



INTEGRATED MONITORING OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES IN PRIBAIKALYE: PILOT NETWORK AND FIRST RESULTS

K.Zh. Seminsky ¹, A.A. Dobrynina ^{1,2}, S.A. Bornyakov ¹, V.A. Sankov ¹, A.V. Pospiev ¹,
S.V. Rasskazov ¹, N.P. Perevalova ³, I.K. Seminskiy ¹, A.V. Lukhnev ¹, A.A. Bobrov ¹,
E.P. Chebykin ^{1,4}, I.K. Edemskiy ³, A.M. Ilyasova¹, D.V. Salko¹, A.V. Sankov¹, S.A. Korol¹

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

³ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 126a Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

⁴ Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Ulan-Batorskaya St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The article deals with the first results of integrated geohazard monitoring conducted by the Institute of the Earth's Crust SB RAS on the territory of Pribaikalye in 2020. The pilot network consists of three sites: "Buguldeika", "Priolkhonye" and "Listvyanka", each of which is equipped with high-precision digital devices including a broadband seismic station, a GPS receiver, deformometers, a sensor of soil radon emanations, and an observation station for the Earth's electromagnetic environment. This equipment is designed to acquire quantitative information on rock deformation, recent movements and geophysical field variations for solving theoretical and applied problems of geodynamics and seismology, including development of earthquake prediction methods. In the vicinity of the sites, there have been made the hydroisotopic measurements as well as observations over the character of some of exogenous processes. Based on the comprehensive analysis of the seismological, tectonic, deformation and emanation data, acquired also through monitoring, there has been obtained the preliminary characteristics of the Kudarinsky earthquake (December 9, 2020, $M_w=5.6$) that was followed by intensity 5 aftershocks in large cities of the southeastern East Siberia – Irkutsk, Shelekhov, Angarsk, Ussolye-Sibirskoe and others. It has been found that the seismic event manifested itself almost in all the fields monitored. This implies the network efficiency for a purposeful study of the precursors of large earthquakes which can initiate the development of other hazardous geological processes in Pribaikalye. The deformation monitoring data show some general patterns of earthquake source evolution which corresponds to the fundamental principles of physical mesomechanics. This opens the prospects for diagnostics of the final phase of earthquake generation in the context of meta-unstable state of deformation process and rock mass disintegration.

KEYWORDS: hazardous geological processes; monitoring; seismicity; microseismic noise; recent deformations; radon; satellite geodesy; magnetotelluric sounding; hydrogeochemical measurements; Pribaikalye; Kudarinsky earthquake

FUNDING: The work was performed on the project of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation 075-15-2020-787 "Fundamentals, methods and technologies of digital monitoring and ecological forecasting for the Baikal natural territory".

REVIEW

Received: August 25, 2022

Revised: October 11, 2022

Accepted: October 13, 2022

Correspondence: Konstantin Zh. Seminsky, seminsky@crust.irk.ru

FOR CITATION: Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospiev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A., 2022. Integrated Monitoring of Hazardous Geological Processes in Pribaikalye: Pilot Network and First Results. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0677. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0677

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБАЙКАЛЬЕ: ОРГАНИЗАЦИЯ ПИЛОТНОЙ СЕТИ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К.Ж. Семинский¹, А.А. Добрынина^{1,2}, С.А. Борняков¹, В.А. Саньков¹, А.В. Поспеев¹,
С.В. Рассказов¹, Н.П. Перевалова³, И.К. Семинский¹, А.В. Лухнев¹, А.А. Бобров¹,
Е.П. Чебыкин^{1,4}, И.К. Едемский³, А.М. Ильясова¹, Д.В. Салко¹, А.В. Саньков¹, С.А. Король¹

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, Россия

⁴ Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена первым результатам комплексного мониторинга опасных геологических процессов, организованного на территории Прибайкалья в 2020 г. Институтом земной коры СО РАН. Пилотная сеть состоит из трех пунктов – «Бугульдейка», «Приольхонье» и «Листвянка», каждый из которых оснащен современным высокоточным цифровым оборудованием, включающим в себя широкополосную сейсмическую станцию, приемник GPS, деформометры, датчик эманаций почвенного радона, станцию наблюдений за электромагнитным полем Земли. Они позволяют осуществлять сбор количественной информации о деформациях горных пород, современных движениях, вариациях геофизических полей для решения теоретических и прикладных вопросов геодинамики и сейсмологии, в том числе для разработки способов прогноза землетрясений. В окрестностях пунктов проводятся гидроизотопные измерения, наблюдения за характером проявления некоторых экзогенных процессов. На основе комплексного анализа сейсмологических, тектонических, деформационных и эманационных данных, полученных в том числе в режиме мониторинга, составлена предварительная характеристика Кударинского землетрясения (09.12.2020 г., $M_w=5.6$), которое сопровождалось сотрясениями с интенсивностью 5 баллов в крупных городах юга Восточной Сибири – Иркутске, Шелехове, Ангарске, Усолье-Сибирском и др. Установлено, что сейсмическое событие проявилось практически во всех изучаемых в режиме мониторинга полях. Это позволяет рассчитывать на эффективность создаваемой сети для целенаправленного изучения предвестников сильных землетрясений, которые могут инициировать интенсивное развитие других опасных геологических процессов в Прибайкалье. По данным деформационного мониторинга показано закономерное развитие очага готовящегося землетрясения, соответствующее в целом фундаментальным представлениям физической мезомеханики. Это открывает перспективы диагностики заключительной фазы его подготовки в рамках метанестабильной стадии развития деформации и разрушения породного массива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: опасные геологические процессы; мониторинг; сейсмичность; микросейсмические шумы; современные деформации; радон; спутниковая геодезия; магнитотеллурическое зондирование; гидрогеохимические измерения; Прибайкалье; Кударинское землетрясение

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работы проводились в рамках проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимым элементом комплексного мониторинга экологической обстановки в Байкальском регионе является анализ активности опасных геологических процессов эндогенной и экзогенной природы. Это связано с необходимостью отслеживания состояния геологической среды на территории активного природопользования и сохранения оз. Байкал, который признан ЮНЕСКО объектом Всемирного природного наследия. Озеро заполняет котловину, формирующуюся в настоящее время при растяжении земной коры. Тектонический процесс формирует Байкальскую рифтовую зону (БРЗ) и инициирует активизацию опасных геологических явлений, включающих землетрясения, сели, обвалы, оползни и другие процессы, которые, в свою очередь,

приводят к нарушению экологического равновесия в системе оз. Байкал и окружающей территории. Кроме того, они представляют реальную угрозу для бесперебойного функционирования магистральных коммуникаций, ГЭС и стратегически важных производств в регионе, относящихся по классификации МЧС России к первой категории опасности.

Из перечисленных выше опасных процессов и явлений по пространственным масштабам и уровню негативного воздействия на первом месте стоят сильные землетрясения, в связи с чем исследованиям, ориентированным на разработку технологии их краткосрочного прогноза, всегда уделялось и уделяется большое внимание. Создание такой технологии возможно только на междисциплинарной основе, включающей

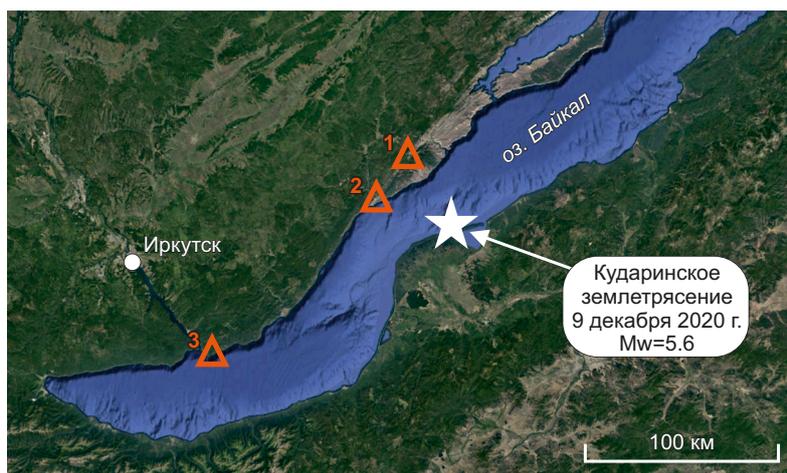


Рис. 1. Пункты комплексного мониторинга ОГП ИЗК СО РАН на территории Южного Прибайкалья (1 – «Приольхонье», 2 – «Бугульдейка», 3 – «Листвянка») и положение эпицентра Кударинского землетрясения.

Fig. 1. HGP integrated monitoring stations of the IEC SB RAS in South Pribaikalye (1 – "Priol'khonye", 2 – "Bugul'deyka", 3 – "Listvyanka") and location of the Kudarinsky earthquake epicenter.

фундаментальные достижения сейсмологии, физической мезомеханики, тектонофизики и других наук, изучающих процессы деформации и разрушения иерархических структурно-неоднородных сред, к которым относится и литосфера Земли.

Исследования опасных геологических процессов (ОГП) проводятся в Прибайкалье на протяжении многих десятилетий, причем некоторых из них на систематической основе. Мониторинг сейсмического режима осуществляет Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) силами его Бурятского и Байкальского филиалов (<http://seis-bykl.ru/>), причем первый из них поддерживает на восточном берегу локальную сеть сейсмостанций для детального мониторинга сейсмичности в центральной части котловины оз. Байкал. С 1994 г. на территории Прибайкалья действует GPS-полигон для мониторинга современных движений и деформаций земной коры. Начиная с двухтысячных годов в различных участках БРЗ проводились систематические измерения деформаций породного массива, эманаций радона и гелия, параметров электромагнитного поля, а также определение состава и режима подземных вод.

Несмотря на периодический характер большинства наблюдений, они послужили основой для создания в профильных институтах РАН (Институт земной коры СО РАН, Геологический институт СО РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и др.) научного задела, объединяющего общие закономерности проявления ОГП в Прибайкалье. Однако для его эффективного использования в целях прогноза чрезвычайных ситуаций необходимы измерения, организованные в ключевых пунктах на постоянной основе с фиксированием серии параметров, свидетельствующих об активности ОГП. Главными среди них являются параметры сейсмического режима и

газовых эманаций, перемещения и деформации земной поверхности в крупных разломных зонах, параметры магнитотеллурического поля, некоторые характеристики подземных вод.

Для этого в Прибайкалье ИЗК СО РАН организована пилотная система мониторинга опасных геологических процессов (для части параметров – в онлайн режиме) на тестовых участках интенсивного развития инфраструктуры Прибайкалья: «Листвянка», «Бугульдейка» и «Приольхонье» (рис. 1). Основу наблюдательной сети в пределах каждого участка составляет пункт комплексного мониторинга ОГП, где измерения осуществляются в режиме, который для каждого отдельного параметра считается постоянным. Инфраструктуру участка дополняют станции систематических сезонных измерений и наблюдений за инженерно-геологическими и другими явлениями, на фоне которых реализуются ОГП. Предполагается, что современная система комплексного мониторинга станет источником кондиционных данных, обработка которых с использованием имеющихся знаний о закономерностях протекания ОГП в Прибайкалье позволит продвигаться в формировании научно обоснованной оценки степени их активности с акцентом на прогноз проявлений катастрофического характера.

В статье на примере пункта «Бугульдейка» представлены основные реализованные в пилотной сети виды мониторинга ОГП, а также возможности комплексных наблюдений в плане исследования землетрясений, которые приводят к сотрясениям с интенсивностью 5 баллов и более в крупных городах Прибайкалья.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА НА ПРИМЕРЕ ПУНКТА «БУГУЛЬДЕЙКА»

Мониторинг сейсмического и микросейсмического режима. С целью мониторинга сейсмического режима на территории Южного Прибайкалья, а также

для разработки по данным мониторинга микросейсмических полей методики обнаружения признаков подготовки близких умеренных и сильных сейсмических событий пункт «Бугульдейка» был оснащен широкополосной сейсмической станцией. Она установлена в подземный бокс из бетонных колец диаметром и высотой по 2 м на бетонном основании толщиной 10 см. В комплект аппаратуры для мониторинга сейсмических и микросейсмических колебаний входят: сейсмометр Trillium Compact Posthole 120, дигитайзер Centaur и автономная система питания на солнечных панелях. Синхронизация по времени осуществляется с помощью аппаратуры GPS. В настоящий момент данные мониторинга сохраняются на карту памяти и переписываются оператором вручную, но в ближайшей перспективе пункт будет оборудован системой сбора – передачи данных, позволяющей в режиме реального времени передавать данные на сервер ИЗК СО РАН.

Сейсмическая станция оснащена тремя датчиками: одним вертикальным и двумя горизонтальными, с ориентировкой соответственно на север – юг и запад – восток. Станция работает в непрерывном режиме, частота дискретизации – 100 отсчетов в секунду, рабочая полоса частот от 0.008 до 108 Гц (рис. 2, а). Указанный частотный диапазон позволяет не только регистрировать локальные, региональные и удаленные землетрясения, но и фиксировать и анализировать вариации микросейсмического поля. На рис. 2, б, где представлен график спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент записи (H/V-отношение), наблюдается пик на частоте 6 Гц. Анализ спектрального состава (рис. 2, б) показывает, что этот пик обусловлен ослаблением колебаний вертикальной компоненты относительно горизонтальных, что свидетельствует о наличии под станцией высокоскоростной горизонтальной границы в среде [Gorbatikov,

Tsukanov, 2011]. Вероятнее всего, это граница между осадочным чехлом и коренными породами.

На рис. 3 приведен пример записей и спектрограмм землетрясений 3 декабря 2020 г. с энергетическим классом $K_p=12.8$ (по данным Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН) и 4 декабря 2020 г. с $K_p=6.5$, зарегистрированных в пункте «Бугульдейка» на эпицентральных расстояниях 480 и 39 км соответственно (здесь и далее по тексту статьи энергетический класс K дан по шкале Т.Г. Раутиан, используемой в Байкальском филиале ФИЦ ЕГС РАН для определения энергии землетрясений). Спектрально-временной анализ записей, полученных широкополосной сейсмической станцией, демонстрирует различие в частотном составе сейсмических волн землетрясений разной силы, что невозможно увидеть при использовании короткопериодной аппаратуры, работающей на большинстве сейсмических станций в регионе.

Широкополосная аппаратура позволяет также проанализировать записи микросейсмических колебаний в большом частотном диапазоне. На рис. 3, д, приведен пример спектрального анализа 10-минутного участка записи микросейсмического шума 4 декабря 2020 г. (с 19 ч 50 мин по Гринвичу). По данным дневника погоды Гисметео (gismeteo.ru) в это время в районе пункта мониторинга был штиль. На спектрограмме выделяются четыре частотных диапазона, в которых происходит усиление колебаний (горизонтальная компонента): 0.12–0.30 Гц, 0.5–1.0 Гц, 2 Гц и 5–7 Гц (рис. 3, д). Два первых диапазона могут быть связаны с байкальскими микросейсмями, для которых характерна частота 0.25–0.50 Гц [Tabulevich et al., 2001]. Важно, что при записи высокочувствительной аппаратурой произошло их разделение на две группы (рис. 3, д). Частотный диапазон 5–7 Гц связан непосредственно со строением верхней части разреза (граница коренных

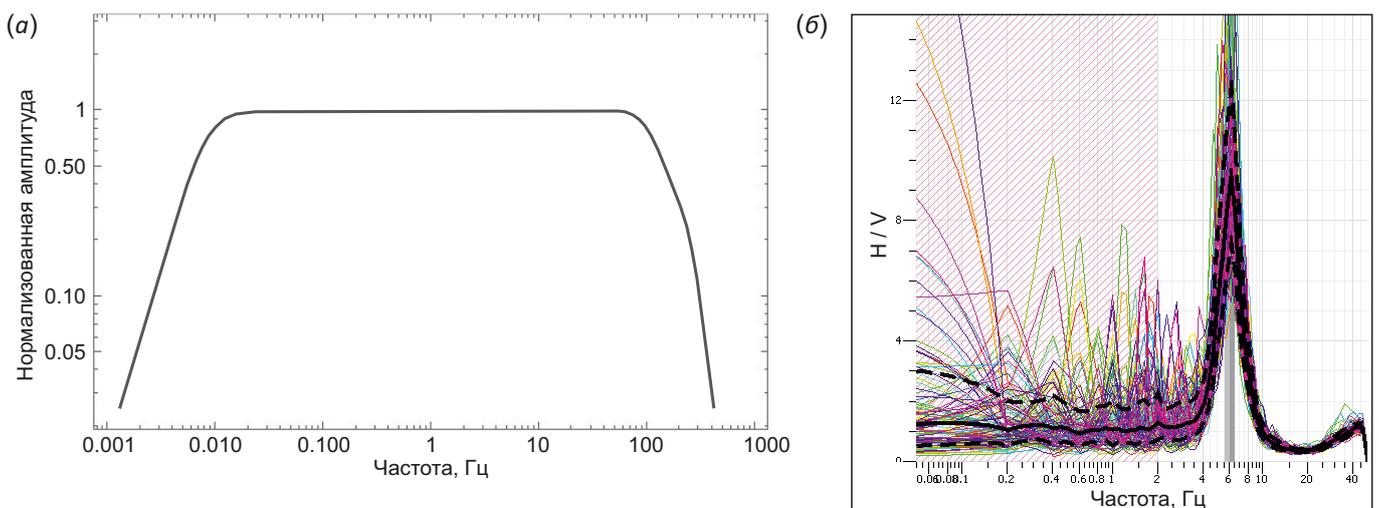


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра (а) и отношение H/V (б) под сейсмической станцией в пункте комплексного мониторинга «Бугульдейка».

Fig. 2. Amplitude-frequency characteristics of seismometer (a) and H/V ratio (b) beneath the “Buguldeika” integrated monitoring station.

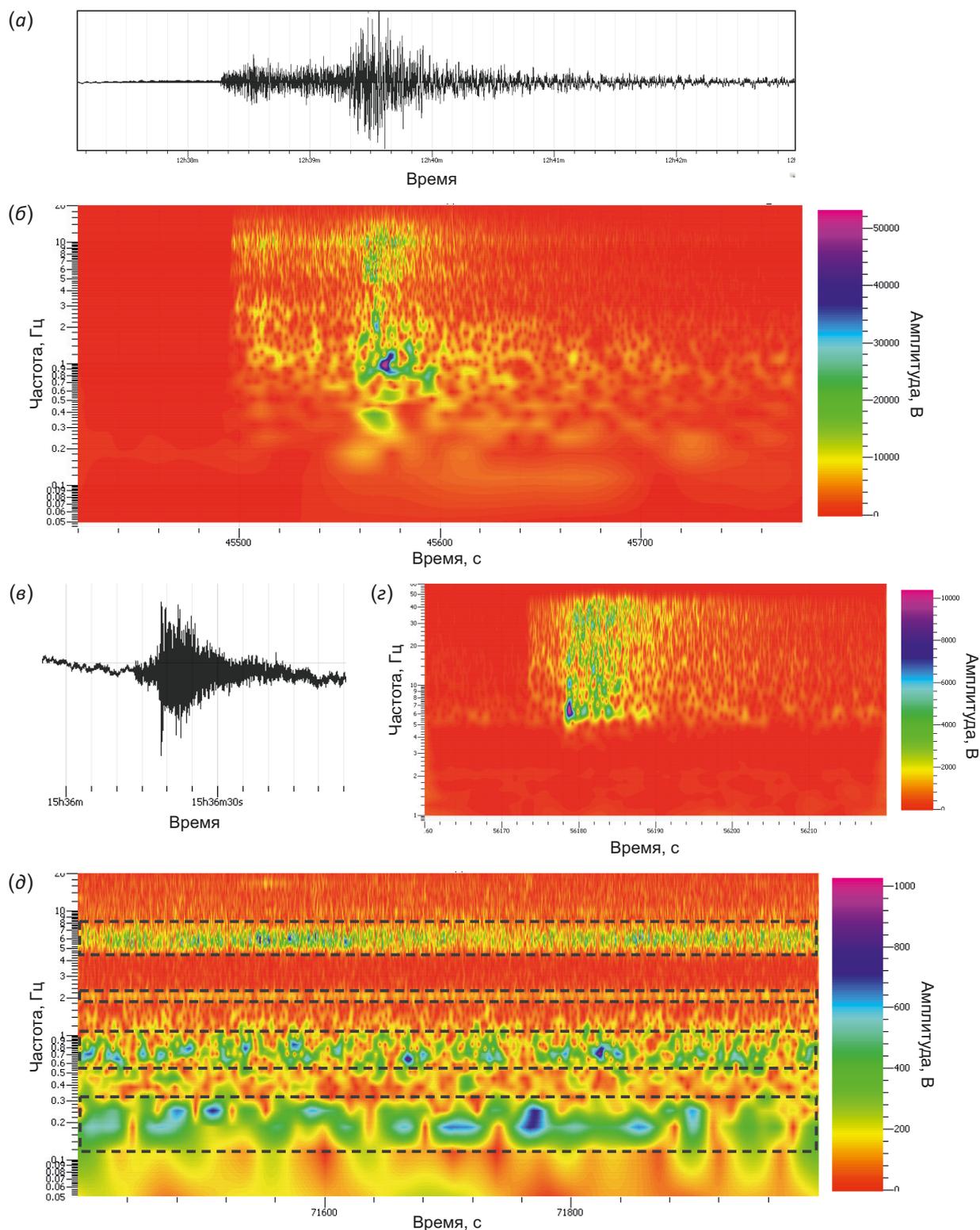


Рис. 3. Записи землетрясений и их спектрограмм, а также спектрограмма микросейсмических колебаний, зарегистрированных сейсмической станцией ИЗК СО РАН в пункте «Бугульдейка».

(a) – сейсмограмма землетрясения 3 декабря 2020 г., (б) – его спектрограмма, (в) – сейсмограмма землетрясения 4 декабря 2020 г. и (г) – его спектрограмма, вертикальные компоненты; (д) – спектрограмма микросейсмического шума, компонента NS, прямоугольниками выделены частотные диапазоны, для которых наблюдается усиление колебаний.

Fig. 3. Seismic records and spectrograms, and a spectrogram of microseismic motions recorded by the "Buguldeika" station of the IEC SB RAS.

(a) – a seismogram of the December 3, 2020 earthquake, (б) – a spectrogram of the December 3, 2020 earthquake, (в) – a seismogram of the December 4, 2020 earthquake, (г) – a spectrogram of the December 4, 2020 earthquake, vertical components; (д) – a spectrogram of microseismic noise, NS component, the rectangles stand for enhanced frequency bands.

пород). Природа относительно слабого узкого пика на частоте 2 Гц, наблюдаемого на всех трех компонентах записи, требует отдельного изучения.

Мониторинг деформаций породного массива и радоновой активности. С целью поиска новых предвестников землетрясений и последующей разработки технологии их прогноза на полигоне «Бугульдейка» создан пункт мониторинга деформаций горных пород в режиме реального времени. Конструктивно он совмещен с датчиком мониторинга концентрации радона в почвенном воздухе, вариации которого широко используются в мире в прогностических целях [Voitov, 1998; Toutain, Baubron, 1999; Utkin et al., 2006; Cicerone et al., 2009; Ghosh et al., 2009; Firstov, Makarov, 2018; и мн. др.].

Основным элементом конструкции пункта является подземный бокс из двух бетонных колец диаметром и высотой по 2 м (рис. 4, а). В бокс выходят концы 10-метровых штанг, расположенных друг к другу ортогонально. На концах закреплены тензометрические датчики деформаций. Со стенкой бокса жестко скреплена металлическая квадратная труба для крепления лазерного дальномера, выходящая на 1.5 м выше поверхности земли (рис. 4, а, б). Бокс перекрыт метровым

слоем песчаного грунта, выполняющим роль термоизолятора и предохраняющим от резкого изменения в нем температуры. Сверху построен небольшой павильон для установки лазера и размещения прибора регистратора, а также компонент системы автономного электроснабжения от солнечных панелей (рис. 4, б, в). Измерения деформаций производятся инструментальным комплексом авторской разработки, состоящим из аналоговых тензодатчиков балочного типа, аналого-цифровых преобразователей (АЦП), прибора сбора и передачи данных (или прибора-регистратора – ПР), а также автономной системы питания из солнечных панелей, контроллера и аккумуляторных батарей. Технические характеристики АЦП и ПР приведены в работе [Salko, Borneyakov, 2014].

Для эманационного мониторинга в траншее рядом с одной из десятиметровых штанг горизонтально размещена восьмиметровая перфорированная снизу пластиковая труба диаметром 110 мм (рис. 4, а). Частая перфорация обеспечивает беспрепятственное проникновение радона в трубу. Для установки радиометра в ее центральной части была сделана врезка вертикальной трубы через Т-образный переходник с выходом последней на поверхность. Для исключения промерзания

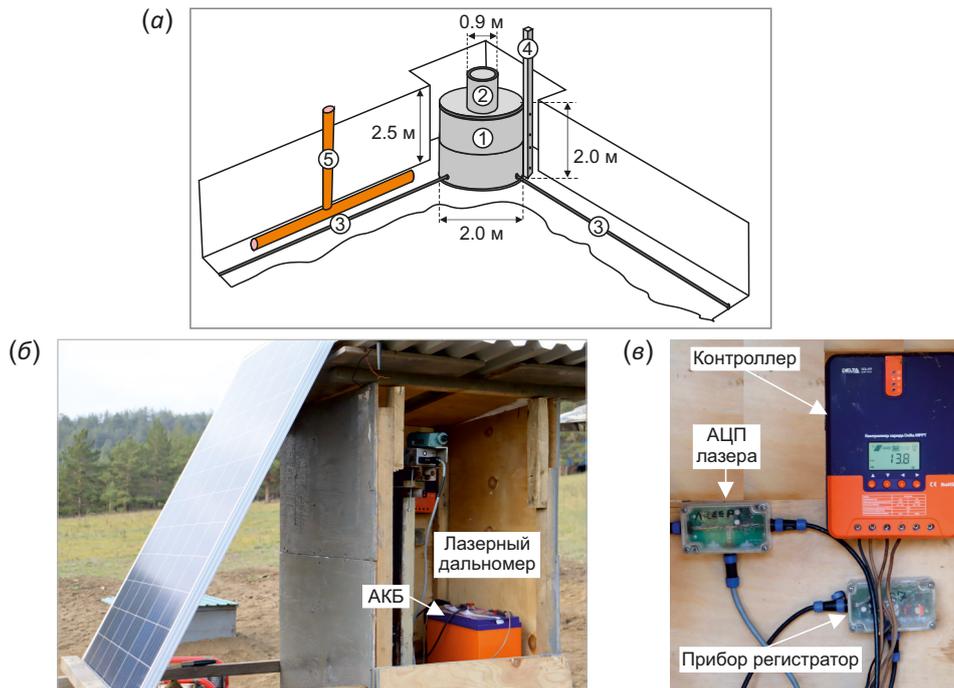


Рис. 4. Схема устройства пункта деформационного и эманационного мониторинга в его подземной части (а) и наземной части (б, в).

(б) – солнечная батарея и павильон для оборудования, (в) – приборы, размещенные в павильоне и предназначенные для регистрации деформаций. 1 – бокс; 2 – лаз в бокс с поверхности земли; 3 – десятиметровые штанги для крепления тензодатчиков; 4 – конструкция для крепления лазерного дальномера; 5 – конструкция для установки радиометра и отбора почвенного воздуха.

Fig. 4. A scheme of arrangement of the deformation and emanation monitoring station in its underground part (а) and overground part (б, в).

(б) – solar battery and equipment pavilion, (в) – equipment installed in pavilion and designed to record deformations. 1 – a box; 2 – a manhole to access the box from the surface; 3 – 10-m tensometer support poles; 4 – laser rangefinder support construction; 5 – a device for radiometer installation and soil air sampling.

который образуют постоянные и временные пункты (рис. 5). Временные пункты оборудованы реперами, закрепленными в коренных породах. Станции постоянных измерений расположены в пределах населенных пунктов и оборудованы постаментами, на которых установлены приемные антенны.

На постоянном пункте наблюдений «Бугульдейка» геодезический репер установлен согласно рекомендациям, принятым для подобного рода измерений. Бетонный якорь залит на глубине 3.9 м, т.е. ниже уровня сезонного промерзания. Антенна установлена и выведена по горизонту на железобетонном столбе. Пункт оборудован приемником Trimble R9 с антенной Zephyr Geodetic. Питание приборов осуществляется от солнечных батарей. Запись сигналов спутников производится с частотой 1 с, что дает возможность получать временные серии смещений в частотном диапазоне, перекрывающемся с частотным диапазоном установленной рядом широкополосной сейсмической станции. Таким образом, колебания земной коры различного происхождения в пункте «Бугульдейка» изучаются в широком диапазоне частот, что может дать новую информацию для изучения процесса подготовки землетрясений, а также позволит рассчитать и дополнить энергетические оценки сильных землетрясений в низкочастотном диапазоне.

Мониторинг магнитотеллурического поля. Электромагнитные исследования являются одним из ведущих методов, используемых при геодинамических наблюдениях. Удельное электрическое сопротивление горных пород является физическим свойством, чувствительным к изменениям объема и структуры порового пространства, температуры и минерализации порово-трещинных флюидов. Подобного рода исследования осуществляются на Бишкекском прогностическом полигоне и ранее проводились в Прибайкалье. В последнем случае, в частности, выполнялись наблюдения на установках постоянного тока с умеренными и большими разносами (0.5–30.0 км).

С учетом опыта проводимого в России и за рубежом мониторинга геоэлектрических свойств геологической среды для прогнозных целей было принято решение применить в рамках пилотной системы комплексного мониторинга ОГП метод магнитотеллурических зондирований (МТЗ). К его преимуществам относится использование естественного электромагнитного поля Земли, наличие современных систем сбора, обработки и интерпретации магнитотеллурических данных. Использование разведочного диапазона 0.001–100 Гц позволяет покрывать при зондировании диапазон глубин от первых сотен метров до десятков километров. Кроме того, особый характер влияния негоризонтальных неоднородностей верхней части разреза на формирование магнитотеллурического поля позволяет использовать его параметры в качестве чувствительного элемента для диагностики изменения геоэлектрических свойств тектонических структур, активных в геодинамическом отношении.

Поскольку магнитотеллурические данные необходимо получать круглогодично с периодичностью несколько зондирований в месяц, в пункте «Бугульдейка» была спроектирована и реализована стационарная 6-компонентная установка. Ее элементами являются:

- горизонтальные электрические линии (Ех, Еу) длиной 50 м (для исключения влияния атмосферных помех линии выкладывались проводом типа КГ–2×0.75 и заглублялись в грунт на 5–10 см);
- вертикальная электрическая линия, организованная на забое и в устье колонковой скважины, обсаженной пластиковыми трубами, глубиной 12 м;
- горизонтальные магнитные каналы, размещенные в деревянных защитных пеналах, уложенных в грунт на глубину 5–10 см;
- вертикальный магнитный канал, организованный в скважине глубиной 1 м;
- семь заземлений на глубине 40–60 см (по два на каждый электрический канал и одно – в центре установки).

Организации заземлений было уделено особое внимание. Для надежной регистрации электрических компонент МТ-поля, особенно вертикальной, требуется обеспечение минимальной собственной поляризации электродов, их низкого сопротивления (не более 10 кОм) и низкого уровня собственных шумов. Для этого использовалась конструкция, приведенная на рис. 6. Так как верхняя часть геоэлектрического разреза в районе пункта МТЗ сложена крупнозернистыми песками с малым количеством пелитовой компоненты, их удельное

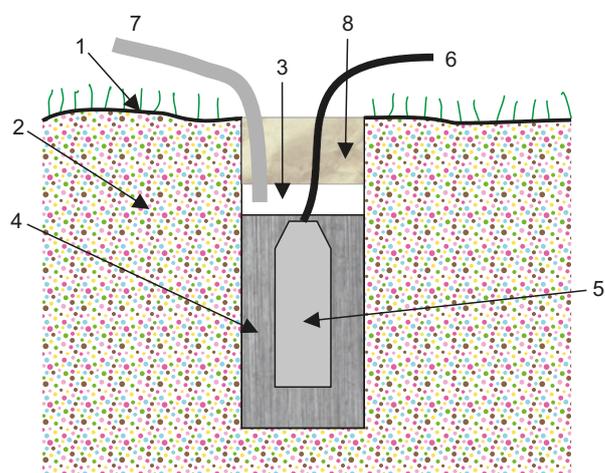


Рис. 6. Конструкция стационарного заземления.

1 – поверхность грунта; 2 – грунт; 3 – скважина; 4 – глина в состоянии густой сметаны, замешанная на подсоленном антифризе; 5 – неполяризуемый электрод, изготовленный из окись-марганцевого деполяризатора с графитовым стержнем; 6 – соединительный провод; 7 – доливочный шланг; 8 – скважинная заглушка.

Fig. 6. A device for the stationary earthing.

1 – ground surface; 2 – ground; 3 – well; 4 – thick-cream clay mixed with salt antifreeze; 5 – non-polarizable electrode made of graphite-rod manganese-oxide depolarizer; 6 – connecting wire; 7 – fill-up hose; 8 – well cap.

электрическое сопротивление даже при частичном увлажнении составляет первые тысячи Ом·м. В связи с этим заземление неполяризуемых электродов осуществлялось в промежуточные объемы. Они изготавливались из глины, замешанной на подсолонном (100 г/л) антифризе. Для предотвращения от высыхания каждый глиняный объем был перекрыт заглушкой с пластиковой трубкой, через которую при необходимости осуществлялся долив жидкости. Представленная конструкция обеспечила возможность поддерживать в необходимых пределах следующие параметры заземления: сопротивление – 1200–1500 Ом·м, собственная поляризация электродов, замеренная относительно центрального, – не более 5 мВ.

Для определения оптимального азимута размотки установки была предварительно записана и обработана точка МТЗ, ориентированная по сторонам света. Поскольку мониторинговые исследования предпочтительно проводить по направлениям осей теллурической неоднородности, установка была развернута по азимуту 345°.

Для размещения магнитометров использовались специальные немагнитные защитные пеналы, частично заглубленные в грунт и ориентированные в соответствии с азимутом установки. Регистрирующая аппаратура и вспомогательные электроды помещались в заглубленный бокс с крышкой.

Измерения МТ-поля на стационарной 5-компонентной установке МТЗ (E_x, E_y, E_z, H_x, H_y) в пункте «Бугульдейка» проводятся и записываются на внешний носитель памяти с периодичностью четыре измерения в месяц. Для регистрации используются магнитотеллурические станции MTU-2000 «Phoenix Geophysics», (г. Торонто, Канада) и МТИ-32 (разработка ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Мониторинг гидроизотопных откликов на сейсмогенные деформации. Для выбора пунктов гидрогеохимического мониторинга в районе пункта «Бугульдейка» опробованы поверхностные воды из бассейнов рек Бугульдейка и Таловка, а также подземные воды родников и скважин на отрезке зоны Приморского разлома от пос. Бугульдейка до пос. Еланцы (рис. 7; табл. 1). Образцы воды отбирались с мая по сентябрь в 2012–2019 гг. Измерялись концентрации урана и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) по методике ИСП-МС анализа, приведенной в работе [Chebykin et al., 2015].

Результаты измерений, получаемых в пункте «Бугульдейка» и двух других пунктах пилотной сети («Листвянка» и «Приольхонье»), аккумулируются на сервере ИЗК СО РАН. Координация работы исследовательских групп и систематизация первичных данных осуществляется Центром комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН. Обработка

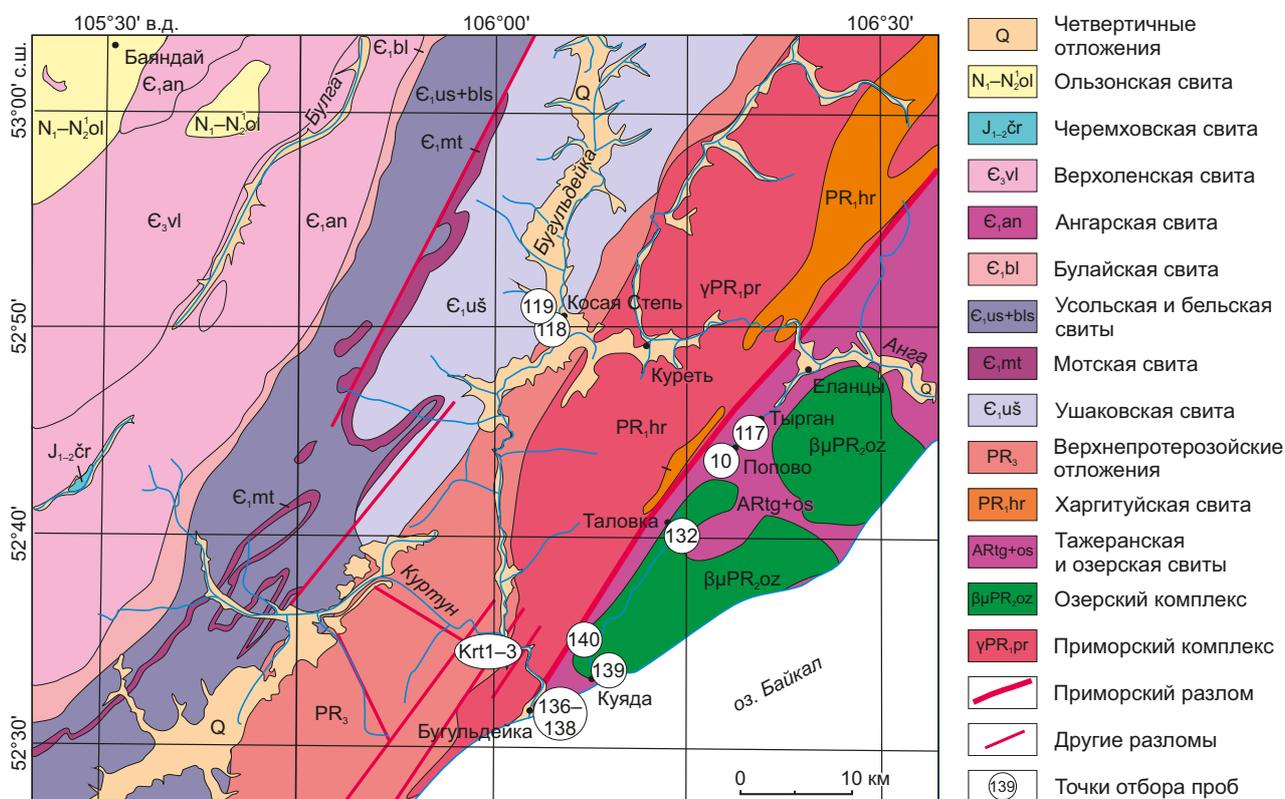


Рис. 7. Схема опробования поверхностных и подземных вод для измерений концентраций U и ОА4/8 в районе пос. Бугульдейка. (Составлена на основе фрагмента Государственной геологической карты м-ба 1:200000).

Fig. 7. Ground- and surface-water sampling plan for measuring U and ОА4/8 concentrations near the village of Buguldeika (based on the fragment of the 1:200000 State geological map).

Таблица 1. Результаты измерений концентраций U и OA4/8 в подземных и поверхностных водах
Table 1. Measuring results for U and OA4/8 concentrations in ground and surface waters

Ст.	Дата	Время	Серия	Объект	Широта	Долгота	U, мкг/дм ³	OA4/8	Отн. ошибка, % (1σ)
Бассейн среднего течения р. Бугульдейка (выше устья р. Куртун)									
118	29.06.2014	20:35	50	р. Бугульдейка	52°50.414'	106°95.034'	0.083	2.14	1.20
119	29.06.2014	20:45	50	руч. Харик	52°50.900'	106°03.968'	0.36	2.70	0.60
Бассейн нижнего течения р. Бугульдейка (ниже устья р. Куртун)									
138	11.06.2015	12:50	65	р. Бугульдейка	52°33.123'	106°03.872'	1.09	5.03	0.46
144	04.06.2016	13:10	77	р. Бугульдейка	52°32.896'	106°03.815'	1.21	4.95	0.52
Krt-1	10.09.2017	14:46	92	р. Куртун	52°35.356'	105°59.058'	0.74	7.15	0.42
Krt-2	10.09.2017	15:10	92	р. Куртун	52°36.161'	105°59.058'	0.71	7.23	0.41
Krt-3	10.09.2017	15:30	92	р. Куртун	52°35.827'	105°57.935'	0.70	7.30	0.40
р. Таловка									
132	21.05.2015	15:30	64	Низовье	52°33.658'	106°07.896'	3.4	2.04	0.77
Приморский разлом									
136	11.06.2015	12:25	65	Скважина	52°32.924'	106°04.310'	10.0	2.99	0.56
137	11.06.2015	12:40	65	Скважина	52°33.155'	106°04.136'	4.0	3.38	0.52
139	12.06.2015	10:00	65	Родник	52°34.921'	106°07.204'	10.3	2.26	0.66
140	11.06.2015	12:20	65	Родник	52°37.706'	106°09.707'	3.0	1.89	0.73
10	29.06.2014	20:10	50	Родник	52°44.429'	106°18.421'	7.5	1.70	0.74
117	22.02.2016	16:00	74	Скважина	52°45.932'	106°20.869'	17.9	1.19	1.10

Примечание. Ст. – станция опробования.

Note. Ст. – sampling station.

полученной информации проводится с применением приемов и способов, разработанных в результате многолетних исследований проявлений ОГП в Прибайкалье. Ниже на примере обработки данных сейсмологического, деформационного, геодезического, эманационного и гидрогеохимического мониторинга, осуществляемого в пункте «Бугульдейка», представлена предварительная характеристика Кударинского землетрясения (09.12.2020 г., $M_w=5.6$), которое сопровождалось сотрясениями с интенсивностью 5 баллов в крупных городах юга Восточной Сибири – Иркутске, Шелехове, Ангарске, Усолье-Сибирском и др.

3. КУДАРИНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКА ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

9 декабря 2020 г. в 21:44:33.7 по Гринвичу (10 декабря в 5 ч 44 мин по местному времени) в дельте р. Селенги произошло землетрясение с энергетическим классом $K_p=13.6$ (координаты: 52.36° с.ш., 106.60° в.д.), получившее название «Кударинское» (см. рис. 1; рис. 8) и сопровождавшееся афтершоковой последовательностью из ~70 более слабых толчков [Tubanov et al., 2021]. Очаг Кударинского землетрясения располагался в зоне

Дельтового сброса, характеризующегося северо-восточным – «байкальским» – простираем. Механизмы очага главного толчка, полученные посредством моделирования объемных и поверхностных волн разными сейсмологическими агентствами, согласуются между собой (табл. 2). Все они (кроме сдвигового механизма, полученного Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН, № 2 в табл. 2) отражают обстановку растяжения коры в направлении СЗ – ЮВ со сбросовыми подвижками в очаге, иногда – с незначительной сдвиговой компонентой. Разница в определении фокальных механизмов может объясняться, во-первых, использованием различных методов и различных типов волн для определения механизма очага (моделирование поверхностных волн с помощью различных алгоритмов и знаки первых вступлений), во-вторых, использованием разных скоростных моделей среды в районе гипоцентра и, в-третьих, сложным строением очага, что подтверждается формой записи, полученной на станции Куяда [Dobrynina et al., 2022]. В этом случае сдвиговый механизм, определенный Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН по знакам первых вступлений, может отражать первую подвижку в очаге, а механизмы, полученные по поверхностным волнам, – основную фазу движения в очаге.

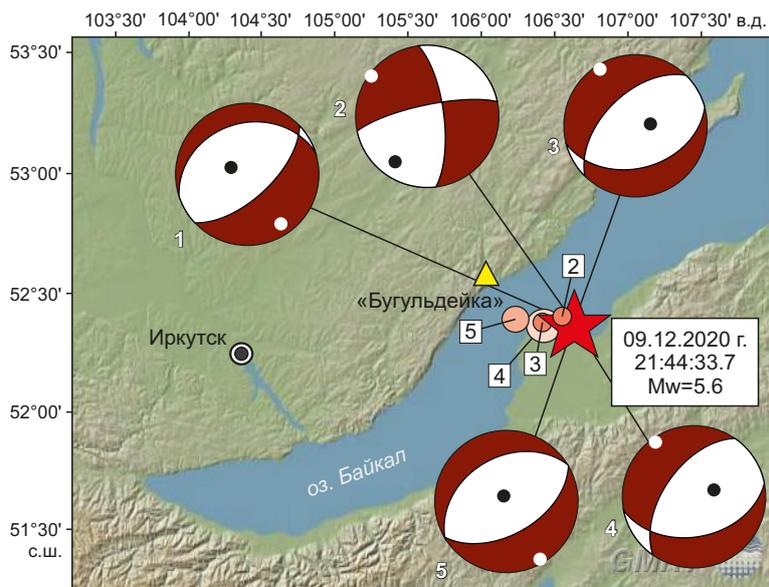


Рис. 8. Положение и механизмы очага Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. Белыми цифрами обозначены решения фокального механизма главного толчка по данным сейсмологических агентств: 1 – GEOFONE, 2 – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН (международный код BAGSR), 3 – Institut de Physique du Globe de Paris, Франция (IPGP), 4 – решение тензора момента центра, The Global CMT Project, Колумбийский университет, США (GCMT), 5 – Geoscience Australia (AUST); цифрами в прямоугольниках показаны номера сильнейших афтершоков (табл. 2).

Fig. 8. Location and focal mechanisms of the December 9, 2020 Kudarinsky earthquake. White figures stand for focal mechanism solutions of the main shock from the data of seismological agencies: 1 – GEOFONE, 2 – Baikal Branch of the FRS GS RAS (international code BAGSR), 3 – Institut de Physique du Globe de Paris, France (IPGP), 4 – centroid moment tensor solution, The Global CMT Project, Columbia University in the City of New York (GCMT), 5 – Geoscience Australia (AUST); figures of rectangles enumerate the largest-aftershocks (Table 2).

Таблица 2. Параметры очага Кударинского землетрясения и его сильнейших афтершоков
Table 2. Parameters of the Kudarinsky earthquake and its largest aftershocks

№	Агентство	M_w	M_0 , Н·м	Н, км	Strike, град.	Dip, град.	Slip, град.
1	2	3	4	5	6	7	8
	GEOFONE	5.5	$1.9 \cdot 10^{17}$	27.0	47	63	-102
	BAGSR	-	-	20.0	353	71	-166
	IPGP	5.5	-	16.0	75	40	-66
1	GCMT	5.5	$2.187 \cdot 10^{17}$	20.3	79	43	-55
	AUST	5.5	$2.021 \cdot 10^{17}$	24.1	60	52	-89.55
	ГИН СО РАН	5.5	$2.35 \cdot 10^{17}$	18.0	-	-	-
	ИЗК СО РАН	5.6	$3.02 \cdot 10^{17}$	-	-	-	-
2	ИЗК СО РАН	3.6	$2.75 \cdot 10^{14}$	-	-	-	-
	ГИН СО РАН	-	-	10.4	-	-	-
3	ИЗК СО РАН	4.2	$1.93 \cdot 10^{15}$	-	-	-	-
	ГИН СО РАН	5.0	$4.42 \cdot 10^{16}$	14.2	-	-	-
4	ИЗК СО РАН	3.4	$1.58 \cdot 10^{14}$	-	-	-	-
	ГИН СО РАН	3.4	$1.60 \cdot 10^{14}$	14.6	-	-	-
5	ИЗК СО РАН	3.7	$3.36 \cdot 10^{14}$	-	-	-	-
	ГИН СО РАН	3.7	$5.13 \cdot 10^{14}$	18.6	-	-	-

Примечание. В графе 1 дан порядковый номер землетрясения; 2 – аббревиатура сейсмологического агентства; 3 – моментная магнитуда; 4 – сейсмический момент; 5 – глубина очага; 6–8 – решение механизма очага: 6 – простирание нодальной плоскости, 7 – угол падения нодальной плоскости, 8 – подвижка.

Note. Column 1 contains the ordinal number of an earthquake; 2 – abbreviation of seismic agency; 3 – moment magnitude; 4 – seismic moment; 5 – focal depth; 6–8 – focal mechanism solutions; 6 – strike, 7 – dip, 8 – slip.

По данным Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН установлено, что Кударинское землетрясение проявилось с максимальной интенсивностью 6–7 баллов по шкале MSK-64 в с. Кудара (расстояние 16 км); в пунктах, расположенных в ближней зоне на расстояниях до 50 км, интенсивность сотрясений колебалась от 5 до 6 баллов. Пятибалльные сотрясения были зафиксированы на расстояниях от 22 до 253 км, в том числе в крупных городах Прибайкалья (Улан-Удэ, Иркутск, Ангарск, Шелехов, Усолье-Сибирское) [Tubunov et al., 2021].

Землетрясение и его афтершоки, а также предшествующие и сопровождавшие его эффекты были зарегистрированы на пункте комплексного мониторинга ИЗК СО РАН «Бугульдейка».

По данным **сейсмомониторинговых измерений** широкополосной станцией на рис. 9, а, представлен фрагмент сейсмограммы Кударинского землетрясения. Оценки моментной магнитуды M_w по данным разных агентств согласуются и равны 5.5. По записям широкополосной сейсмической станции в пункте «Бугульдейка»

(эпицентральное расстояние 39 км) с использованием модели Брюна [Brune, 1970] были оценены очаговые параметры Кударинского землетрясения и его афтершоков: сейсмический момент, моментная магнитуда, геометрические размеры источника и сброшенные напряжения в очаге. При расчетах использовалась стандартная методика определения очаговых параметров по спектру землетрясения, адаптированная для БРЗ [Dobrynina, 2009], а также региональные характеристики затухания сейсмических волн [Dobrynina et al., 2016].

Согласно спектрально-временной диаграмме, максимум излучения пришелся на поперечные волны (рис. 9, б): от 4 до 7 Гц на горизонтальных каналах и от 9 до 12 Гц – на вертикальном. Интересно, что излучение в поперечной S-волне неоднородно и распадается на несколько пакетов, что видно также по форме записи (рис. 9, а). На записи P-волны также присутствует интенсивная вторичная волна (рис. 9, а). Возможно, это указывает на сложный очаг, состоящий из 2–3 субочагов [Dobrynina et al., 2022]. Это может

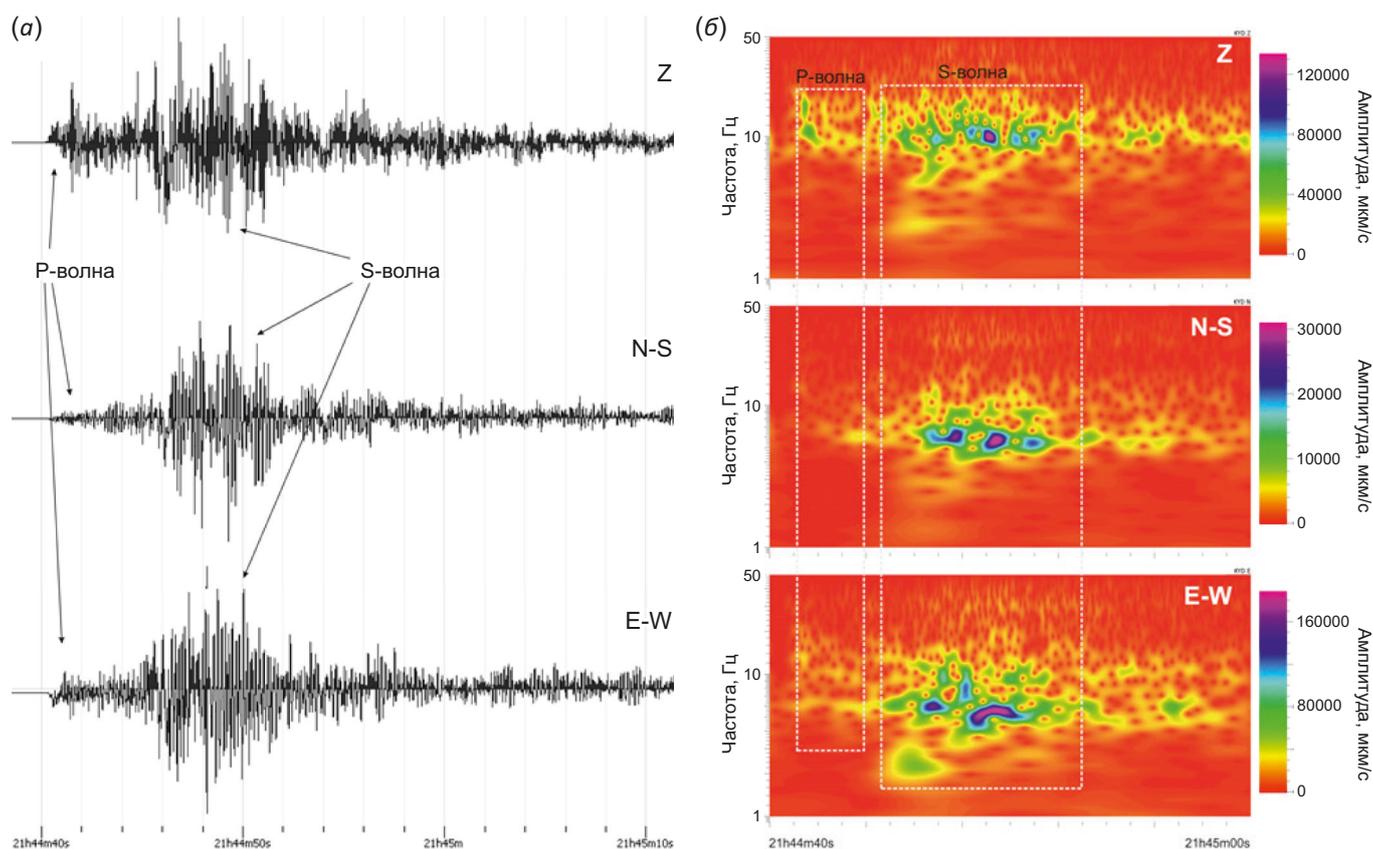


Рис. 9. Фрагмент сейсмограммы Кударинского землетрясения (а) и ее спектрально-временная диаграмма (б), полученные для пункта «Бугульдейка».

Три канала записи: Z – вертикальный, N-S – горизонтальный с ориентацией север – юг, E-W – горизонтальный с ориентацией восток – запад. На сейсмограмме стрелками показаны продольные (P) и поперечные (S) волны, на спектрально-временной диаграмме пакеты волн показаны прямоугольниками.

Fig. 9. A fragment of the Kudarinsky earthquake seismogram (а) and its spectrogram (б) obtained for the "Buguldeika" station. Three recording channels: Z – vertical, N-S – horizontal with north – south orientation, E-W – horizontal with east – west orientation. The arrows on the seismogram show longitudinal (P) and transverse (S) waves; the rectangles in the spectrogram stand for wave packets.

объяснять расхождение, наблюдаемое между механизмом очага, полученным по первым вступлениям продольных волн (и отражающим картину начала движения в источнике) и по результатам моделирования сейсмических волн, показывающим механизм центра (табл. 2).

По записям, полученным на станции Куяда, выполнены оценки параметров очага Кударинского землетрясения и четырех его сильнейших афтершоков. Сейсмический момент главного толчка оценивается в $3.02 \cdot 10^{17}$ Н·м, моментная магнитуда равна 5.6, размеры очага землетрясения рассчитывались для трех субочагов, его суммарный радиус составляет 2.43 км, общая величина сброшенного напряжения – 1.26 МПа (12.6 бар). Сейсмические моменты афтершоков варьируются от $1.58 \cdot 10^{14}$ до $1.93 \cdot 10^{15}$ Н·м, моментная магнитуда – от 3.4 до 4.2 (табл. 2), радиусы очагов землетрясений в приближении круговой дислокации равны 0.11–0.14 км, а величина сброшенных напряжений меняется от 0.2 до 3.7 МПа. Данные значения очаговых параметров сопоставлялись с определениями, представленными в работе [Tubanov et al., 2021] методом инверсии огибающей коды по спектрам Кударинского землетрясения и его афтершоков, полученным на станциях Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН: HRMB (Хурамша), МХМВ (Максимиха), UUDV (Улан-Удэ) и TLY (Талая). Наблюдаемые расхождения в величинах очаговых параметров объясняются, во-первых, использованием разных методов расчета (расчет спектра и инверсия огибающей) и, во-вторых, разным исходным набором данных – в настоящей работе анализировалась запись только на одной сейсмической

станции, что неизбежно дает неопределенность из-за невозможности учесть направленность излучения из очага землетрясения при расчете геометрических размеров источника.

В данных **деформационного мониторинга** подготовка завершающей фазы Кударинского землетрясения нашла отражение на пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье», расположенных на западном берегу оз. Байкал напротив эпицентра на расстоянии 40 км от него (рис. 10). Пункт «Бугульдейка» расположен в зоне сочленения локальных разломов (рис. 10, б). Деформации здесь измеряются в ортогональных направлениях двумя горизонтальными штанговыми датчиками с базой 10 м, заглубленными в грунт на 2.5 м (см. рис. 4, а). Датчик 1 ориентирован по направлению действия регионального растяжения в центральной части Байкальской рифтовой зоны, обусловленного движением Забайкальского блока в юго-восточном направлении. В пункте «Приольхонье» оборудовано две точки измерений, которые находятся в разных структурных ситуациях. Первая точка располагается в зоне разлома, и измерения деформаций в ней проводятся вертикальным штанговым датчиком в скважине на базе 12 м. Вторая точка смещена на 140 м к юго-востоку от первой и расположена в пределах ненарушенного блока. Измерение деформаций в ней проводится одним горизонтальным датчиком с базой 10 м, заглубленным на 2.5 м и ориентированным, так же как в пункте «Бугульдейка», вдоль направления действия регионального растяжения.

Несмотря на относительно близкое расположение пунктов мониторинга «Бугульдейка» и «Приольхонье»,

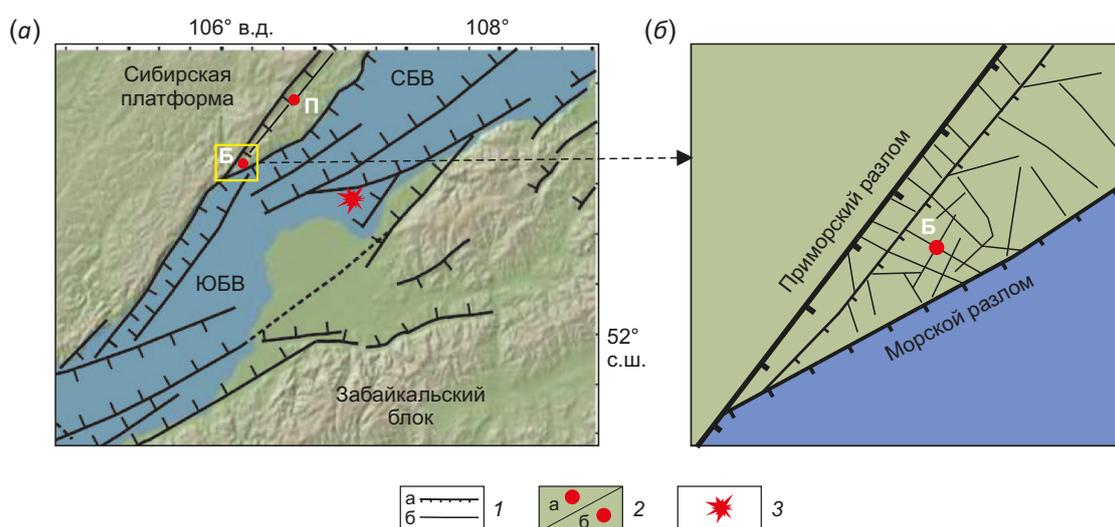


Рис. 10. Места расположения пунктов мониторинга «Бугульдейка» и «Приольхонье» (а) и детализация разломно-блоковой структуры клиновидного блока, вычленяемого Приморским и Морским разломами (б).

1 – крупные сбросы (а) и непротяженные локальные разломы разного морфолого-генетического типа (б); 2 – пункты мониторинга «Бугульдейка» (а) и «Приольхонье» (б); 3 – эпицентр Кударинского землетрясения.

Fig. 10. Locations of "Buguldeika" and "Priolkhonye" monitoring stations (а) and detailing of fault-block structure of the wedge-shaped block isolated by the Primorsky and Morsky faults (б).

1 – large normal faults (а) and non-extended local faults of different morphogenetic types (б); 2 – "Buguldeika" (а) and "Priolkhonye" (б) monitoring stations; 3 – Kuyadarinsky earthquake epicenter.

признаки готовящегося землетрясения проявились в них по-разному. В первом пункте они выразились в синусоидальной реализации деформаций с возрастанием амплитуды колебаний в течение месяца, предшествующего землетрясению (рис. 11, а). Во втором пункте в первой точке за десять дней до него начался экспоненциальный рост деформаций (рис. 11, б), аналогичный зарегистрированному ранее в пункте «Талая» перед Быстринским землетрясением (21 сентября 2020 г., магнитуда $M_w=5.4$) [Bornyakov et al., 2021; Seminsky et al., 2021], но с отличной частной динамикой их развития во времени. Во второй точке визуальных признаков подготовки землетрясения не выявлено.

Отличия деформационных признаков подготовки Кударинского землетрясения в пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье» объясняются разными структурными условиями их расположения. Пункт «Бугульдейка»

находится в месте пересечения двух зон локальных разломов в пределах клиновидного блока, вычленяемого зонами региональных разломов – Приморского и Морского (см. рис. 10, б). Из-за существенной сбросовой амплитуды смещения по Морскому разлому верхняя часть блока с юго-восточной стороны контактирует с водной линзой и осадочным наполнением Южно-Байкальской впадины, не способными передать на него действующее региональное растяжение. Выявленный по данным мониторинга колебательный характер деформаций перед Кударинским землетрясением имеет вторичную природу и связан с «раскачкой» блока под действием усилившегося растяжения подстилающих его более глубоких горизонтов коры.

Пункт «Приольхонье» находится в зоне локального разрыва, оперяющего Приморский разлом. За счет существенной удаленности последнего от Морского

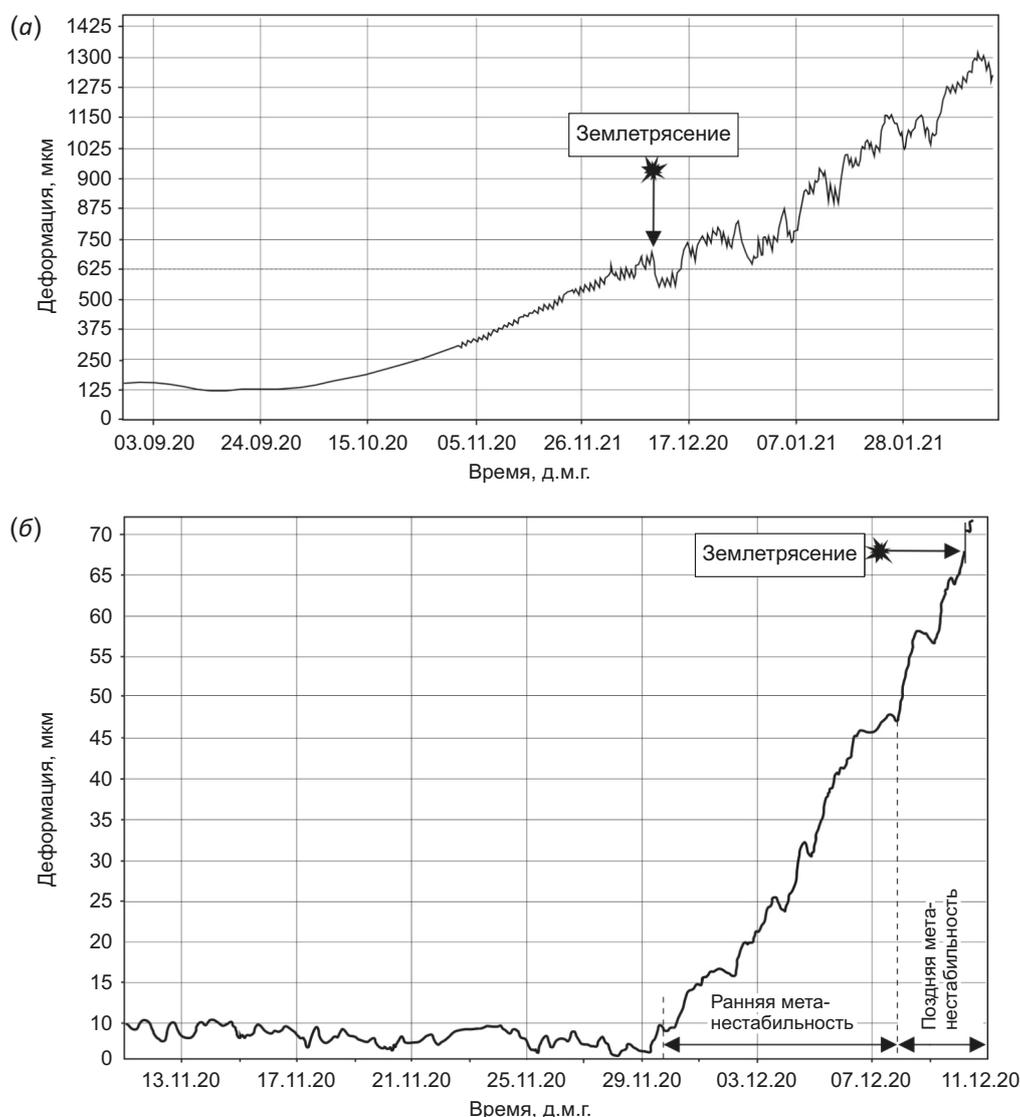


Рис. 11. Изменение деформаций горных пород во времени с тензодатчиков 1 и 2 в пункте мониторинга «Бугульдейка» (а) и в точке 1 пункта «Приольхонье» (б).

Fig. 11. Temporal variations of rock deformations recorded by tensometers 1 and 2 at the "Buguldeika" monitoring station (a) and in point 1 of the "Priolkhonye" station (b).

разлома (14–15 км) на него уже распространяется действие регионального растяжения. Как следствие, имеет место отклик на процесс подготовки Кударинского землетрясения в виде резкого увеличения деформаций в точке 1, которая расположена вблизи сместителя одного из локальных разломов, принадлежащих к зоне влияния Приморского сброса. Блоки, в отличие от разломов, являются консервативными структурами и не чувствительны к действующему растяжению, что и стало причиной отсутствия отклика на землетрясение в точке 2.

Динамика развития деформаций в пункте «Приольхонье» перед Кударинским землетрясением может быть рассмотрена с позиции модели «stick-slip» [Brace, Byerlee, 1966] в ее синергетической интерпретации [Ma et al., 2014]. Согласно цитируемой работе, в нагруженной системе из двух контактирующих по разрыву блоков гранодиорита деформационный процесс, предшествующий реализации импульсной подвижки, развивается стадийно. Первая метастабильная стадия имеет место при достижении пикового значения приложенной к системе нагрузки. Ее переход во вторую, метанестабильную, стадию начинается с первичным падением напряжений за счет активизации отдельных небольших сегментов разлома. Эта стадия по динамике развития деформационного процесса подразделяется на подстадии ранней и поздней метанестабильности. В первую подстадию происходит медленный спад напряжений за счет постепенного увеличения изолированных микроочагов активизации деформации на плоскости разрыва. Во вторую подстадию, именуемую также подстадией ускоренного синергизма, реализация деформаций нарастает и ускоряется. Синергизм проявляется в тот момент, когда квазистатическое состояние трансформируется в квазидинамическое благодаря кооперативному взаимодействию активизированных сегментов разлома. Изолированные взаимодействующие

сегменты начинают объединяться, что соответствует критическому предсейсмогенному состоянию разлома [Ma et al., 2012, 2014]. Более детальное экспериментальное изучение метанестабильного состояния позволило установить тремор подобных смещений при его реализации [Zhuo et al., 2018].

Описанная динамика подготовки импульсного смещения по разрыву в метанестабильную стадию укладывается в представление о структурных уровнях деформации в твердых телах [Panin, 1998; Panin et al., 1985, 1990]. Несмотря на то, что основные положения физической мезомеханики были предложены для описания пластической деформации, они имеют универсальный характер и могут быть использованы для интерпретации процессов разрыво- и разломообразования [Bornyakov et al., 2001]. Рассматривая описанную выше модель с позиции структурных уровней деформации, можно констатировать, что в подстадии ранней и поздней метанестабильности реализуются соответственно микро- и мезоуровни деформационного процесса. Неотъемлемым атрибутом последнего является развитие самоорганизации активизированных сегментов разлома.

Динамика развития деформаций в пункте «Приольхонье» перед Кударинским землетрясением согласуется с динамикой развития деформаций на ранней и поздней подстадиях метанестабильной стадии [Ma et al., 2014]. Это позволяет рассматривать описанное выше аномальное изменение в деформационном процессе перед Кударинским землетрясением (рис. 11, б), а несколькими месяцами ранее – перед Быстринским землетрясением [Bornyakov et al., 2021; Seminsky et al., 2021] как один из устойчиво проявляющихся признаков приближения сейсмического события.

В данных **эманационного мониторинга**, представленном графиком вариаций объемной активности почвенного радона (рис. 12), Кударинское землетрясение

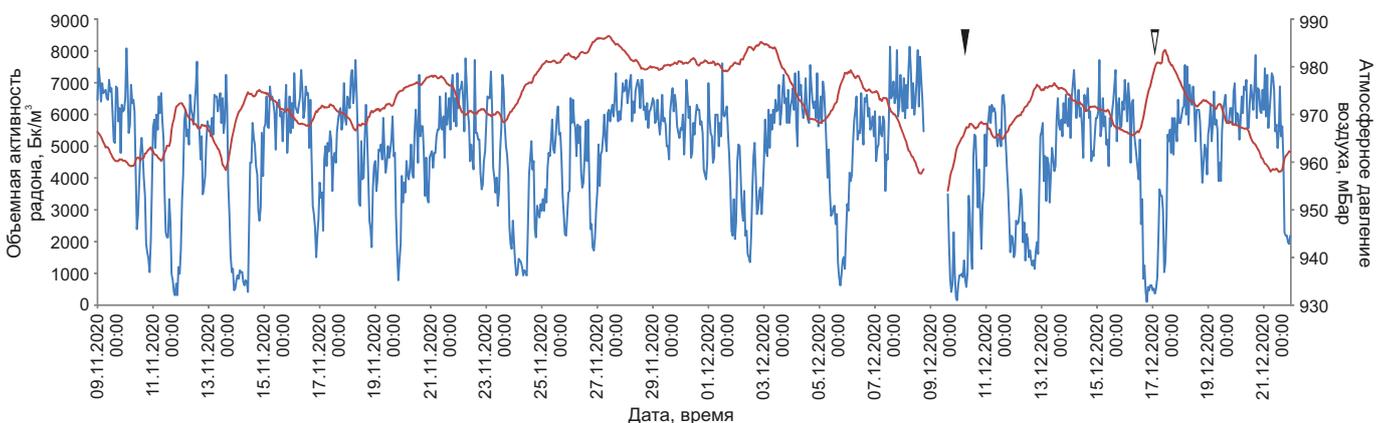


Рис. 12. График вариаций объемной активности радона (синий цвет) и атмосферного давления (красный цвет) на мониторинговой станции «Бугульдейка». Треугольники сверху – момент Кударинского землетрясения (залит черным цветом) и афтершока 16.12.2020 г. (по UT).

Fig. 12. A curve showing the variations of volumetric activity of radon (blue) and atmospheric pressure (red) recorded at "Buguldeika" monitoring station. Triangles at the top are the moments of the Kударинский earthquake (filled black) and December 16, 2020 aftershock (UT).

проявилось в виде локального пика в 1407 Бк/м^3 , расположенного в области в целом пониженных значений Q . Еще более низкая величина данного параметра соответствует одному из наиболее сильных афтершоков ($K=10.7$), произошедшему 16 декабря 2020 г. в 17:43:40.5 (по UT). Следует отметить, что подобный отклик в эманационном поле был зафиксирован в пунктах мониторинга «Листвянка» и «Приольхонье» от Быстринского землетрясения, произошедшего 21.09.2020 г. ($M_w=5.4$) вблизи южной оконечности оз. Байкал [Seminsky et al., 2021]. Как и ранее, причиной подобных вариаций можно считать сжатие породного массива перед землетрясением, в результате чего выход радона из него затруднен, с последующим раскрытием пор и трещин, сопровождающимся интенсивными эманациями радиоактивного газа [Kuo, 2014].

Отличие проявления Кударинского землетрясения в вариациях объемной активности радона в пункте «Бугульдейка» заключается в том, что абсолютные величины пиков, наблюдающихся после сейсмического события, не являются аномально высокими в пределах периода наблюдений (рис. 12). В качестве еще одного отличия следует выделить взаимоотношения газовых эманаций и атмосферного давления, которые, судя по данным предыдущих исследований [Zmazek et al., 2003; Seminsky, Bobrov, 2013], изменяются в противофазе в условиях стабильного тектонического режима и нарушают синхронность вариаций в ходе подготовки сильных землетрясений. Судя по рис. 12, явно (визуально) выраженного предвестника подобного типа для Кударинского землетрясения в пункте «Бугульдейка» не обнаружено. Таким образом, Кударинское землетрясение проявилось в поле эманаций радона на пункте «Бугульдейка» в меньшей степени, чем, например, Быстринское. Здесь тектонический фактор по воздействию на породный массив существенно не превысил влияния атмосферной нагрузки. На данном этапе исследования установленный результат, как и для деформационного мониторинга, следует связывать с недостаточной чувствительностью пункта мониторинга для землетрясений, подобных Кударинскому.

Мониторинг современных движений земной коры методом GPS-геодезии позволил получить на пункте KYAD (пункт «Бугульдейка») первые записи в период подготовки Кударинского землетрясения (см. рис. 5; рис. 13). Система передачи данных с пункта «Бугульдейка» находится в стадии разработки, в то время как с пункта TRGN (пункт «Приольхонье») данные получены с использованием сотовой связи (см. рис. 5). Из фрагмента записи 9 декабря 2020 г. видно, что временные серии пунктов TRGN и KYAD практически идентичны (рис. 13, а). Следует заметить, что поведение этих двух кривых на диаграммах сильно отличается от хода кривой для пунктов BADG и ZKMN (Бадары, Тункинская впадина и Закаменск) (см. рис. 5; рис. 13). Колебания последней кривой для пункта BADG возле условно среднего значения весьма невелики, в то время как вариации кривых для TRGN, KYAD, а также для ZAKM

достигают высоких значений, и они имеют периодический характер. Вместе с тем после момента землетрясения 09.12.2020 г. ($M_w=5.6$) на всех кривых появились необычные для них вариации, которые не характерны для предыдущих трендов. Эти вариации, по-видимому, не могут быть объяснены упругим или упругопластичным последствием, так как они одновременно появились на станциях, расположенных от 47 до 325 км от эпицентра.

Поскольку эти эффекты могут быть обусловлены состоянием ионосферы, ее поведение во время Кударинского землетрясения определялось по данным нескольких сетей наземных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), действующих в Восточно-Азиатском регионе: Международной глобальной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), российской федеральной сети базовых станций EFT-CORS (<https://eft-cors.ru/>), российской сети базовых станций системы NIVE (<https://hive.geosystems.aero/>), сети постоянно действующих приемников ГНСС ИЗК СО РАН [Sankov et al., 2011], сибирской сети SibNet постоянно действующих приемников ГНСС Института солнечно-земной физики СО РАН [Ishin et al., 2017; Yasyukevich et al., 2018]. Расположение станций ГНСС показано на рис. 14, а.

По стандартной методике [Calais, Minster, 1995, 1996; Afraimovich et al., 1998; Hofmann-Wellenhof et al., 2008] на основе двухчастотных фазовых измерений приемников ГНСС были рассчитаны ряды наклонного полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере вдоль лучей «приемник ГНСС – спутник ГНСС». Для поиска возмущений, связанных с Кударинским землетрясением, полученные ряды наклонного ПЭС были отфильтрованы в диапазоне периодов 1–10 мин с помощью метода скользящего среднего [Afraimovich et al., 1998]. Был рассчитан также индекс ROTI (Rate of change of TEC Index) [Pi et al., 1997; Jacobsen, Dähn, 2014], определявшийся как среднеквадратичное отклонение скорости изменения ПЭС на интервале времени 5 мин. Для минимизации искажений, зависящих от углов места спутников ГНСС, значение ROTI рассчитывалось с использованием функции корректировки геометрии наблюдений (mapping function) [Juan et al., 2018]. Вариации ПЭС и индекса ROTI в день землетрясения 9 декабря 2020 г. сравнивались с их поведением в контрольные дни 8 и 10 декабря 2020 г. Кударинское землетрясение произошло в спокойных геомагнитных условиях (9–10 декабря 2020 г. индекс Dst варьировался от -6 до $+18$ нТл, индекс Kp не превышал 3), что повышало вероятность выделения возмущений, вызванных землетрясением.

Вследствие интегрального характера ПЭС и малой амплитуды генерируемых атмосферных волн землетрясения с магнитудой менее 6.5 практически не проявляются в вариациях ПЭС, определяемого по данным ГНСС (ГНСС–ПЭС) [Perevalova et al., 2014]. Отклик на Кударинское землетрясение ($M_w=5.6$) можно было ожидать только на лучах «приемник ГНСС – спутник ГНСС», проходивших вблизи от эпицентра в момент главного

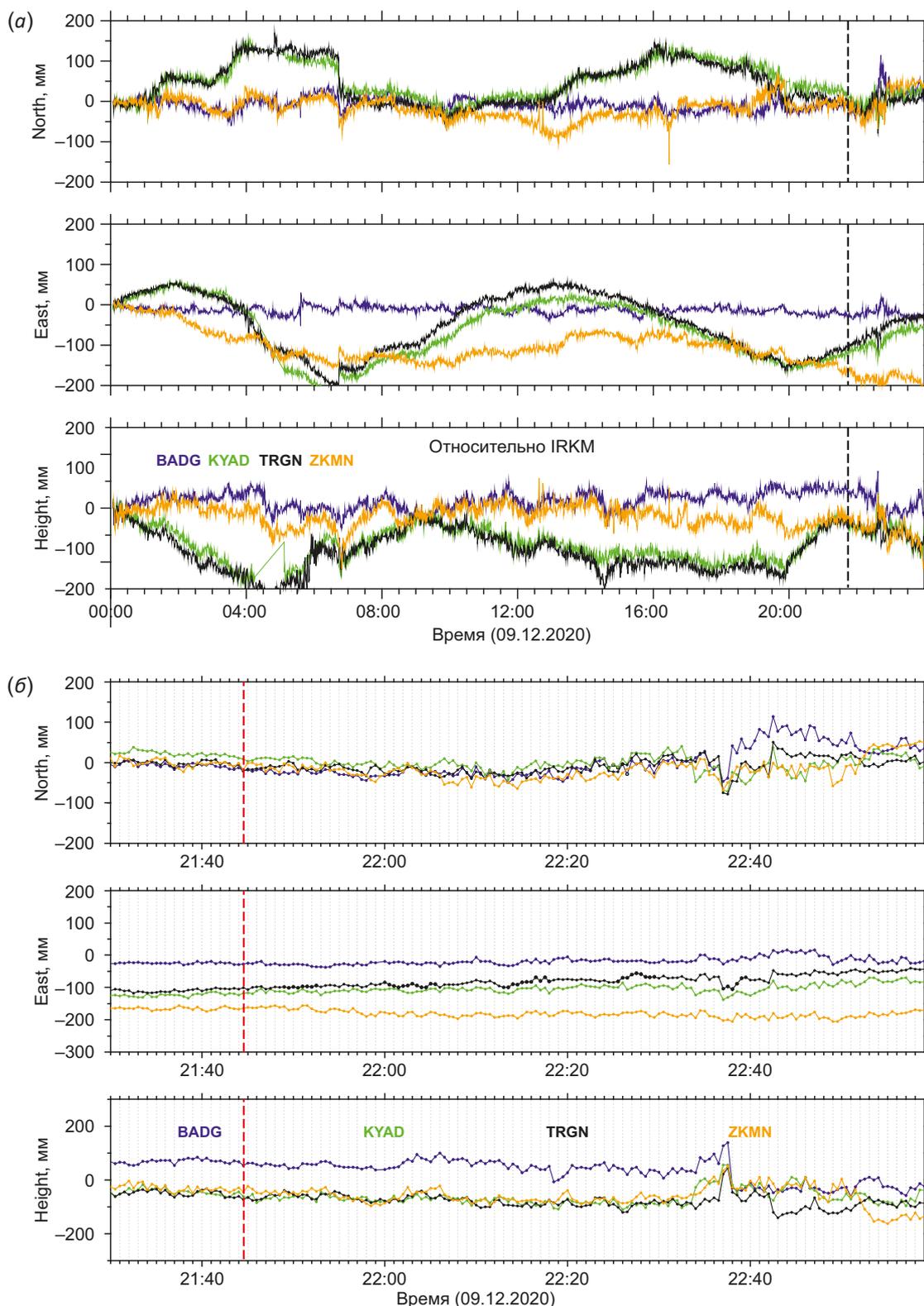


Рис. 13. Отражение Кударинского землетрясения 09.12.2020 г. ($M_w=5.6$) во временных сериях для пунктов BADG (Бадары), ZKMN (Закаменск), TRGN (пункт «Приольхонье») и KYAD (пункт «Бугульдейка») за период с 00:00 по 24:00 (а) и укрупненно за период с 21:30 по 22:59 (б) по UT 9 декабря 2020 года по долготной (North), широтной (East) и вертикальной (Height) компонентам относительно пункта IRKM (Иркутск). Вертикальным пунктиром показан момент землетрясения 09.12.2020 г. ($M_w=5.6$).

Fig. 13. Reflection of the December 9, 2020 Kударинский earthquake ($M_w=5.6$) in time series for BADG (Badary), ZKMN (Zakamensk), TRGN ("Priolkhonye" station) and KYAD ("Buguldeika" station) points from 00:00 to 24:00 (a) and, as enlarged, from 21:30 to 22:59 (b) (UT) on longitudinal (North), latitudinal (East) and vertical (Height) components relative to IRKM (Irkutsk) point. Vertical dashed lines show the moment of the December 9, 2020 earthquake ($M_w=5.6$).

толчка. Проекция траекторий спутников ГНСС на высоте главного максимума ионизации в ионосфере ($h_{max} = 300$ км) для таких лучей показаны на рис. 14, б. Точками на траекториях отмечен момент землетрясения (21:44 UT); цвет точки соответствует цвету луча. Для лучей, приведенных на рис. 14, б, расстояние до эпицентра на высоте h_{max} в момент землетрясения не превышало 200 км.

Примеры вариаций отфильтрованного наклонного ПЭС и индекса ROTI на лучах, проходивших в непосредственной близости от эпицентра Кударинского землетрясения, приведены на рис. 15. На лучах ANGR-G02, IRKJ-G02, SLNG-G02, USSB-G02, UUDG-G02, SLNG-R24, LIST-R24, IRKM-R01, IRKN-R24, USSB-R24 через 17–20 мин после главного толчка в поведении ПЭС можно выделить небольшие возмущения, амплитуда которых (0.03–0.08 TECU, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$) слегка превышает уровень фоновых вариаций. Указанные возмущения

ПЭС сопровождаются соответствующими возмущениями индекса ROTI. Однако в контрольные дни 8 и 10 декабря 2020 г. в поведении ПЭС и ROTI (серые кривые на рис. 15) наблюдаются аналогичные возмущения. Это не позволяет считать, что возмущения 9 декабря 2020 г. вызваны землетрясением, и свидетельствует о том, что такие возмущения являются характерными на данных лучах в данное время. На остальных лучах «приемник ГНСС – спутник ГНСС» не удается выделить возмущений ПЭС и ROTI на уровне фоновых флуктуаций. Исследование вариаций ПЭС и индекса ROTI на лучах, проходивших в момент землетрясения на большем удалении от эпицентра (200–350 км), также не выявило возмущений, обусловленных Кударинским землетрясением. Можно отметить, что на многих удаленных лучах как в день землетрясения, так и в контрольные дни поведение ПЭС и индекса ROTI отличалось сильной фоновой изменчивостью.

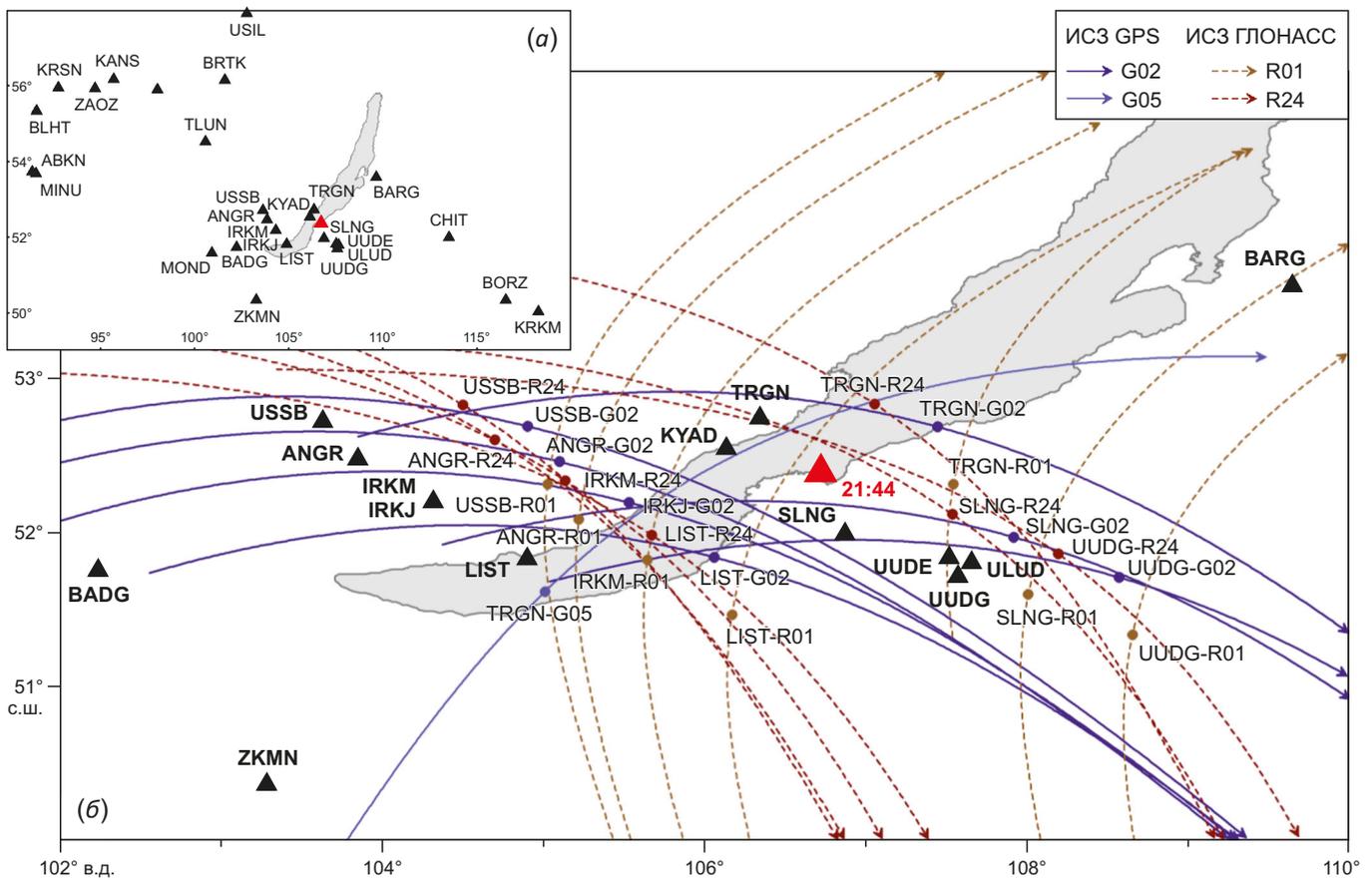


Рис. 14. Геометрия ГНСС-измерений во время Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. (а) – станции ГНСС; (б) – лучи «приемник ГНСС – спутник ГНСС», проходившие вблизи от эпицентра. Эпицентр землетрясения отмечен красным треугольником, станции ГНСС – черными треугольниками. Линии со стрелками показывают проекции траекторий спутников GPS (сплошные линии, "G") и ГЛОНАСС (пунктирные линии, "R") на высоте $h_{max} = 300$ км, наблюдавшихся на станциях ГНСС 09.12.2020 в период 20:00–24:00 UT. Цвет линии соответствует номеру спутника ГНСС. Точками на траекториях отмечен момент землетрясения (21:44 UT).

Fig. 14. The geometry of GNSS measurements during the December 9, 2020 Kudarynsky earthquake. (a) – GNSS stations; (б) – "GNSS receiver – GNSS satellite" ray paths near the epicenter. The earthquake epicenter is represented by a red triangle, GNSS stations – by black triangles. The arrowed lines show the projections of GPS (solid lines, "G") and GLONASS (dotted lines, "R") satellite traces at a height of $h_{max} = 300$ km, recorded at GNSS stations on December 9, 2020 from 20:00 to 24:00 UT. The line color corresponds to the GNSS satellite number. The dots on the traces indicate the seismic moment (21:44 UT).

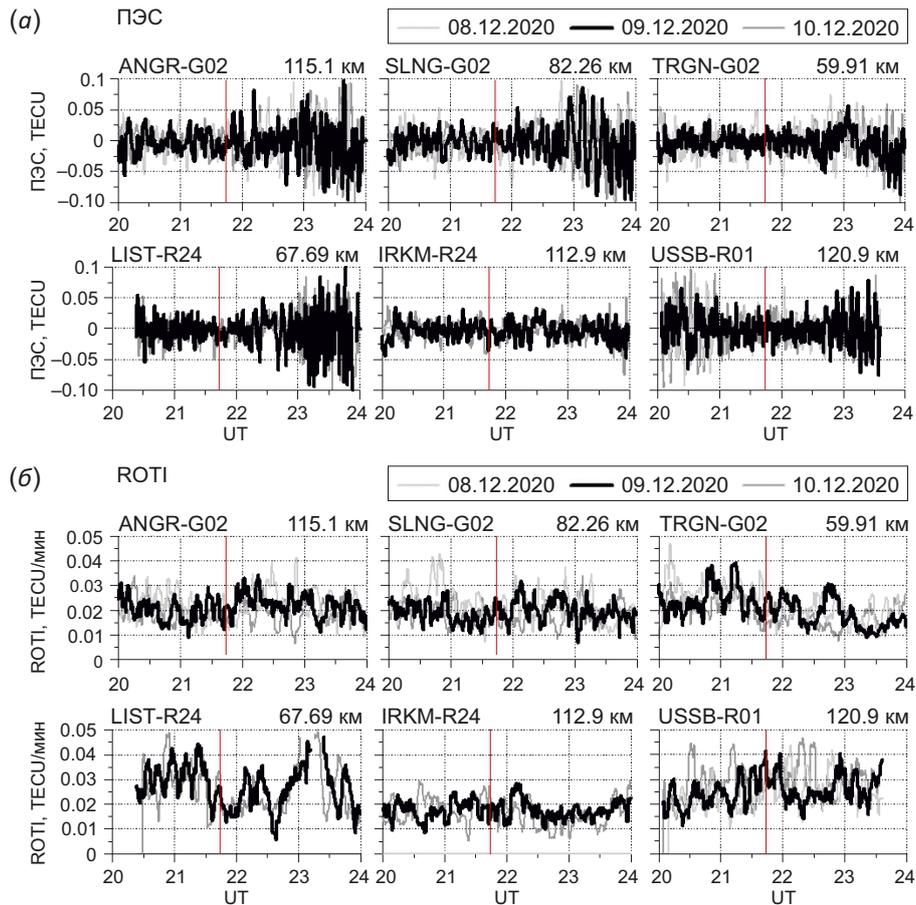


Рис. 15. Примеры вариаций отфильтрованного ПЭС (а) и индекса ROTI (б) на лучах «приемник ГНСС – спутник ГНСС», прошедших вблизи от эпицентра Кударинского землетрясения. Момент землетрясения отмечен красной линией. Вверху панелей указано название луча и его расстояние до эпицентра в момент землетрясения на высоте $h_{max}=300$ км.

Fig. 15. Examples of the variations in the filtered TEC (a) and ROTI index (b) on GNSS receiver-to-GNSS satellite ray paths near the Kudarinsky earthquake epicenter.

The moment of the earthquake is indicated with a red line. The top panels show the name of the ray and the ray paths with an epicenter distance at the moment of the earthquake at height $h_{max}=300$ km.

Таким образом, проведенный с помощью приемников ГНСС анализ поведения ПЭС и скорости его изменения (индекса ROTI) не выявил возмущений в ионосфере, обусловленных Кударинским землетрясением. Можно полагать, что это связано, прежде всего, с малой амплитудой акустико-гравитационных волн (АГВ), вызванных землетрясением в нейтральной атмосфере. Как известно, амплитуда АГВ зависит от величины и характера смещений поверхности Земли во время землетрясения. Основными факторами, влияющими на амплитуду АГВ, являются энергия, магнитуда и механизм очага землетрясения. При малой магнитуде Кударинского землетрясения ($M_w=5.6$) амплитуда вызванных им АГВ, вероятно, оказалась слишком малой для того, чтобы привести к возмущениям ПЭС в ионосфере, различимым на уровне фоновых флуктуаций. Другим важным фактором, повлиявшим на отсутствие отклика, является чувствительность метода ГНСС-зондирования: он позволяет определять ПЭС, которое является интегральным параметром. Возмущения локальной

электронной концентрации с малой амплитудой, возможно вызванные землетрясением в нижних слоях ионосферы (области E, D), могли не проявляться в вариациях ПЭС.

Мониторинг магнитотеллурического поля позволил получить ряды наблюдений, обеспечивающих возможность стандартной обработки по программам SSMT («Phoenix Geophysics», г. Торонто) и EPI-KIT (ООО «Северо-Запад», г. Москва). Кроме того, была сформирована программа просмотра записей МТ-поля поля «ViewField» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), позволяющая проводить совмещение и масштабирование полей, оценки скользящей корреляции, вычисление спектральных характеристик, в том числе массивов спектрально-временного анализа.

В рассматриваемом случае наибольший интерес вызывают результаты анализа измерений тех аномальных компонент МТ-поля, которые испытывают гальваническое влияние латеральных неоднородностей геологического разреза. В частности, особое значение

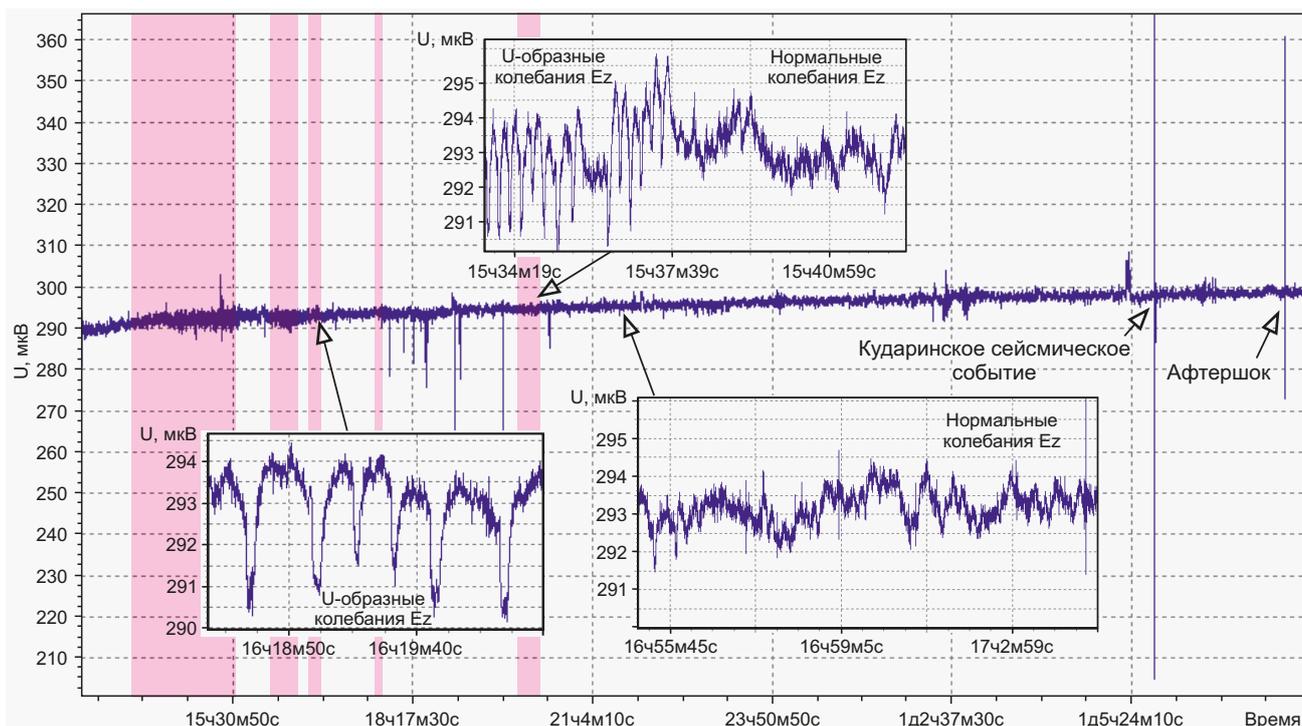


Рис. 16. Окно программы «ViewField» с визуализацией записи вертикальной электрической компоненты E_z в период 9–10 декабря 2020 г. Розовые полигоны – периоды следования аномальных U-образных колебаний с частотами 0.70–0.12 Гц.

Fig 16. «ViewField» window with a visualization of the record of vertical electrical component E_z for the period December 9 to December 10, 2020. Pink polygons are the periods of anomalous U-shaped oscillations with frequencies from 0.70 to 0.12 Hz.

придавалось регистрации вертикальной компоненты электротеллурического поля, которая наиболее чувствительна к перетоку теллурических токов, инициируемому подготовкой землетрясения.

На рис. 16 представлено поведение вертикальной электрической компоненты E_z (линия размещена в 12-метровой вертикальной необсаженной скважине) перед сейсмическим событием 9 декабря 2020 г. и после него. Регистрация МТ-поля была начата 09.12.2020 г. в 13 ч 09 мин 02 с по иркутскому времени. Примерно через час характер флуктуаций E_z существенно изменился – вместо хаотичных колебаний в поле появились отчетливые U-образные сигналы с периодом 2–3 с и относительной амплитудой 1.5–2.0 мкВ (на линии 12 м). В течение примерно 1.5 ч амплитуда вариаций несколько увеличивалась, а период возрос до 6–8 с. Следующие интервалы проявления подобных колебаний длительностью от 5 до 10 мин отмечены в 16:10, 16:50, 17:50 и 20:00.

После сейсмического события по настоящее время аномальные вариации подобного рода не наблюдались. Кроме того, они отсутствовали в течение всей записи на горизонтальных компонентах электромагнитного поля. Не исключено, что подобное поведение вертикальной компоненты электрического поля связано с электрострикционными явлениями в процессе изменения тектонических напряжений, обусловленных подготовкой Кударинского землетрясения.

Еще одним важным наблюдением является десятипроцентное увеличение электрической проводимости

на глубине 8–13 км, произошедшее за месяц до сейсмического события. Через четыре месяца после события установившаяся проводимость вернулась на уровень, близкий к исходному.

Мониторинг гидроизотопных откликов на сейсмические деформации в окрестностях пункта «Бугульдейка» предварялся подготовительными исследованиями, результаты которых представлены ниже.

Подземные воды участка Куяда (пункт «Бугульдейка») имеют значения $OA4/8$ выше значения окисленного компонента байкальской воды (ОКБВ), а участка Тырган (пункт «Приольхонье») – ниже (см. рис. 7). Значения $OA4/8$ и $1/U$ возрастают от подземных вод участка Тырган через подземные воды участка Куяда и поверхностные воды р. Таловка к поверхностным водам р. Бугульдейка и р. Куртун. Относительно подземных вод поверхностные воды обеднены ураном с возрастанием $OA4/8$ (рис. 17).

Выделяются три конечных компонента смешения поверхностных вод (рис. 17). Компонент 1 с минимальным значением $OA4/8$ при максимальной концентрации U (минимальном значении $1/U$) дает вода бассейна р. Таловка, который дренирует участок Куяда, принадлежащий к зоне Приморского разлома (см. рис. 7). Этот состав соответствует окисленному компоненту байкальской воды [Rasskazov et al., 2020b]. Компонент 2 с минимальным значением $OA4/8$ при минимальной концентрации U (максимальное значение $1/U$) представлен водой среднего течения р. Бугульдейка в полосе

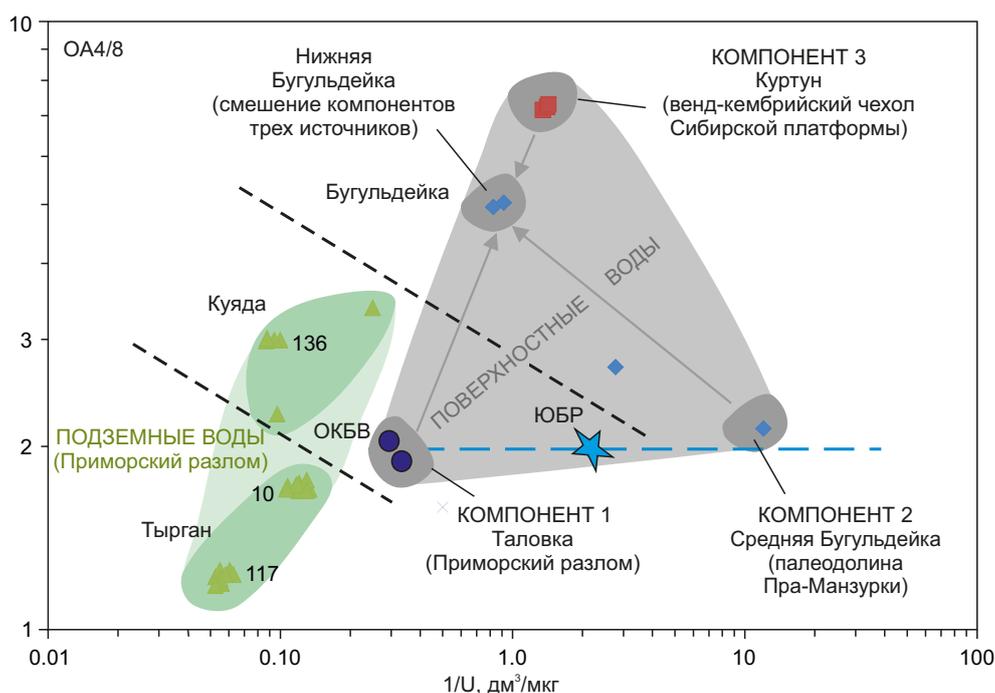


Рис. 17. Диаграмма OA4/8 – 1/U поверхностных и подземных вод окрестностей пункта «Бугульдейка».

Состав глубинной воды ЮБР (Южно-Байкальского резервуара) и ОКБВ (окисленного компонента байкальской воды с повышенным содержанием U, квадрат) показан по работе [Rasskazov et al., 2020b]. Станции 10, 117 и 136 обозначают совокупности точек неоднократных измерений проб подземных вод (см. рис. 7).

Fig. 17. Diagram OA4/8 – 1/U for surface water and groundwater in the vicinity of "Buguldeika" station.

The composition of deep water in SBR (South Baikal reservoir) and of OCBW (oxidized component of the Baikal water with high U content) is reported in [Rasskazov et al., 2020b]. Stations 10, 117 and 136 represent the sets of points of repeated measurements of groundwater samples (see Fig. 7).

кембрийских терригенных отложений ушаковской свиты и плиоцен-четвертичного аллювия долины р. Пра-Манзурка. Компонент 3 с максимальным значением OA4/8 при промежуточной концентрации U проявлен в воде р. Куртун, взаимодействующей с венд-кембрийскими минерализованными (эвапоритовыми) отложениями усольской, бельской и мотской свит. Состав урана поверхностных вод, имеющих минимальные значения OA4/8, сопоставляется с составом урана глубинной воды Южно-Байкальского резервуара с характерными значениями OA4/8 1.95–1.99 и концентрацией U 0.44–0.46 мкг/дм³. Такое соответствие может свидетельствовать о проникновении глубинной воды этого резервуара под побережье оз. Байкал.

Исходя из опыта регистрации закрытия микротрещин по снижению OA4/8 и их открытия при возрастании OA4/8 на станциях мониторинга Култукского полигона [Rasskazov et al., 2020a], подобные эффекты распознаются на станциях, располагающихся в окрестностях пункта мониторинга ОГП «Бугульдейка» (рис. 18). Предварительные результаты повторных измерений OA4/8 на станциях 10 (родник Поповка) и 117 (скв. Бригантина) выстраиваются относительно Голоуспенского землетрясения ($M_w=4.7$), произошедшего 5 сентября 2015 г. в зоне северо-восточного фрагмента Обручевского разлома (Приморский разлом). По данным наблюдений на Култукском полигоне, этому

землетрясению предшествовали деформации коры с его подготовкой в течение 1.5 лет. На ст. 10 участка Тырган прослеживаются две фазы закрытия и открытия микротрещин с переходом к промежуточному состоянию после Голоуспенского землетрясения, а на ст. 117 этого же участка обозначается общее открытие микротрещин и их закрытие после землетрясения. Полученные ориентировочные ряды наблюдений свидетельствуют о возможности использования гидроизотопных откликов станций 10 и 117 для регистрации деформаций коры с приближением землетрясений. Перед Кударинским землетрясением в районе Бугульдейки пробы не отбирались.

В целом гидрогеохимическое опробование выявило существенное территориальное различие изотопного состава урана в поверхностных и подземных водах окрестностей пункта «Бугульдейка». Предполагается, что в смешении урановых компонентов природных вод отразилось распространение под побережье Южного Байкала глубинной воды Южно-Байкальского резервуара, характеризующее в целом активные разломы Прибайкалья. Отклики OA4/8 на Голоуспенское землетрясение, полученные по рядам наблюдений на станциях 10 и 117, свидетельствуют о возможности использования гидрогеохимического мониторинга указанных станций для регистрации сейсмогенных деформаций коры.

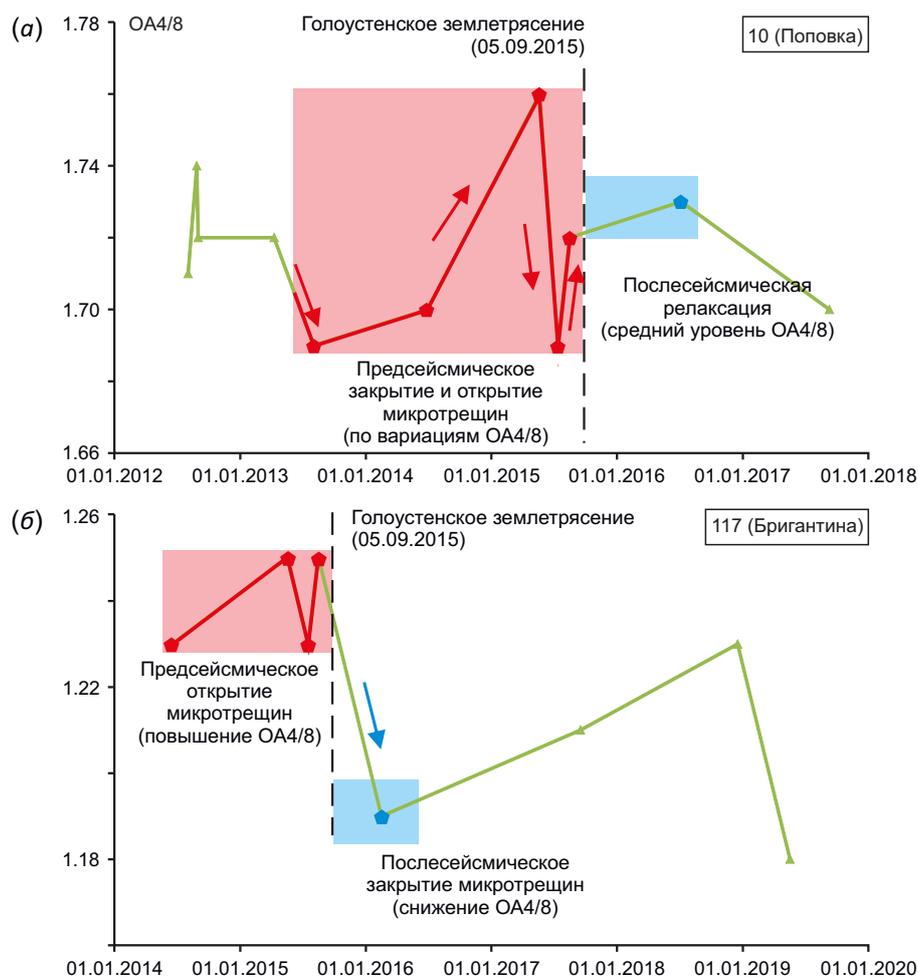


Рис. 18. Временные вариации OA4/8 в воде ст. 10 (а) и ст. 117 (б) в районе пункта «Бугульдейка» с оценкой интервала подготовки Голоуспенского землетрясения (5 сентября 2015 г., $M_w=4.7$), соответствующего оценке по наблюдениям на Култукском полигоне [Rasskazov et al., 2020a]. Красным и синим цветом линий, значков и стрелок показано соответственно возрастание и снижение OA4/8.

Fig.18. Temporal variations of OA4/8 in the water of station 10 (a) and station 117 (б) in the vicinity of "Buguldeika" station with an estimate of the September 5, 2015 $M_w=4.7$ Goloustnoe earthquake generation interval corresponding to the observation-based estimate for the Kultuk testing ground [Rasskazov et al., 2020a]. Red and blue lines, marks and arrows show respectively the increase and decrease in OA4/8.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования состоят в следующем.

1. На территории Западного Прибайкалья создана пилотная сеть пунктов комплексного мониторинга опасных геологических процессов, интенсивно проявляющихся в связи с развитием БРЗ. Основу мониторинговых наблюдений, осуществляемых с применением современного оборудования, составляют измерения сейсмических и микросейсмических колебаний, скоростей движений земной коры, деформаций породного массива, удельного электрического сопротивления в верхней части земной коры, концентрации радона в почве, а также содержания урана и изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в источниках подземных вод.

2. Анализ первых рядов наблюдений на примере пункта комплексного мониторинга «Бугульдейка» в отношении Кударинского землетрясения (09.12.2020 г.,

$M_w=5.6$) показал эффективность созданной сети для исследования сейсмичности, которая является наиболее опасным природным процессом для Байкальского региона. Посредством обработки записей широкополосной сейсмической станцией получены оценки основных очаговых параметров сейсмического события, а также его сильнейших афтершоков, согласующиеся с определениями ведущих мировых сейсмических агентств. С использованием методик, адаптированных к БРЗ, установлена серия важных дополнительных характеристик очага Кударинского землетрясения – сейсмический момент землетрясения ($M_0=3.02 \cdot 10^{17}$ Н·м), радиус очага (2.43 км), величина сброшенного напряжения (1.26 МПа) и другие.

3. Анализ данных деформационного мониторинга позволил сделать вывод о закономерном развитии очага готовящегося землетрясения и возможности диагностики заключительной фазы его подготовки в

виде метанестабильной стадии. Эти закономерности укладываются в фундаментальные представления физической мезомеханики.

4. Сопоставление откликов разнотипных полей, проявляющихся на разных пунктах для Кударинского и других сейсмических событий, подтвердило, что, как и предполагалось, информативность отдельных видов мониторинга в отношении землетрясений различна и зависит, с одной стороны, от главных параметров события, а с другой – от геологического строения участка мониторинга. Чем более сильным и относительно простым по механизму разрушения в очаге является событие, тем более отчетливо проявляется процесс его подготовки в разных геофизических полях. При этом дальнейшее развитие сети с расположением пунктов мониторинга в зонах разломов на некотором удалении от побережья оз. Байкал позволяет рассчитывать на выявление комплекса устойчивых предвестников сильных землетрясений в Прибайкалье.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предоставление данных глобальной сети приемников ГНСС (<http://sopac.ucsd.edu>); компании EFT GROUP – за предоставление данных сети базовых станций EFT-CORS (<https://eft-cors.ru/>); компании HIVE – за предоставление данных сети базовых станций системы HIVE (<https://hive.geosystems.aero/>). Результаты получены с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Ангара» <http://ckp-irk.ru/ckp/3056/>, а также ЦКП «Геохронология и геодинамика» (грант 075-15-2021-682) <http://crust.irk.ru/industry/analytics.html>.

Авторы благодарны директору Института земной коры СО РАН, чл.-корр. РАН Д.П. Гладкочубу за всестороннюю поддержку исследований на всех этапах их проведения, д.г.-м.н. С.В. Алексееву и д.г.-м.н. Е.А. Козыревой – за участие в организации сети комплексного мониторинга ОГП и обсуждение полученных результатов, а также А.И. Мирошниченко, А.М. Кононову, А.К. Семинскому, С.В. Снопкову, А.А. Светлакову, П.А. Шолохову, П.А. Предеину и М.А. Лебедевой – за помощь в сборе и обработке фактического материала.

Авторы выражают искреннюю благодарность д.ф.-м.н. В.А. Гаврилову и анонимному рецензенту, чьи критические замечания позволили улучшить качество данной статьи.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

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

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

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., 1998. GPS Radio Interferometry of Travelling Ionospheric Disturbances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 60 (12), 1205–1223. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00074-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00074-1).

Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Seminsky K.Zh., Sankov V.A., Radziminovich N.A., Salko D.V., Shagun A.N., 2021. The Bystrinskii Earthquake in the Southern Baikal Region (Sep. 21, 2020, Mw=5.4): General Characteristics, Basic Parameters, and Deformation Signs of the Transition of the Focus to the Meta-Unstable State. *Doklady Earth Sciences* 498, 427–431. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21050044>.

Bornyakov S.A., Sherman S.I., Gladkov A.S., 2001. Structural Levels of Destruction within a Strike-Slip Fault Zone and Their Reflection in Fractal Dimensions: Results of Physical Modeling. *Doklady Earth Sciences* 377, 156–159.

Brace W.F., Byerlee J.D., 1966. Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes. *Science* 153 (3739), 900–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>.

Brune J.N., 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 75 (26), 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997>.

Calais E., Minster J.B., 1995. GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following the January 17, 1994, Northridge Earthquake. *Geophysical Research Letters* 22, 1045–1048. <https://doi.org/10.1029/95GL00168>.

Calais E., Minster J.B., 1996. GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following a Space Shuttle Ascent. *Geophysical Research Letters* 23 (15), 1897–1900. <https://doi.org/10.1029/96GL01256>.

Calais E., Vergnolle M., Sankov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Amarjargal Sh., Deverchere J., 2003. GPS Measurements of Crustal Deformation in the Baikal-Mongolia Area (1994–2002): Implications on Current Kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B10), 2501. <https://doi.org/10.1029/2002JB002373>.

Chebykin E.P., Rasskasov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Sнопков S.V., 2015. First Results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Monitoring in Water from Active Faults on the Western Coast of South Baikal. *Doklady Earth Sciences* 460, 142–145. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020075>.

Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J., 2009. A Systematic Compilation of Earthquake Precursors. *Tectonophysics* 476 (3–4) 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>.

Dobrynina A.A., 2009. Source Parameters of the Earthquakes of the Baikal Rift System. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45, 1093–1109. <https://doi.org/10.1134/S1069351309120064>.

Dobrynina A.A., Perevalova N.P., Sankov V.A., Edemsky I.K., Lukhnev A.V., 2022. Analysis of the Seismic and Ionospheric Effects of the Kударинский Earthquake on December 9,

2020. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0622 (in Russian) [Добрынина А.А., Первалова Н.П., Саньков В.А., Едемский И.К., Лухнев А.В. Анализ сейсмических и ионосферных эффектов Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0622. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0622>.

Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelnitzky V.V., Déverchère J., 2016. Spatial Changes of Seismic Attenuation and Multiscale Geological Heterogeneity in the Baikal Rift and Surroundings from Analysis of Coda Waves. *Tectonophysics* 675, 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.010>.

Firstov P.P., Makarov E.O., 2018. Dynamics of Subsurface Radon in Kamchatka and Strong Earthquakes. *KamSU, Petropavlovsk-Kamchatsky*, 148 p. (in Russian) [Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2018. 148 с.].

Ghosh D., Deb A., Sengupta R., 2009. Anomalous Radon Emission as Precursor of Earthquake. *Journal of Applied Geophysics* 69 (2), 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.06.001>.

Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A., 2011. Simulation of the Rayleigh Waves in the Proximity of the Scattering Velocity Heterogeneities. Exploring the Capabilities of the Microseismic Sounding Method. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 47, 354–369. <https://doi.org/10.1134/S1069351311030013>.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., 2008. *GNSS-Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Vienna, 518 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>.

Ishin A.B., Perevalova N.P., Voeykov S.V., Khakhinov V.V., 2017. First Results of Registering Ionospheric Disturbances Obtained with Sibnet Network of GNSS Receivers in Active Space Experiments. *Solar-Terrestrial Physics* 3 (4), 74–82. <https://doi.org/10.12737/stp-34201708>.

Jacobsen K.S., Dähnn M., 2014. Statistics of Ionospheric Disturbances and Their Correlation with GNSS Positioning Errors at High Latitudes. *Journal of Space Weather and Space Climate* 4, A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2014024>.

Juan J.M., Sanz J., Rovira-Garcia A., González-Casado G., Ibáñez D., Perez R.O.J., 2018. AATR an Ionospheric Activity Indicator Specifically Based on GNSS Measurements. *Journal of Space Weather and Space Climate* 8, A14. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017044>.

Kuo T., 2014. Correlating Precursory Declines in Groundwater Radon with Earthquake Magnitude. *Groundwater* 52 (2), 217–224. <https://doi.org/10.1111/gwat.12049>.

Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Calais E., 2010. GPS Rotation and Strain Rates in the Baikal–Mongolia Region. *Russian Geology and Geophysics* 51 (7), 785–793. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.006>.

Ma J., Guo Y., Sherman S.I., 2014. Accelerated Synergism along a Fault: A Possible Indicator for an Impending Major Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 387–399 (in Russian) [Ма Ц., Гуо Я., Шерман С.И. Ускоренный синергизм вдоль разлома: возможный индикатор неизбежного крупного землетрясения // Геодинамика и

тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 387–399]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134>.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S., 2012. Identification of Meta-Instable Stress State Based on Experimental Study of Evolution of the Temperature Field during Stick-Slip Instability on a 5° Bending Fault. *Science China Earth Sciences* 55, 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2>.

Panin V.E., 1998. Foundations of Physical Mesomechanics. *Physical Mesomechanics* 1 (1), 5–22 (in Russian) [Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22].

Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Danilov V.I., 1990. Structural Levels of Plastic Deformation and Fracture. *Nauka, Novosibirsk*, 320 p. (in Russian) [Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 320 с.].

Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V., 1985. Structural Levels of Deformation in Solids. *Nauka, Novosibirsk*, 255 p. (in Russian) [Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 255 с.].

Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityayeva A.S., 2014. Threshold Magnitude for Ionospheric TEC Response to Earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 108, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.014>.

Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M., 1997. Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network. *Geophysical Research Letter* 24 (18), 2283–2286. <https://doi.org/10.1029/97GL02273>.

Rasskazov S., Ilyasova A., Borneyakov S., Chuvashova I., Chebykin E., 2020a. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Activity Ratio in Groundwater to Earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia. *Frontiers of Earth Science* 14, 711–737. <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5>.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P., 2020b. Hydrogeochemical Zoning of Uranium Isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian Palecontinent: the Role of the South Baikal Reservoir in the Groundwater Formation. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 632–650 (in Russian) [Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 632–650]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>.

Salko D.V., Borneyakov S.A., 2014. The Automated Tool System for Monitoring of Geophysical Parametres on Geodynamic Polygons. *Pribory* 6, 24–28 (in Russian) [Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. № 6. С. 24–28].

Sankov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., 2011. Late Cenozoic Geodynamics and Mechanical Coupling of Crustal and Upper Mantle

Deformations in the Mongolia-Siberia Mobile Area. *Geotectonics* 45, 378–393. <https://doi.org/10.1134/S0016852111050049>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2013. The First Results of Studies of Temporary Variations in Soilradon Activity of Faults in Western Pribaikalie. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 1–12 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманионной активности разломов Западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 1. С. 1–12]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0088>.

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A. et al., 2021. The Bystrinskoe Earthquake in the Southern Baikal Region (21 September, 2020, Mw=5.4): Main Parameters, Precursors, and Accompanying Effects. *Russian Geology and Geophysics* 62 (5), 589–603. <https://doi.org/10.2113/RGG20204296>.

Tabulevich V.N., Drennova N.N., Potapov V.A., Chernykh E.N., 2001. The Effect of Storm Microseisms on Seismicity in the Shore Zone of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 42 (8), 1271–1278 (in Russian) [Табулевич В.Н., Дреннова Н.Н., Потапов В.А., Черных Е.Н. Влияние штормовых микросейсм на проявление сейсмичности в береговой зоне озера Байкал // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 8. С. 1271–1278].

Toutain J.-P., Baubron J.-C., 1999. Gas Geochemistry and Seismotectonics: A Review. *Tectonophysics* 304 (1–2), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00295-9).

Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P.-D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Tsydypova L.R., 2021. Kudarinsky Earthquake of

09.12.2020 (Mw=5.5) on Lake Baikal: Results of Instrumental and Macroseismic Observations. *Questions of Engineering Seismology* 48 (4), 32–47 (in Russian) [Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (Mw=5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47]. DOI: 10.21455/VIS2021.4-2.

Utkin V.I., Mamyrov E., Kan M.V., Krivasheev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., 2006. Radon Monitoring in the Northern Tien Shan with Application to the Process of Tectonic Earthquake Nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42, 775–784. <https://doi.org/10.1134/S1069351306090072>.

Voitov G.I., 1998. Monitoring of Atmospheric Radon in the Subsoils of Seismically Active Regions of Central Asia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 1, 23–32.

Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Perevalova N.P., 2018. SibNet – Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current State. *Solar-Terrestrial Physics* 4 (4), 63–72. <https://doi.org/10.12737/stp-44201809>.

Zhuo Y.-Q., Liu P., Chen S., Guo Y., Ma J., 2018. Laboratory Observations of Tremor-Like Events Generated during Preslip. *Geophysical Research Letters* 45 (14), 6926–6934. <https://doi.org/10.1029/2018GL079201>.

Zmazek B., Todorovski L., Džeroski S., Vaupotič J., Kobal I., 2003. Application of Decision Trees to the Analysis of Soil Radon Data for Earthquake Prediction. *Applied Radiation and Isotopes* 58 (6), 697–706. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00094-0).