбчато-зубчатые стилолитовые швы в известняке (скв. 22 Нагумановская, P_1k , глубина 4160 м);
 (б) – прослой брекчированной сульфатной породы, ограниченный битумными стилолитами (скв. 22 Нагумановская, P_1k , глубина 4167 м);
 (в) – контакт белого ангидрита мелкокристаллического и серого пелитоморфного доломита (скв. 2 Каинсайская, P_1k , глубина 5000 м).

На образце (в): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

Положение скважин – см. рис. 1.

осадочные породы [6, 7]. Соли пластичны, имеют свойство текучести и способны заполнять полости. В их керне сложно зафиксировать следы флюидодинамики, но образование соляных диапиров имеет много общего с процессом образования радиально-концентрических структур на молодых платформах и щитах, т.к. они также связаны с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов и значительным давлением [3].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

По сейсмическим данным временных региональных сейсмических профилей нами было изучено глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры древней Русской платформы. Исследования показали, что структура представляет собой крупную цветковую структуру. В ее центре трассированы основные

глубинные нарушения, падающие под углами $\angle 60^\circ-85^\circ$ и ограничивающие в фундаменте зоны горстов или взбросов. Также в облике структуры выявлена иерархия разломов за счет наличия цветочных структур малых размеров в виде месторождений нефти и газа, приуроченных к основным глубинным дислокациям.

Подобное строение по данным В.И. Ваганова и др. [3] имеют некоторые радиально-концентрические структуры молодой Западно-Сибирской платформы. Это может означать, что сформировались они в результате похожего геотектонического процесса, который не прекратился до настоящего времени. Высокая сейсмическая активность в Южном Предуралье (57 случаев за период с 2009–2016 гг.) указывает на то, что в земной коре формируются зоны напряженно-деформационного состояния [17]. В осадочном чехле это происходит не без участия техногенных

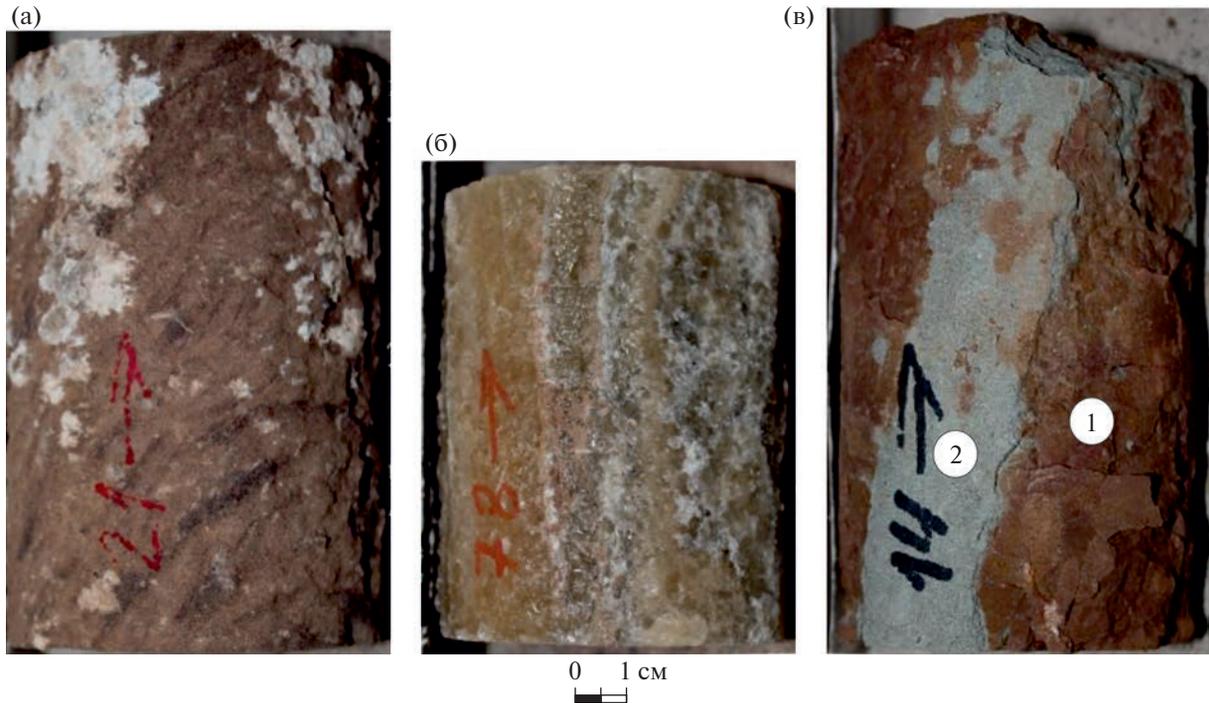


Рис. 6. Признаки воздействия флюидных разгрузок в надсолевых породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

(а) – песчаник темно-коричневый с прослоями алевролита коричневого и с вкраплениями каменной соли (скв. 1 Нагумановская, P_2kz , глубина 1501 м);

(б) – вертикальный контакт соли слабо буроватого цвета крупнокристаллической плотной с ангидритом серым мелкокристаллическим (скв. 1 Нагумановская, P_{1u} , глубина 3005 м);

(в) – вертикальный контакт песчаника мелко-среднезернистого, слабоуплотненного без ясно выраженной слоистости красновато-серого цвета (скв. 201 Каинсайская, Т, глубина 1140 м).

На образцах (а)–(в): цифры (номер образца), стрелка (обозначает верх и низ).

На (в) обозначен (цифры в кружках) вертикальный контакт песчаника: 1 – с ожелезнением, 2 – без ожелезнения.

Положение скважин – см. рис. 1.

факторов на разрабатываемых месторождениях нефти и газа.

Но по мнению М.Ю. Нестеренко и др. [17] подобные зоны формируются также и в кристаллическом фундаменте, что сложно связать только лишь с техногенными процессами. Повышенная сейсмическая активность фиксируется и за пределами месторождений, также отмечается группированность новейших сейсмических событий и приуроченность их к зонам глубинных разломов Южного Предуралья.

Концентрические разломы Оренбургской структуры во многом совпадают с основными направлениями локальных магнитных аномалий юго-запада Оренбуржья, как и тектонические нарушения выявленных радиально-концентрических структур [10] (рис. 7). Локальные аномалии силы тяжести в районе исследования отражают строение соляных гряд и куполов (рис. 8). Неотектонические нарушения Оренбургской радиально-концентрической структуры ограничивают группы соляных структур со схожими элементами простираения, подчеркивая блоковое ее строение.

Изучение строения и нефтегазоносности цветковых структур, связанных с деформациями сдвига, в России началось с месторождений углеводородов Западной Сибири [5, 13, 21, 35]. Анализ полученных данных по исследованию акустической эмиссионной активности терригенных пород-коллекторов нефтяных месторождений региона Западной Сибири под действием флюиодинамических нагрузок, выполненных на установке УИК-АЭ (ИГ УрО РАН, Россия), показал, что образование цветковых структур может происходить без горизонтального сдвига за счет бокового сжатия и глубинного давления.

Мощный осадочный чехол древней Русской платформы слагают терригенные и карбонатные породы различной твердости и плотности. Но в его разрезе также присутствуют цветковые структуры [6–9]. Поэтому, полученные экспериментальные данные по Западной Сибири, на наш взгляд, вполне можно сопоставить с образованием аналогичных цветковых структур в породах Оренбургской радиально-концентрической структуры.

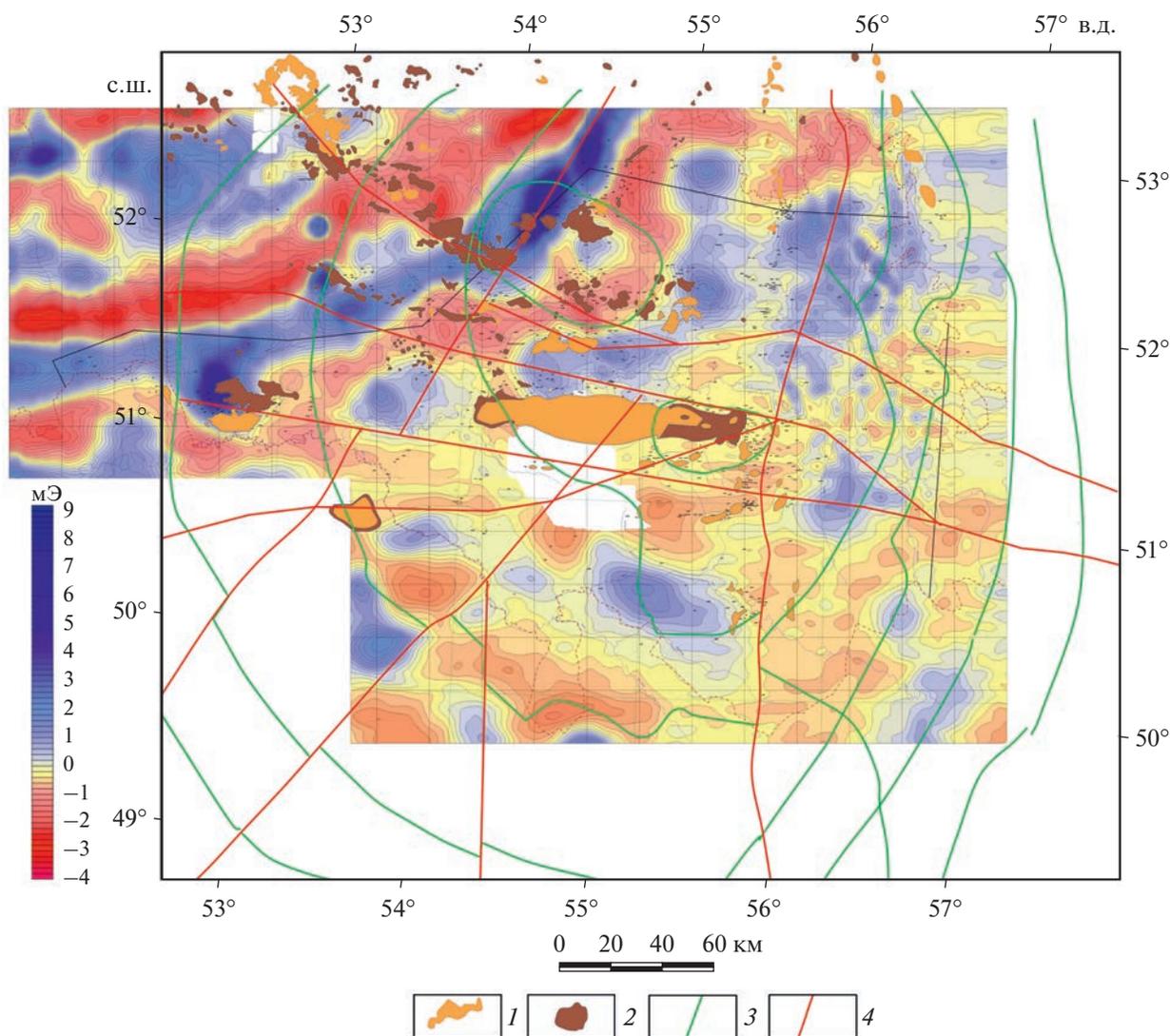


Рис. 7. Сопоставление контуров Оренбургской радиально-концентрической структуры, месторождений углеводородов и карты локальных аномалий магнитного поля
 1–2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 4 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа

На плотно сцементированных мелкозернистых и алевроитовых песчаниках мы отчетливо увидели особенности растрескивания образцов. Все они раскололись до конусообразной формы, с круглым сечением сверху, где трещины имели кольцевое строение. Отколовшиеся части ядра схожи по форме с лопастями пропеллера и имеют изогнутую винтовую форму. Трещины сколов падают под углами $\angle 60^\circ\text{--}80^\circ$, что совпадает с падением разломов цветковых структур.

При образовании трещин в образцах ядра зафиксирован сейсмоакустический шум, затихание звуков перед раскалыванием и затем резкое уве-

личение шумов от разрыва сплошности породы, как при взрыве.

Анализ ядра скважин, пробуренных в пределах Оренбургской радиально-концентрической структуры, выявил, что в породах осадочного чехла имеется достаточно много признаков гидротермальных флюидных разгрузок:

- волнистая (или пloyчатая) слоистость;
- своеобразные текстуры и интервалы брекчий;
- скорлуповидная форма включений;
- стиллотитовые швы;
- флюидальные текстуры.

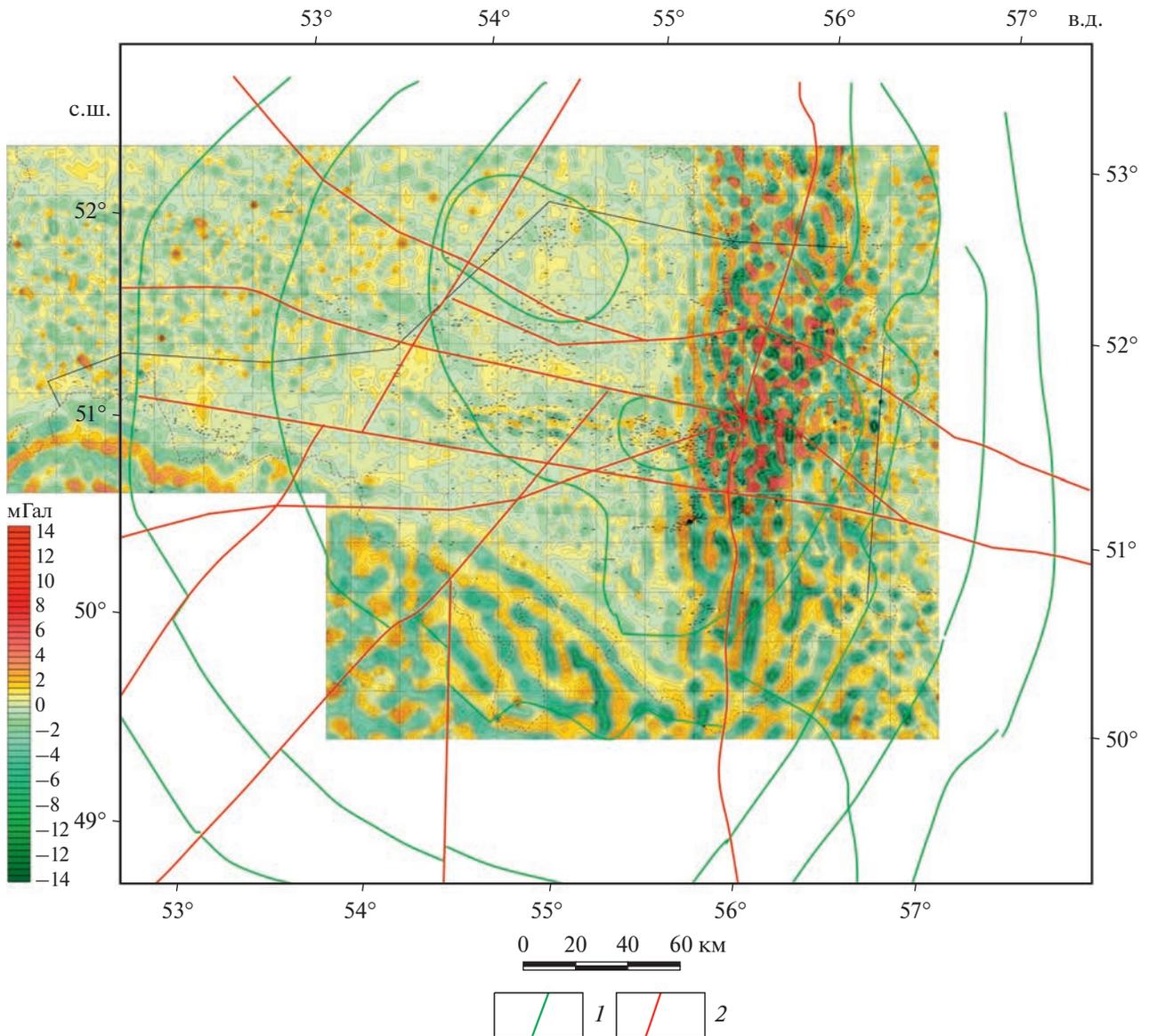


Рис. 8. Сопоставление контуров Оренбургской радиально-концентрической структуры и карты аномалий силы тяжести. 1 – некоторые концентрические разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, по [10]; 2 – главные радиальные разломы Оренбургской радиально-концентрической структуры, с которыми связаны сейсмические события и месторождения нефти и газа

Приведенные данные свидетельствуют о том, что генезис Оренбургской радиально-концентрической структуры связан с воздействием глубинных потоков тепла, флюидов, большого давления и имеет много общего со взрывными кольцевыми структурами щитов и платформ.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. По сейсмическим данным временных региональных профилей нами было изучено глубинное строение Оренбургской радиально-концентрической структуры. Выявлено иерархичное строение ее разломов. Оренбургская радиально-концентрическая структура представляет собой крупную цветочную структуру, в которую вложены структуры “цветка” малых размеров.

2. Экспериментальное моделирование Оренбургской радиально-концентрической структуры показало, что она образовалась за счет бокового

сжатия и глубинного давления без горизонтального сдвига.

3. В породах осадочного чехла Оренбургской радиально-концентрической структуры происходили гидротермальные флюидные разгрузки.

4. Оренбургская радиально-концентрическая структура генетически связана со структурами взрыва платформ и шитов.

Благодарности. Автор выражает благодарность ООО “Газпром добыча Оренбург” (г. Оренбург, Россия) за предоставленные материалы. Автор признательна В.В. Дрягину (ИГ УрО РАН, Екатеринбург, Россия) за ценные советы и обсуждение.

Автор благодарна рецензенту проф. В.И. Попкову (КубГУ, г. Краснодар, Россия) и анонимным рецензентам за конструктивные комментарии и редактору М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках темы № 1021052504590-8-1.5.4 государственного задания ИГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агибалов А.О., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Мошкин И.В., Сенцов А.А. О влиянии неотектонических движений на особенности локализации месторождений нефти и газа Волго-Уральской антеклизы // *Динамическая геология*. 2020. № 2. С. 125–137. <http://www.geodisaster.ru/index.php?page=soderzhanie-nomera-2-za-2020god>
2. Багдасарова М.В. Роль гидротермальных процессов при формировании коллекторов нефти и газа // *Геология нефти и газа*. 1997. № 9. С. 42–46.
3. Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры шитов и платформ. – Под ред. Е.К. Семилетковой – М.: Недра, 1985. 200 с.
4. Волчкова Г.И., Лукина Н.В., Макаров В.И. и др. Космическая информация в геологии. – Под ред. В.Г. Трифонова – М.: Наука, 1983. 534 с.
5. Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // *Геология нефти и газа*. 2007. № 3. С. 3–11.
6. Горожанин В.М. Особенности нефтегазоаккумуляции в солянокупольных областях юго-востока Восточно-Европейской платформы. – В сб.: *Современное состояние наук о Земле* – Мат-лы междунар. конф. памяти В. Е. Хаина, (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 01–04 февр. 2011 г., [Электронный ресурс]) – Режим доступа: <http://khain2011.web.ru> (дата обращения 19.01.2020).
7. Горожанин Е.Н., Горожанин В.М. Строение и перспективы нефтегазоносности зоны передовых складок Южного Урала. – В кн.: *Генезис, миграция и формирование месторождений углеводородного сырья в контексте их поиска, разведки и разработки*. – Под ред. А.В. Колмойца – Мат-лы всероссийской научно-практ. конф. 26–28 сентября 2018, г. Оренбург – (Оренбург: Агентство Пресса, 2018), С. 21–25.
8. Данилова Е.А. Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области // *Региональная геология и металлогения*. 2020. Т. 82. С. 60–68.
9. Данилова Е.А. Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере Оренбургской области) // *Геология и геофизика юга России*. 2021. Т. 11. № 3. С. 33–44.
10. Данилова Е.А. Радиально-концентрические структуры в фундаменте древней платформы и условия возникновения очагов генерации углеводородов: реконструкция по сеймотектоническим данным // *Геотектоника*. 2022. № 3. С. 36–49.
11. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. № 6. С. 744–751.
12. Иголкина Г.В., Дрягин В.В., Мезенина З.С., Иванов Д.Б. К вопросу об анализе акустических эмиссионных процессов пластов-коллекторов. – В сб. *Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей*. – Под ред. П.С. Мартышко – Мат-лы всерос. конф. с междунар. участием, 18–22 сент. 2017 г., г. Екатеринбург (Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2017), С. 187–191.
13. Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур “пропеллерного” типа // *Геотектоника*. 2009. № 5. С. 50–64.
14. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Арутюнов С.И., Ризанов Е.Г., Дыбленко В.П., Дрягин В.В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа // *Георесурсы*. 2018. Т. 20. № 3. Ч. 2. С. 206–215.
15. Лукьянов В.Ф. Радиально-концентрические структуры в восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // *Вестн. ВГУ. Сер.: Геол.* 2000. Вып. 9. С. 31–37.
16. Муравьев В.В. Геодинамика и нефтегазоносность систем концентрических дислокаций литосферы. – В кн.: *Условия образования и закономерности размещения залежей нефти и газа*. – Киев: Наукова Думка, 1983. С. 121–127.
17. Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья). – Под ред. П.В. Панкратьева – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 186 с.
18. Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонофизического моделирования. – В кн.: *Проблемы тектонофизики*. – М.: ИФЗ, 2008. С. 103–140.
19. Самарцев С.К., Данилова, Е.А., Драгунов А.А., Драгунов В.А. Геодинамически активные очаги генерации углеводородов как возможные источники восполнения залежей Оренбургского нефтегазо-

- конденсатного месторождения // Бурение и нефть. 2021. № 4. С. 10–13.
20. *Смирнова М.Н.* Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 1–6.
 21. *Тимурзиев А.И.* Развитие представлений о строении “цветковых моделей” Силвестра на основе новой кинематики модели сдвигов // Геофизика. 2010. № 2. С. 24–25.
 22. *Флоровская В.Н.* Углеродистые вещества в природных процессах. – Под ред. Ю.И. Пиковского – М: ГЕОС, 2003. 228 с.
 23. *Фролова Н.С.* Модели цветковых структур в зонах сдвига. – Мат-лы научной конф. “Ломоносовские чтения”, МГУ, апрель 2013 (М.: МАКС-Пресс, 2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://geo.web.ru/pubd/2013/09/18/0001187172/pdf/frolova_2013.pdf (дата обращения 24.02.2020).
 24. *Харченко В.М.* Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений // Вестн. СКФУ. 2006. Т. 6. № 2. С. 48–53.
 25. *Хачай О.А., Дрягин В.В., Хачай А.Ю.* Исследования и моделирование нелинейных акустических процессов в слоистой среде с пористым флюидонасыщенным включением иерархического типа // Мониторинг. Наука и технологии. 2019. Т. 41. № 3. С. 77–83.
 26. *Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В.* Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 84–93.
 27. *Якобсон К.Э., Казак А.П., Копылова Н.Н., Проскурнин В.Ф., Толмачева Е.В.* Атлас структур и текстур флюидно-эксплозивных пород. – Под ред. К.Э. Якобсона – СПб-6: Минерал, 2011. 79 с.
 28. *Bommer J.J., Oates S., Cepeda J.M., Lindholm C., Bird J.F., Torres R., Marroquin G., Rivas J.* Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project // Engineer. Geol. 2006. Vol. 200683(4). P. 287–306.
 29. *Broccardo M., Mignan A., Wiemer S., Stojadinovic B., Giardini D.* Hierarchical Bayesian modeling of fluid-induced seismicity // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 11357–11367.
 30. *Buijze L., Van den Bogert P.A.J., Wassing B.B.T., Orlic B., TenVeen J.H.* Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in Rotliegend gas reservoir // Netherlands J. Geosci. 2017. Vol. 46. No. 5. P. 131–148.
 31. *Davison I., Barreto P.* Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential // GEOExPro. 2019. P. 38–40.
 32. *Dost B., Van Stiphout, A., Kühn D., Kortekaas M., Rui-grok E., Heimann S.* Probabilistic moment tensor inversion for hydrocarbon-induced seismicity in the groningen gas field, the Netherlands. Part 2: Application,” Seismol. Soc. Am. Bull. 2020. Vol. 110. No. 5. P. 2112–2123. <https://doi.org/10.1785/0120200076>
 33. *Grillot J.C.* Tectonics of Late and Post-Hercynian ages in the western of the Iberian Plate (Portugal) // Comptesrendus de l’Académie des Sciences. 1984. Vol. 299. P. 665–670
 34. *Hao H.J., Lin H.M., Yang M.X.* The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain of petroleum exploration // China Offshore Oil and Gas. 2001. Vol. 15. No. 3. P. 157–163. (in Chinese with English abstr.)
 35. *Laudon C., Qi J., Rondon A., Rouis L., Kabazi H.* An enhanced fault defection workflow combining machine learning and seismic attributes yields an improved fault model for Caspian Sea asset // First Break. 2021. Vol. 39. P. 53–60.
 36. *Mann P., Gahagan L., Gordon M.B.* Tectonic setting the world’s giant oil and gas fields. – In: *Giant oil and gas fields of the Decade 1990–1999*, Ed. by M.T. Halbouty, (Mem. AAPG. 2003. Vol. 78), P. 15–105.
 37. *McKirdy D.M.* Hydrocarbon generation and migration. – In: *The Petroleum Geology of South Australia.* – Vol. 2: *Eromanga Basin.* – Ed. by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. – (Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia, 2006. 2nd edn. Vol. 2. Ch. 10), P. 2–9.
 38. *Muntendam-Bos A.G., Hoedeman G., Polychronopoulou K., Draganov D., Weemstra C., van der Zee W., Bakker R.R., Roest H.* An overview of induced seismicity in the Netherlands // Netherlands J. Geosci. 2021. Vol. 101. P. 1–20.
 39. *Naumann S., Sakariassen R.* Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents Sea // GEOExPro. 2019 (June). P. 20–24.
 40. *Naylor M.A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K.* Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states // J. Struct. Geol. 1986. Vol. 8. P. 737–752.
 41. *Saadallah A.* A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects // GEOExPro. 2019 (June). P. 14–18.
 42. *Van den Bogert P.A.J.* Impact of various modelling options on the onset of fault slip and fault slip response using 2-dimensional Finite-Element Modelling // Shell Global Solutions Int. B.V. (Rijswijk). 2015. Available at <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten>, (accessed August 7, 2020).
 43. *Van den Bogert P.A.J.* Depletion-induced fault slip and seismic rupture – 2D Geomechanical models for the Groningen field, The Netherlands // Shell Global Solutions Int. B.V. (Rijswijk). 2018. Available at <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten>, (accessed August 7, 2020).
 44. *Zöller G., Holschneider M.* Themaximumpossible and themaximum expected earthquake magnitude for production-induced earthquakes at the gas field in Groningen Te Netherlands // Seismol. Soc. Am. Bull. 2016. Vol. 106. No. 6. P. 2917–2921.
 45. <http://yandex.ru/maps/geo/orenburg/53105182/?l=sat&ll=56.261353%2C51.629121&z=7> (Accessed March 30, 2022).

Orenburg Radial-Concentric Structure at Great Depth: Experimental Modeling under Fluid Dynamic Loads and Comparative Analysis of Sandstone Samples from Oil Fields in Western Siberia

E. A. Danilova*

*Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
st. Amundsena, bld. 100, 620016 Yekaterinburg, Russia*

**e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru*

The study of the deep structure of the Orenburg radial-concentric structure in the basement of the Russian Platform based on seismotectonic and geomorphological data has been carried out. Interpretation of temporal regional seismic profiles crossing the structure was performed, identifying the main deep faults and measuring their dip angles. It was revealed that the radial-concentric structure is a large flower structure. Its structure involves the main multidirectional deep faults dipping at angles of $\sim 60^\circ$ – 85° and limiting horst or reverse fault zones in the basement. The hierarchy of faults structure has been established. Oil and gas fields are confined to the main deep dislocations of the Orenburg structure and represent flower structures of minor sizes. An experimental modeling of the formation of “flower” structures was performed based on the analysis of the results of studies using data from the acoustic emission activity of rocks and under the action of fluid dynamic loads performed at the “UIK-AE” unit (Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS, Russia) on sandstone core samples from reservoir rocks of oil fields in Western Siberia. The developed model showed that the formation of flower structures can occur without horizontal shear due to lateral compression and deep pressure. With the help of the seismo-acoustic emission method, characteristic noise was recorded during the formation of cracks in core samples, sound attenuation before splitting, and then its sharp explosive increase from a break in the continuity of the rock. Analysis of the core of wells drilled within the Orenburg radial-concentric structure revealed signs of hydrothermal fluid discharge in the sedimentary cover rocks, such as wavy (or flat) layering, bizarre textures and intervals of breccias, shell-shaped inclusions, stillotite seams, fluid textures. It is concluded that the genesis of the Orenburg radial-concentric structure is associated with the impact of deep heat flows, fluids, high pressure and has a commonality with the explosive ring structures of shields and platforms.

Keywords: Orenburg radial-concentric structure, time seismic sections, deep faults, flower structure, experimental modeling, explosive structures, oil and gas fields, hydrothermal fluid loads

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 выносимого 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 газогеохимических 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).

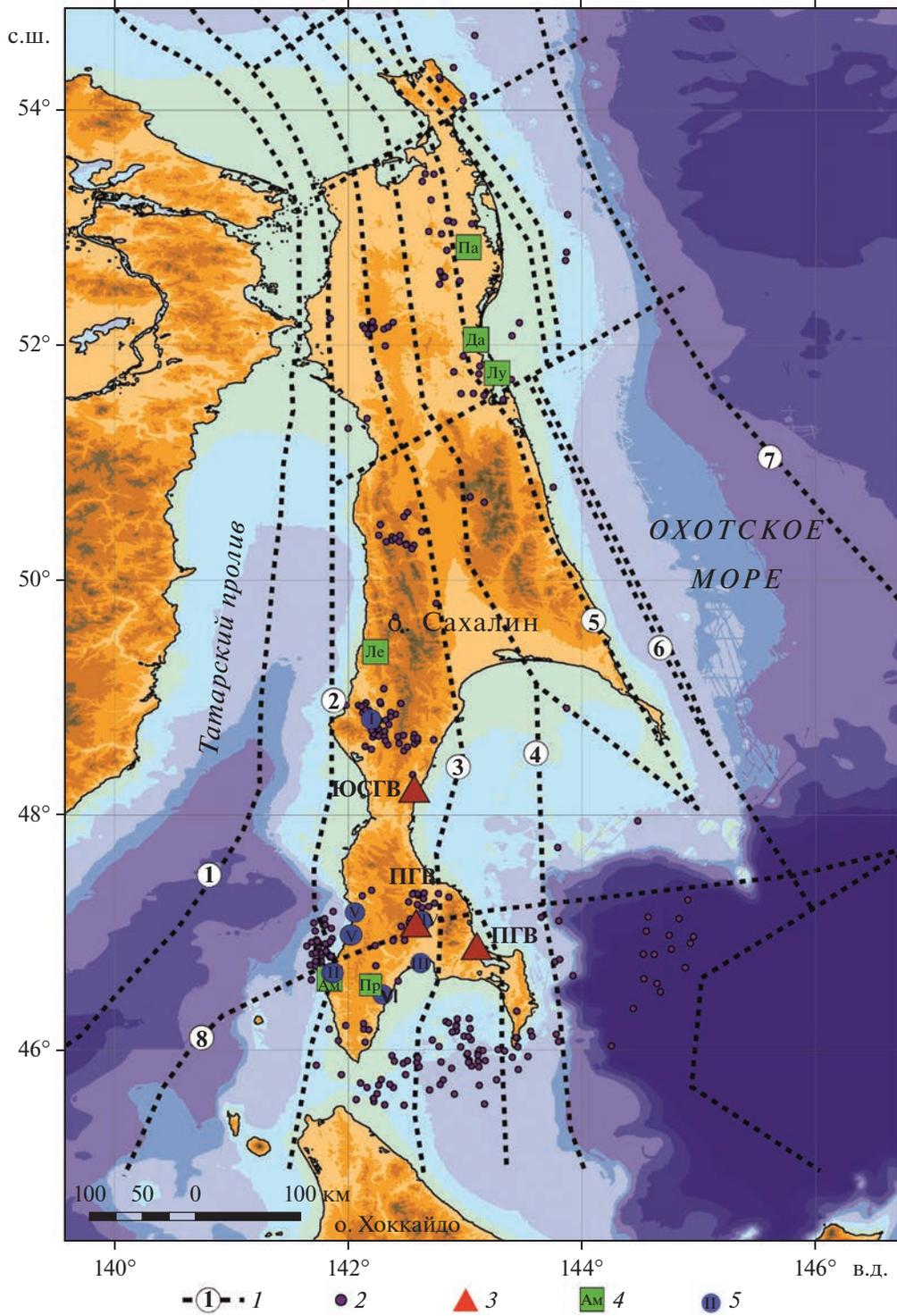
Грязевые вулканы: Южно-Сахалинский грязевой вулкан – ЮСГВ, Пугачевская группа грязевых вулканов – ПГВ, Лесновский грязевой вулкан – ЛГВ.

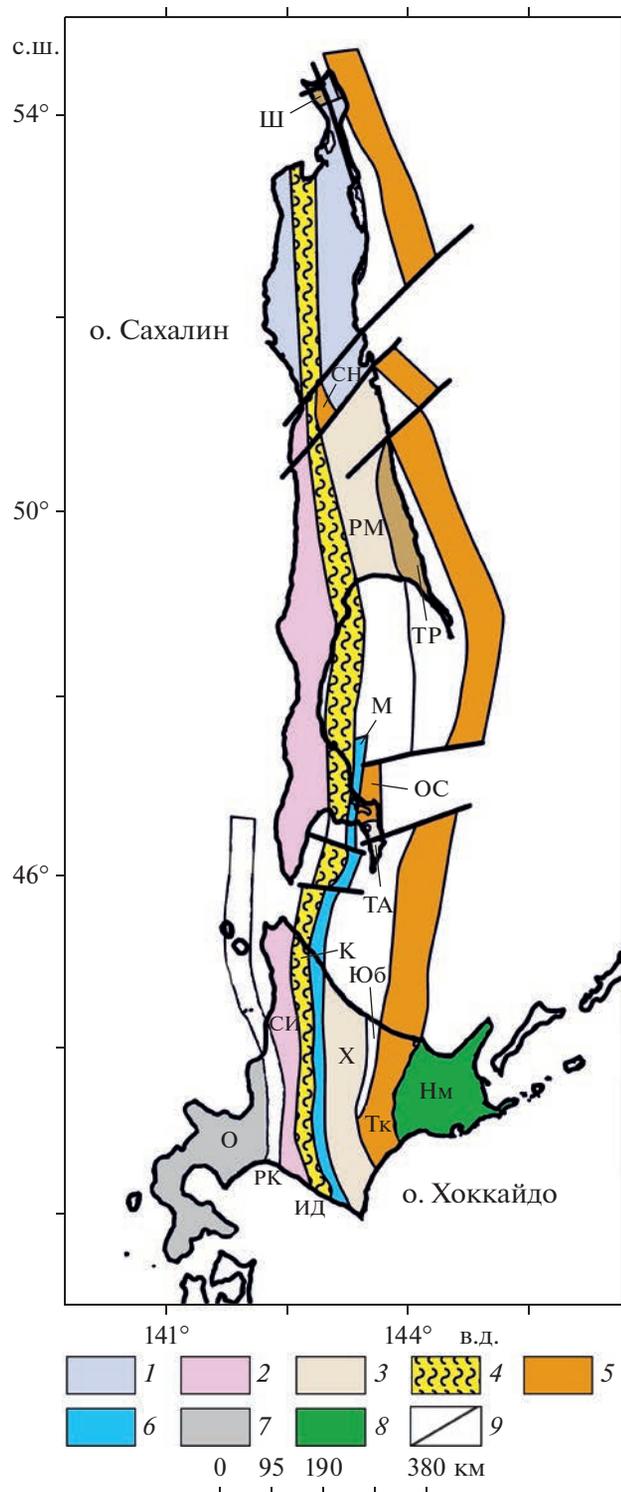
Источники минеральных вод: I – Волчанские; II – Невельские; III – Анивские; IV – Синегорские, V – Холмские, VI – метановые выходы на юге о. Сахалин.

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 склонах 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).

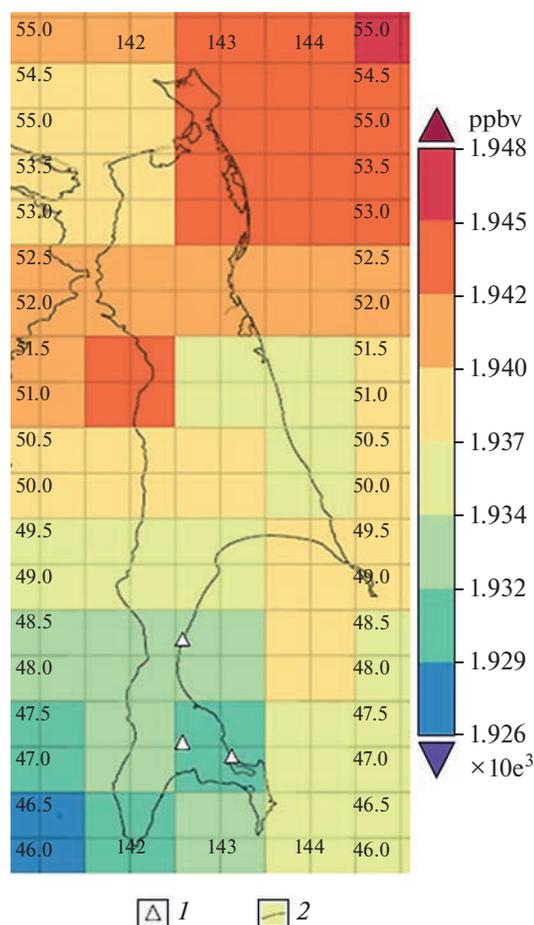


Рис. 3. Концентрация метана по данным ИК-зонда AIRS [30] (нисходящий виток) на горизонте 100 м над поверхностью за период 01.09.2017–03.09.2021 (1000 ppbv = 1 ppm). 1 – грязевые вулканы; 2 – контур о. Сахалин (слева) и континентальной части суши (справа)

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.

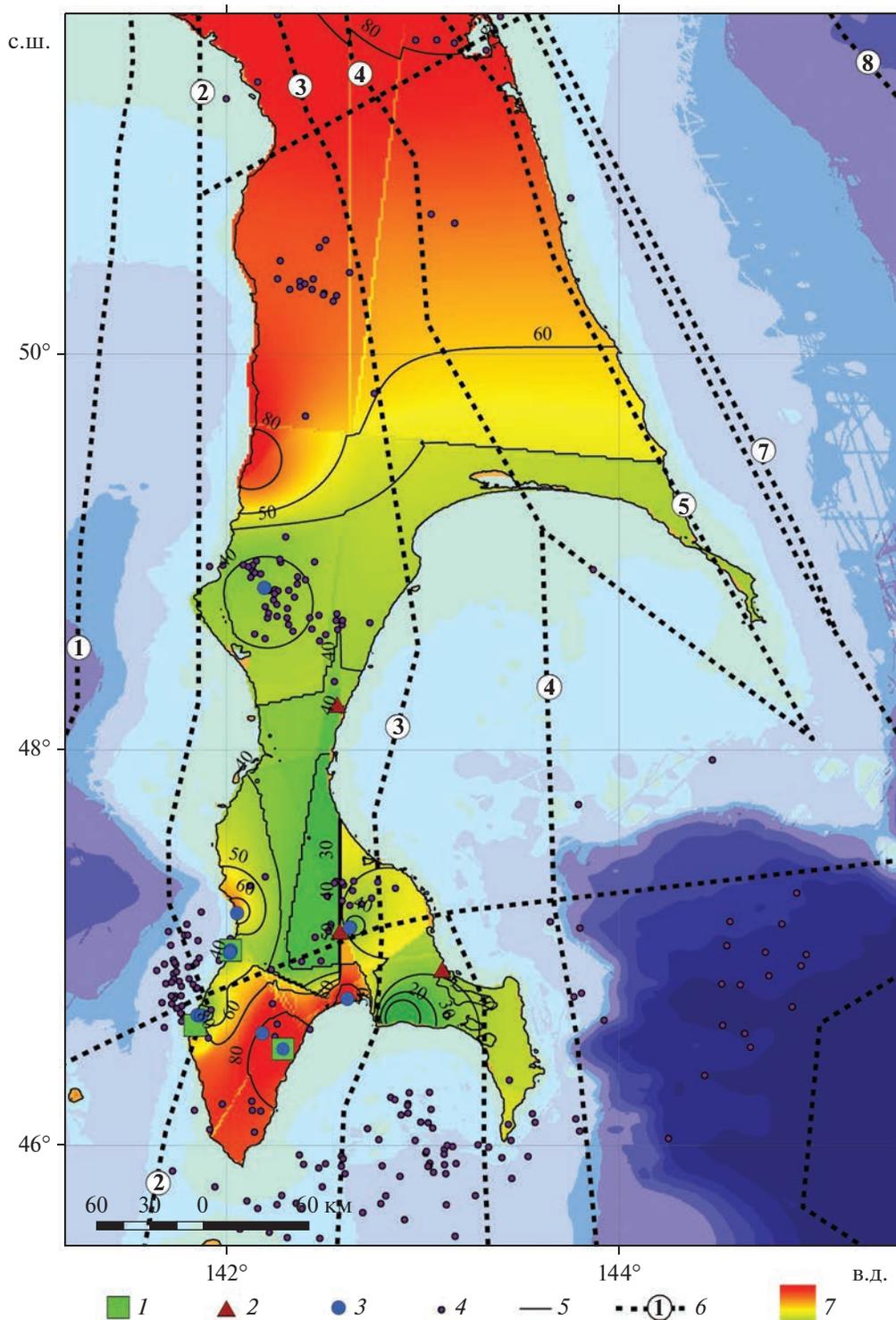


Рис. 4. Распределение концентраций метана в южной части о. Сахалин (по данным [18], с изменениями и дополнениями).

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

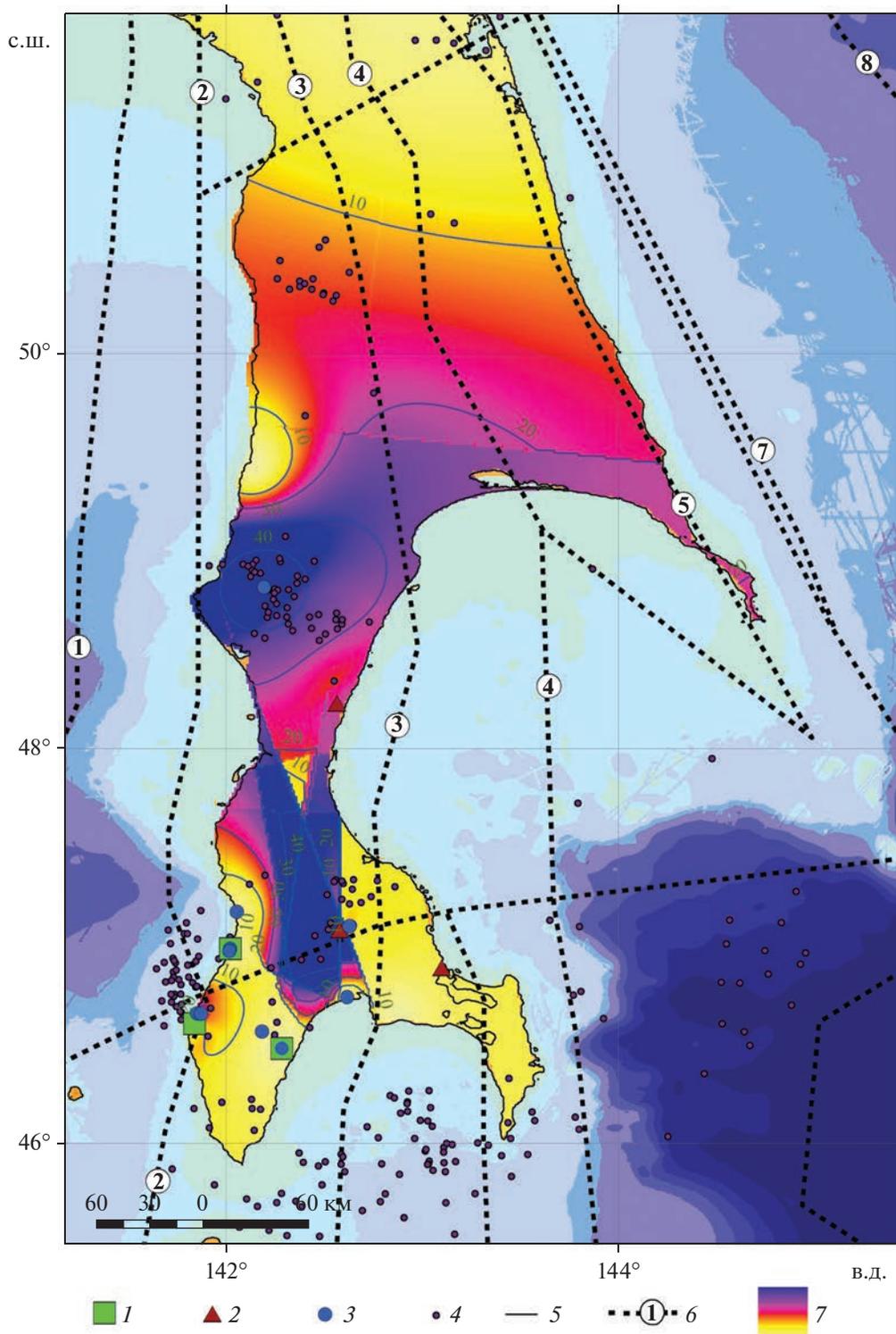


Рис. 5. Распределение концентраций углекислого газа в южной части о. Сахалин (по данным [18], с исправлениями и дополнениями).

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, (%)

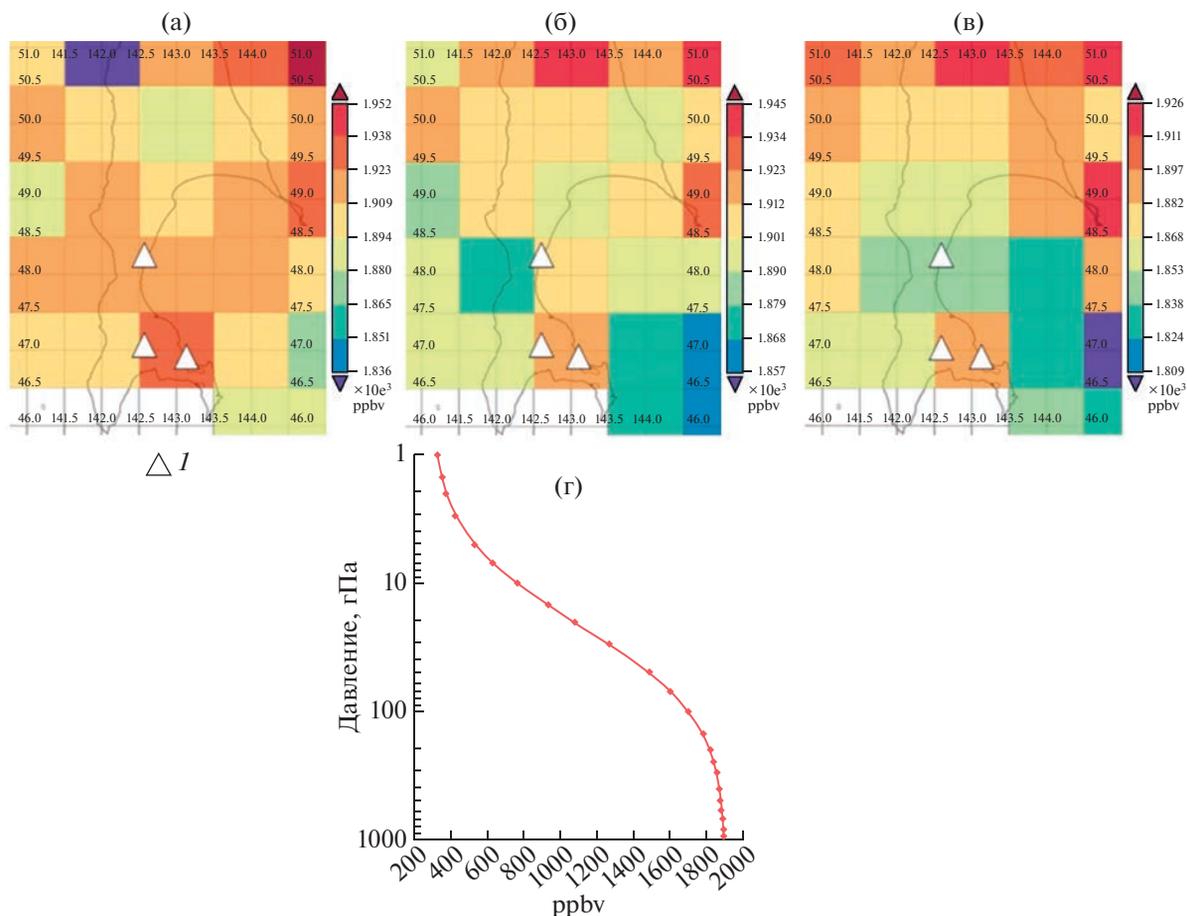


Рис. 6. Концентрация метана на горизонтах 1000 гПа (а), 850 гПа (б), 400 гПа (в) и вертикальный профиль (г) 08.09.2021 г.
 I – грязевые вулканы

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.

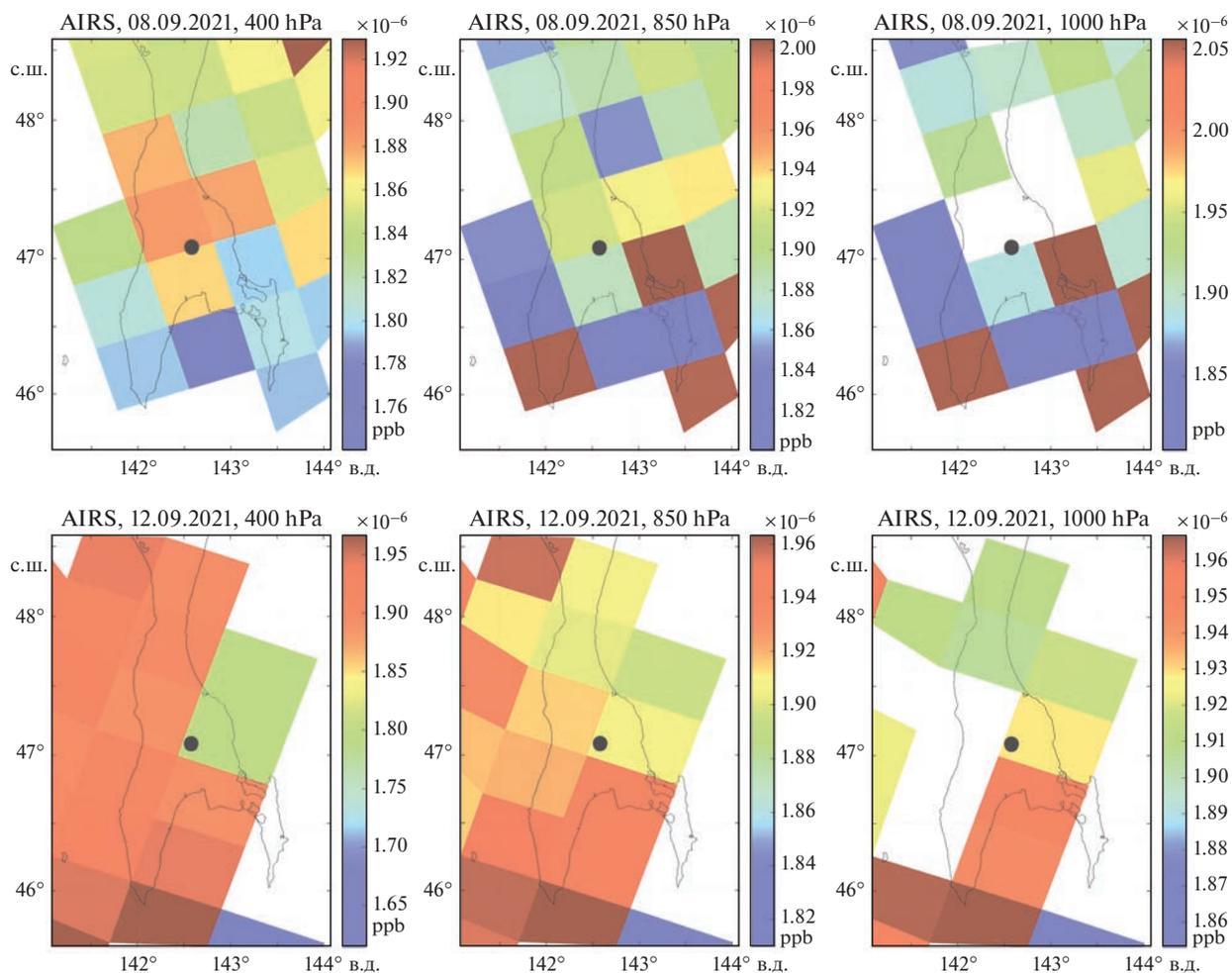


Рис. 7. Пространственные распределения концентраций на уровнях 400, 850, 1000 гПа за 08.09.2021 и 12.09.2021 по данным AIRS ([30, 31]). Обозначено: Южно-Сахалинский грязевой вулкан (кружок черным); контур о. Сахалин (линия черным).

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

остаётся 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

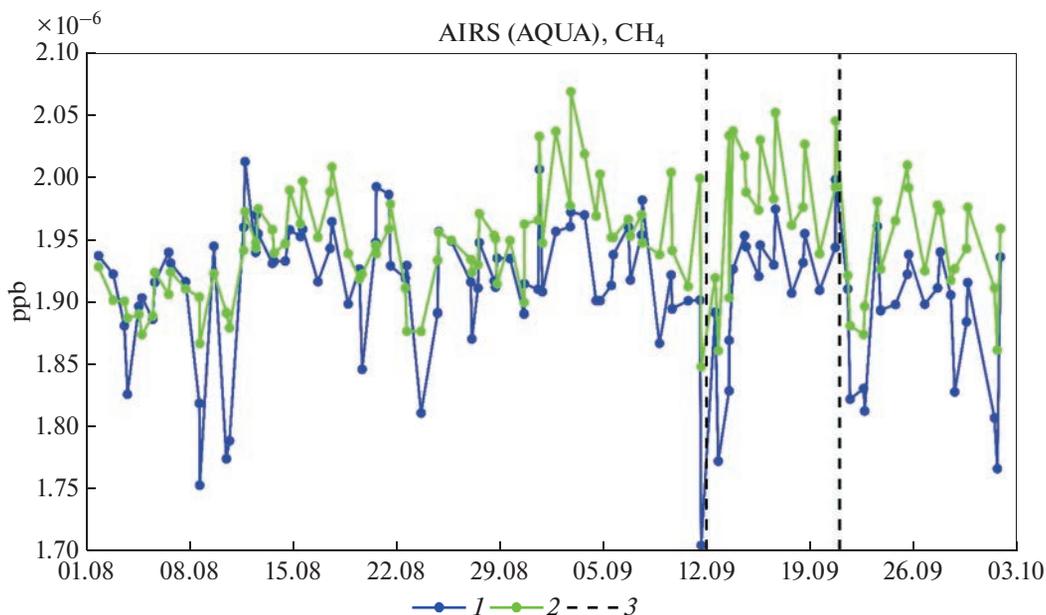


Рис. 8. График изменения концентрации метана за 01.08.2021–03.10.2021гг. по данным сканера AIRS (по данным [30, 31]). 1 – значения на уровне максимальной чувствительности, 300–400 гПа; 2 – значения концентраций метана в приземных слоях атмосферы, 900 гПа; 3 – сейсмическое событие

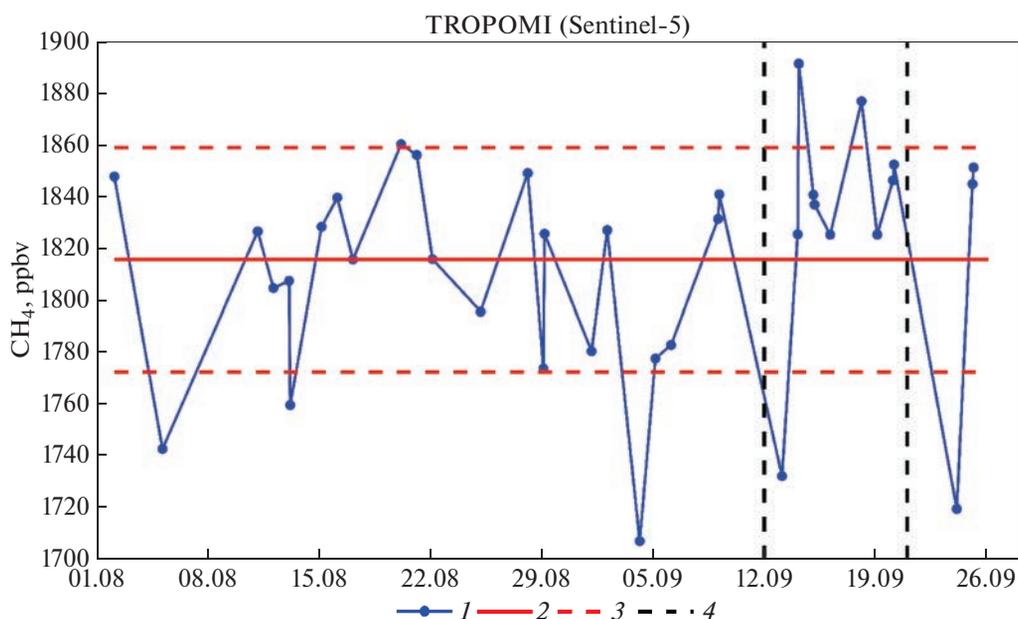


Рис. 9. График изменения концентрации метана за 01.08.2021–26.09.2021 гг. по данным сканера TROPOMI ([65]). 1 – концентрации CH_4 (ppbv); 2 – средняя концентрация за рассматриваемый период; 3 – границы стандартного отклонения концентраций; 4 – сейсмическое событие

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

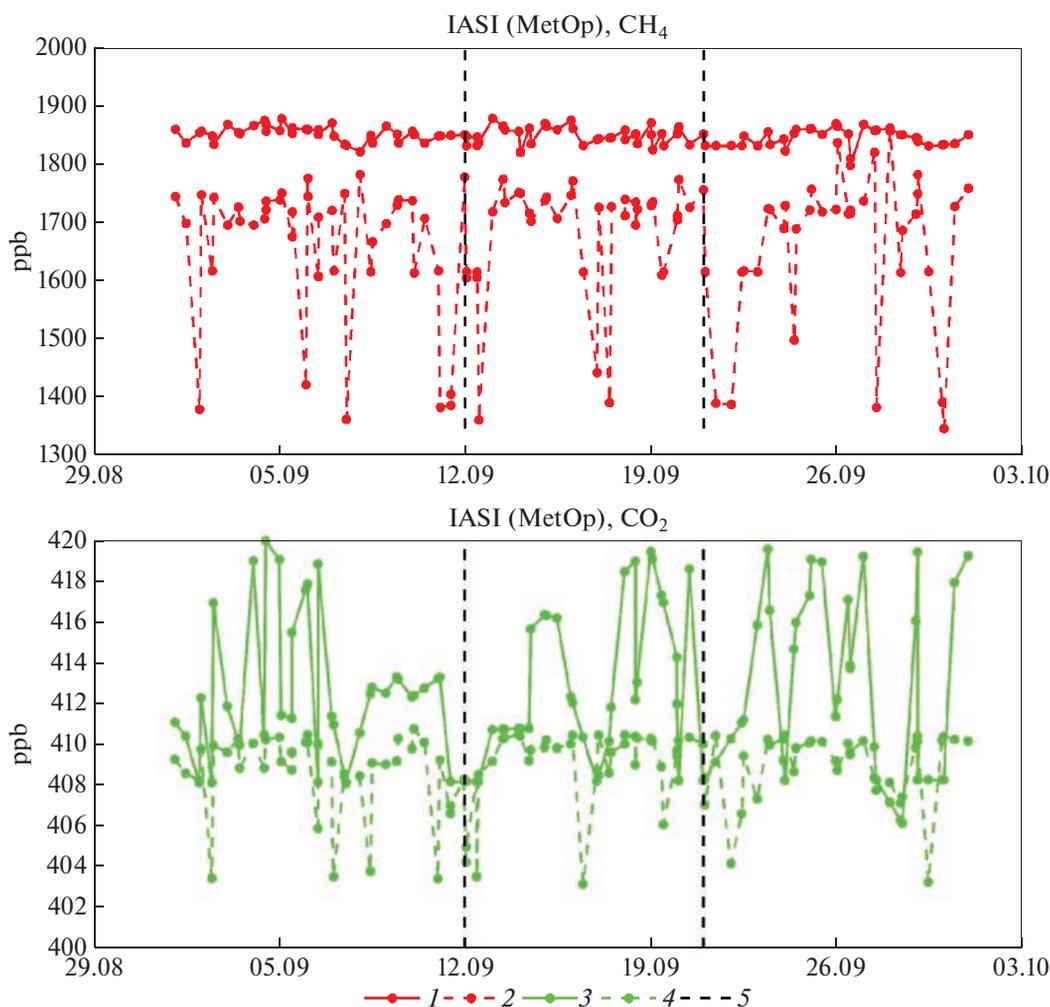


Рис. 10. Графики изменения концентрации: метана (а) и углекислого газа (б) за период 01.08.2021–03.10.2021г. по данным сканера IASI (MetOp) ([44]).

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].

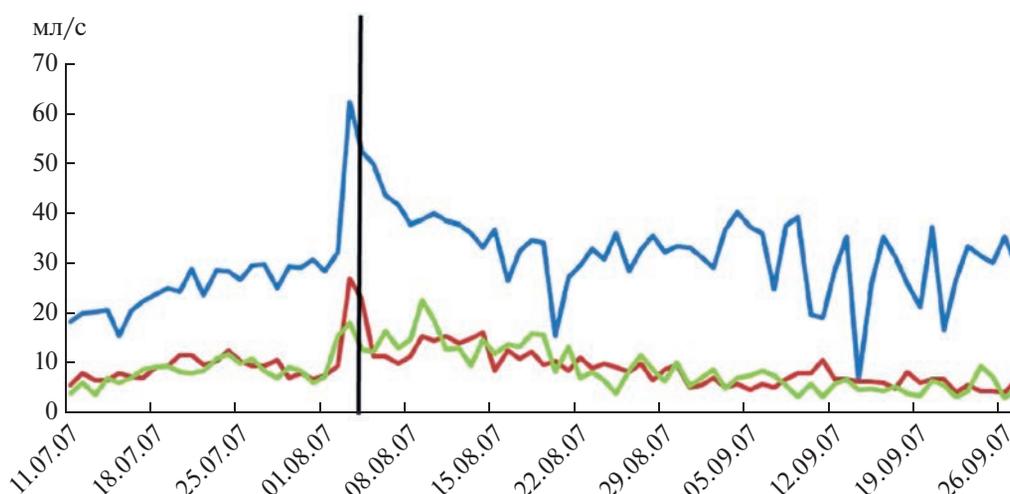


Рис. 11. Дебит свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана в период наблюдений 2007 г. [10].
Графики для грифонов: F (синий); G (зеленый); H (красный).
Указатель даты Невельского землетрясения 2.08.2007 г. (вертикальная линия черным).

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 сейсмотектонического 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