



## ANALYSIS OF THE SEISMIC AND IONOSPHERIC EFFECTS OF THE KUDARINSKY EARTHQUAKE ON DECEMBER 9, 2020

A.A. Dobrynina <sup>1,2</sup>, N.P. Perevalova <sup>3✉</sup>, V.A. Sankov <sup>1,4</sup>, I.K. Edemsky <sup>3</sup>, A.V. Lukhnev <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

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

<sup>4</sup> Irkutsk State University, 1 Karl Marx St, Irkutsk 664003, Russia

**ABSTRACT.** According to the data obtained on the equipment of the IEC SB RAS complex monitoring base for hazardous geological processes "Buguldeika" (Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of IEC SB RAS) and Shared Research Facilities "Angara" of ISTP SB RAS an analysis of the characteristics of the Kudarinsky earthquake (09.12.2020) and the behaviour of the ionosphere during this event was carried out. The source parameters of the earthquake were obtained – the seismic moment of the earthquake ( $M_0=3.02 \cdot 10^{17}$  N·m), the moment magnitude ( $M_w=5.6$ ), the source radius (2.43 km), and the stress drop (1.26 MPa).

The analysis of the ionosphere behaviour carried out using GPS/GLONASS receivers did not reveal disturbances caused by the Kudarinsky earthquake, which is most likely due to the relatively small magnitude of this earthquake. An analysis of the observation series related to the Kudarinsky earthquake showed the efficiency of using the Core Facilities Centre equipment and complex monitoring bases for studying seismicity, which is the most dangerous natural process for the Baikal region.

**KEYWORDS:** Kudarinsky earthquake; Baikal rift; seismicity; satellite geodesy; ionospheric disturbances; GPS; GLONASS; total electron content; ROTI

**FUNDING:** The work was conducted as part of project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 075-15-2020-787 "Basic grounds, methods and technologies of digital monitoring and environmental prediction of the Baikal natural territory". Analysis of ionospheric effects was done under financial support of the RFBR (project No. 19-05-00889\_a); the analysis involved the use of methods and algorithms developed under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subsidy 075-Г3/И3569/278).

### SHORT COMMUNICATION

Received: December 7, 2021

Revised: January 15, 2022

Accepted: January 20, 2022

**Correspondence:** Natalia P. Perevalova, [pereval@iszf.irk.ru](mailto:pereval@iszf.irk.ru)

**FOR CITATION:** 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 Kudarinsky Earthquake on December 9, 2020. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0622. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0622

## АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 9 ДЕКАБРЯ 2020 г.

А.А. Добрынина<sup>1,2</sup>, Н.П. Перевалова<sup>3</sup>, В.А. Саньков<sup>1,4</sup>, И.К. Едемский<sup>3</sup>, А.В. Лухнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Республика Бурятия, Россия

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

<sup>4</sup> Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** По данным, полученным на оборудовании пункта комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН «Бугульдейка» (Центр коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН) и Центра коллективного пользования «Ангара» ИСЗФ СО РАН, проведен анализ характеристик Кударинского землетрясения (09.12.2020) и поведения ионосферы во время этого события. Получены значения очаговых параметров землетрясения – сейсмический момент землетрясения ( $M_0=3.02 \cdot 10^{17}$  Н·м), моментная магнитуда ( $M_w=5.6$ ), размеры очага (2.43 км), величина сброшенного напряжения (1.26 МПа).

Проведенный с помощью приемников GPS/ГЛОНАСС анализ поведения ионосферы не выявил возмущений, вызванных Кударинским землетрясением, что, вероятнее всего, обусловлено относительно малой магнитудой этого землетрясения. Анализ рядов наблюдений в отношении Кударинского землетрясения показал эффективность использования оборудования центров коллективного пользования и пунктов комплексного мониторинга для исследования сейсмичности, которая является наиболее опасным природным процессом для Байкальского региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Кударинское землетрясение; Байкальский рифт; сейсмичность; спутниковая геодезия; ионосферные возмущения; GPS; ГЛОНАСС; полное электронное содержание; ROTI

**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». Анализ ионосферных эффектов выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00889\_а); в анализе использовались методы и алгоритмы, разработанные при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

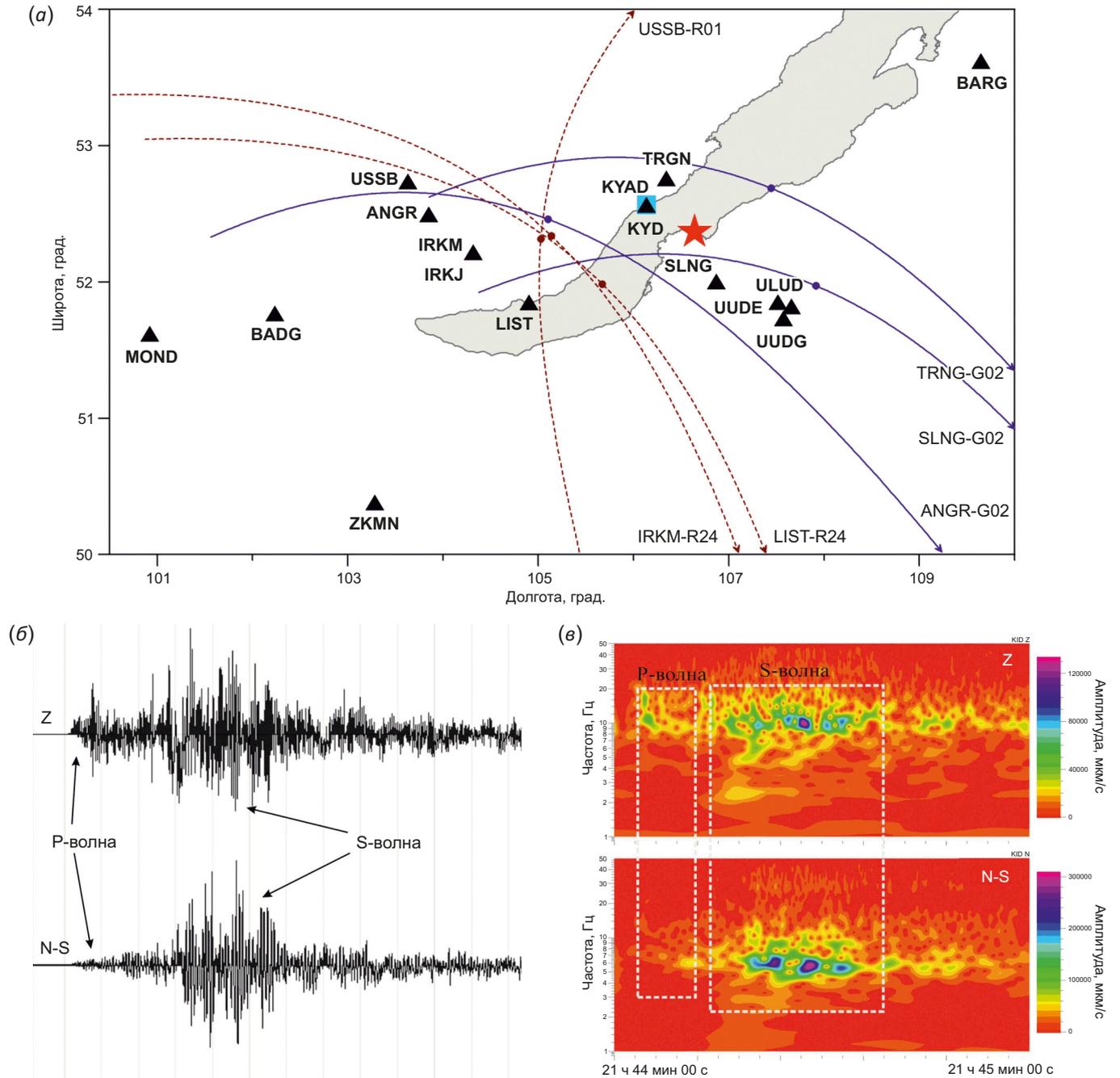
9 декабря 2020 г. в 21:44:34.02 UTC (10 декабря в 05:44:34.02 по местному времени) в дельте р. Селенги произошло землетрясение с энергетическим классом  $K=13.9$  (координаты  $52.3683^\circ$  с.ш.,  $106.6385^\circ$  в.д. [Tubanov et al., 2021], эпицентр отмечен звездочкой на рис. 1, а), получившее название «Кударинское». Кударинское землетрясение проявилось с максимальной интенсивностью 6–7 баллов по шкале MSK-64 в с. Кудара (расстояние 16 км); 5-балльные сотрясения были зафиксированы на расстоянии от 22 до 253 км, в том числе в крупных городах Прибайкалья (Улан-Удэ, Иркутск, Ангарск, Шелехов, Усолье-Сибирское) [Tubanov et al., 2021]. Очаг землетрясения располагался в зоне дельтового сброса, характеризующегося северо-восточным простираем. Механизмы очага Кударинского землетрясения, полученные разными сейсмологическими агентствами, согласуются между собой (табл. 1). Все они, кроме сдвигового механизма, полученного Байкальским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (БФ ФИЦ ЕГС РАН), отражают обстановку растяжения коры в направлении СЗ-ЮВ со сбросовыми подвижками в очаге, иногда – с незначительной сдвиговой компонентой.

Используя данные, полученные на оборудовании уникальной научной установки Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН ([https://ckp-rf.ru/ckp/433687/?sphrase\\_id=7107870](https://ckp-rf.ru/ckp/433687/?sphrase_id=7107870)) и ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>), авторы провели анализ литосферных и ионосферных эффектов Кударинского землетрясения.

### 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа колебаний земной коры использовались данные широкополосной сейсмической станции Куяда (KYD) и станции постоянных GPS/ГЛОНАСС-измерений (KYAD) в пункте комплексного мониторинга опасных геологических процессов «Бугульдейка» ИЗК СО РАН, входящем в состав ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН. Использовались также данные станций постоянных GPS/ГЛОНАСС-измерений TRGN (пункт комплексного мониторинга «Приольхонье» ИЗК СО РАН), BADG (Бадары, Тункинская впадина) и ZKMN (Закаменск). Расположение измерительных пунктов показано на рис. 1, а.

Широкополосная сейсмическая станция KYD оснащена тремя датчиками: одним вертикальным и двумя горизонтальными, с ориентировкой соответственно



**Рис. 1.** Геометрия измерений во время Кударинского землетрясения 09.12.2020 (а). Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой, сейсмостанция KYD – квадратом, станции GPS/ГЛОНАСС – треугольниками. Линии со стрелками показывают проекции траекторий спутников GPS (сплошные линии, "G") и ГЛОНАСС (пунктирные линии, "R"), наблюдававшихся на станциях GPS/ГЛОНАСС 09.12.2020 в период 20:00–24:00 UTC. Точками на траекториях отмечен момент землетрясения. Фрагмент сейсмограммы Кударинского землетрясения (б) и ее спектрально-временная диаграмма (в). Каналы записи: Z – вертикальный, N-S – горизонтальный с ориентацией север – юг. На сейсмограмме стрелками показаны продольные (P) и поперечные (S) волны, на спектрально-временной диаграмме пакеты волн отмечены прямоугольниками.

**Fig. 1.** Geometry of measurements during the Kudarinsky earthquake on 09.12.2020 (a). The earthquake epicenter, the KYD seismic station, GPS/GLONASS stations are marked with an asterisk, a square, and triangles, respectively. The lines with arrows show projections of the trajectories of GPS (solid lines, "G") and GLONASS (dotted lines, "R") satellites. Satellites were observed at GPS/GLONASS stations on 09.12.2020 in the period 20:00–24:00 UTC. The points on the trajectories mark the moment of the earthquake. Fragment of the seismogram of the Kudarinsky earthquake (b) and its spectrogram (c). Recording channels: Z – vertical, N-S – horizontal with north – south orientation. On the seismogram, the arrows show longitudinal (P) and transverse (S) waves, on the spectral-time diagram, wave packets are marked with rectangles.

**Таблица 1.** Параметры очага Кударинского землетрясения  
**Table 1.** Parameters of the Kударинский earthquake

№ п/п	Сейсмологическое агентство	Моментная магнитуда $M_w$	Сейсмический момент $M_0 \cdot 10^{17}$ , Н·м	Глубина очага $H$ , км	Решение механизма очага		
					STRIKE, град.	DIP, град.	SLIP, град.
1	GEOFONE	5.5	1.900	27	47	63	-102
2	BAGSR (Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН)	-	-	20	353	71	-166
3	IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris, Франция)	5.5	-	16	75	40	-66
4	GCMТ (Колумбийский университет, США)	5.5	2.170	10	77	41	-56
5	AUST (Geoscience Australia)	5.5	2.021	24.1	60	52	-89.55
6	NEIC (National Earthquake Information Center, USA)	5.4	1.830	17	67	49	-70
7	MOS (ФИЦ ЕГС РАН)	-	-	10	238	71	-86
8	BUGSR (Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН)	5.5	2.350	18	-	-	-
9	ИЗК СО РАН	5.6	3.020	-	-	-	-

Примечание. Решение механизма очага: STRIKE – простирание нодальной плоскости, DIP – угол падения нодальной плоскости, SLIP – подвижка.  
 Note. Focal mechanism solution: STRIKE – strike of the nodal plane, DIP – angle of incidence of the nodal plane, SLIP – slip.

на север – юг и запад – восток. Станция работает в непрерывном режиме, частота дискретизации 100 отсчетов в секунду, рабочая полоса – от 120 с до 108 Гц. Синхронизация по времени осуществляется с помощью антенны встроенного приемника сигналов точного времени. По записям сейсмической станции KYD с использованием круговой модели Брюна [Brune, 1970] оценивались очаговые параметры Кударинского землетрясения: 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 Байкальской рифтовой зоны [Dobrynina, 2009], а также региональные характеристики затухания сейсмических волн [Dobrynina et al., 2016].

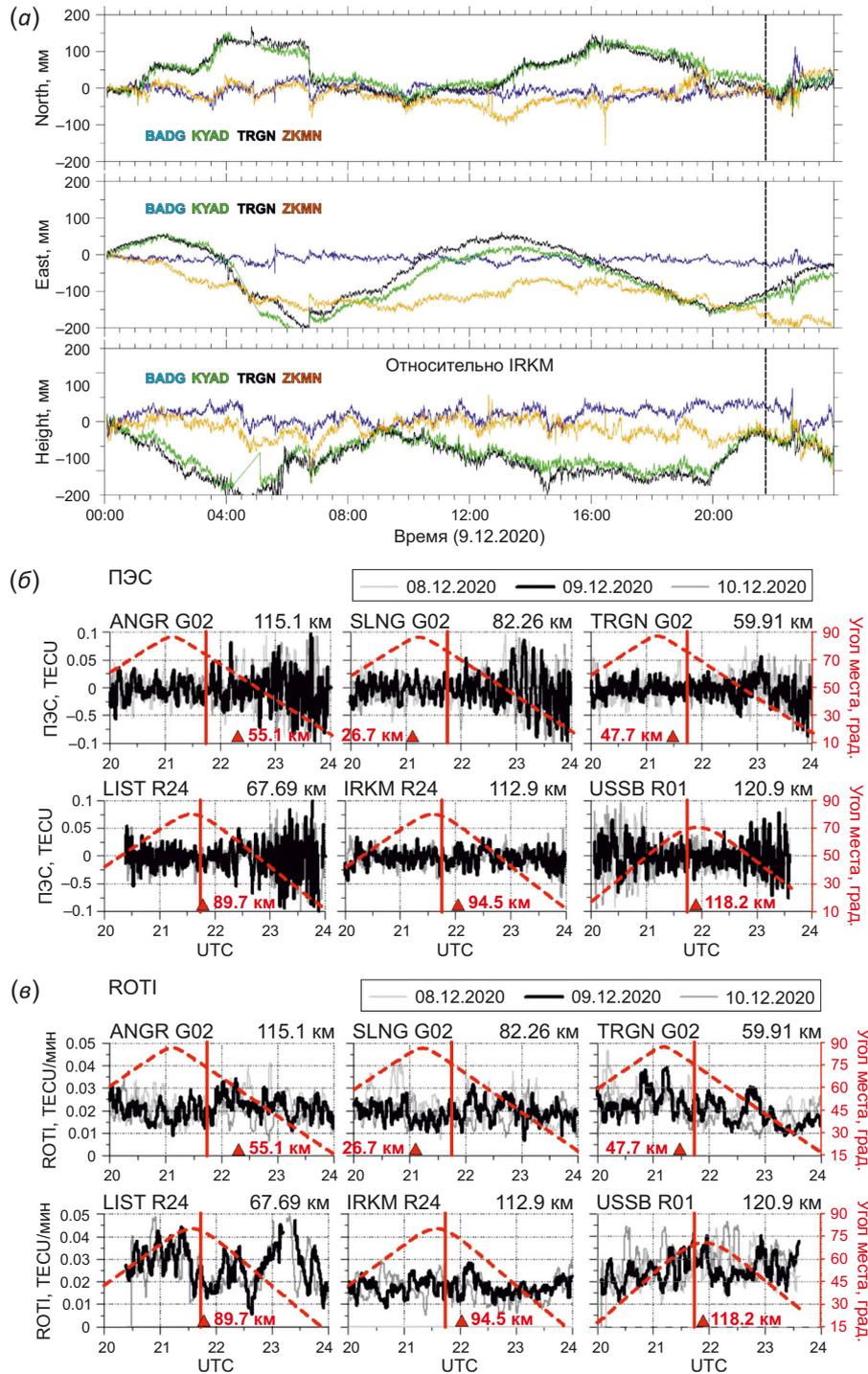
Станция KYAD постоянных GPS/ГЛОНАСС-измерений предназначена для исследований современных движений и деформаций земной коры методом спутниковой геодезии (GPS/ГЛОНАСС технология). Станция оборудована приемником Trimble R9 с антенной Zephyr Geodetic. Запись сигналов спутников производится с частотой 1 Гц, что дает возможность получать временные серии смещений в частотном диапазоне, перекрывающемся с частотным диапазоном широкополосной сейсмической станции. Таким образом, сейсмологические и геодезические методы дают взаимодополняющую информацию и возможность изучать колебания земной коры различного происхождения в широком диапазоне частот, позволяя рассчитывать и дополнять энергетические оценки сильных землетрясений в низкочастотном диапазоне.

Для анализа поведения ионосферы использовались данные Сибирской сети SibNet постоянно действующих приемников GPS/ГЛОНАСС [Ishin et al., 2017; Yasyukovich et al., 2018], входящей в ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО

РАН, и станций постоянных GPS/ГЛОНАСС-измерений Байкальского геодинимического полигона ИЗК СО РАН (рис. 1, а). Измерения были дополнены данными приемников GPS/ГЛОНАСС международной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), Российской федеральной сети EFT-CORS (<https://eft-cors.ru/>), Российской сети системы NIVE (<https://hive.geosystems.aero/>). На основе двухчастотных фазовых измерений приемников GPS/ГЛОНАСС по стандартной методике [Calais, Minster, 1995; Afraimovich et al., 1998] были рассчитаны и отфильтрованы в диапазоне периодов 1–10 мин ряды полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере вдоль лучей «приемник – спутник». Был рассчитан также индекс ROTI (Rate of Change of TEC Index) [Jacobsen, Dähnn, 2014], определяющийся как среднеквадратичное отклонение скорости изменения ПЭС на интервале времени 5 мин. 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.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, б, представлен фрагмент сейсмограммы Кударинского землетрясения, полученной на широкополосной сейсмической станции KYD в пункте «Бугульдейка» (эпицентральное расстояние 39 км). Согласно спектрально-временной диаграмме, максимум излучения пришелся на поперечные волны (рис. 1, в): 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 раскладывается на несколько пакетов, что видно также и по форме записи (рис. 1, б). На записи P-волны также присутствует интенсивная вторичная волна (рис. 1, б). Возможно, это указывает на сложный очаг, состоящий из нескольких субочагов.



**Рис. 2.** Отражение Кударинского землетрясения во временных сериях для пунктов KYAD, BADG, ZKMN, TRGN за период 00:00–24:00 UTC 9 декабря 2020 г. по долготной (North), широтной (East) и вертикальной (Up) компонентам относительно пункта IRKM (a). Вертикальным пунктиром показан момент землетрясения. Примеры вариаций отфильтрованного ПЭС (б) и индекса ROTI (в) на лучах «приемник – спутник», проходивших 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. Красные треугольники отмечают момент времени, когда луч был наиболее близок к эпицентру землетрясения (рядом указано наименьшее расстояние до эпицентра). Красным пунктиром показаны углы места луча.

**Fig.2.** Reflection of the Kudarinsky earthquake in the time series for KYAD, BADG, ZKMN, TRGN stations for the period 00:00–24:00 UTC on December 9, 2020 by longitude (North), latitude (East) and vertical (Up) components relative to IRKM station (a). The vertical dotted line shows the earthquake moment. Examples of variations of filtered TEC (б) and ROTI (в) on the "receiver – satellite" beams passing near the epicenter of the Kudarinsky earthquake. The earthquake moment is marked with a red line. The name of the beam and its distance from the epicenter at the time of the earthquake are indicated at the top of the panels. The red triangles mark the time when the beam was closest to the earthquake epicenter (the smallest distance to the epicenter is indicated). The dotted lines show the elevation angles of the beam.

Это может объяснять расхождение, наблюдаемое между механизмом очага, полученным по первым вступлениям продольных волн (и отражающим картину начала движения в источнике), и результатами моделирования сейсмических волн, показывающими механизм центроида (табл. 1). По записи, полученной на станции KYD, выполнены оценки параметров очага землетрясения: сейсмический момент землетрясения 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).

Полученные значения очаговых параметров сопоставлялись с аналогичными величинами ( $M_0 = 2.35 \times 10^{17}$  Н·м,  $M_w = 5.5$ , длина очага  $L = 5.65$  км, сброшенные напряжения – 45.5 бар), полученными в работе [Tubakov et al., 2021] методом инверсии огибающей коды по спектрам Кударинского землетрясения, полученным на станциях Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН: HRMB (Хурамша), MXMB (Максимиша), UUDB (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.

Мониторинг современных движений земной коры методом GPS/ГЛОНАСС-геодезии позволил получить на пункте «Бугульдейка» (станция KYAD) записи в период подготовки Кударинского землетрясения (рис. 2, а). Из фрагмента записи 9 декабря 2020 г. видно, что временные серии пунктов TRGN и KYAD практически идентичны. Следует заметить, что поведение этих двух кривых на диаграммах сильно отличается от хода кривой для пункта BADG и ZKMN (рис. 2, а). Колебания последней кривой для пункта BADG возле условно среднего значения весьма невелики, в то время как вариации кривых для TRGN, KYAD, а также ZAKM достигают высоких значений и они имеют периодический характер. Вместе с тем после момента землетрясения 09.12.2020 г. 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 в 47 и 325 км от эпицентра. Поскольку эти эффекты могут быть обусловлены состоянием ионосферы, проведен анализ ее поведения в период Кударинского землетрясения.

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

GPS/ГЛОНАСС [Perevalova et al., 2014]. Отклик на Кударинское землетрясение ( $M_w = 5.6$ ) можно было ожидать только на лучах «приемник – спутник», проходивших вблизи эпицентра в момент главного толчка. С учетом этого прежде всего были рассмотрены лучи, для которых расстояние до эпицентра на высоте главного максимума ионизации ( $h_{\max} = 300$  км) в момент Кударинского землетрясения не превышало 200 км. Примеры вариаций отфильтрованного наклонного ПЭС и индекса ROTI на таких лучах приведены на рис. 2, б, в. Проекция траекторий спутников GPS/ГЛОНАСС для этих лучей на высоте  $h_{\max}$  показаны на рис. 1, а. На лучах ANGR-G02, SLNG-G02, LIST-R24, IRKN-R24, а также на лучах IRKJ-G02, USSB-G02, UUDG-G02, SLNG-R24, IRKM-R01, USSB-R24 (не показаны на рис. 2, б, в) 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. 2, б, в) 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 это время.

На остальных лучах «приемник – спутник» (например, лучи TRGN-G02 и USSB-R01 на рис. 2, б, в) не удается выделить возмущения 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. Отсутствие возмущений в вариациях ПЭС связано прежде всего с малой амплитудой акустико-гравитационных волн (АГВ), вызванных землетрясением в нейтральной атмосфере. Основными факторами, влияющими на амплитуду АГВ, являются энергия, магнитуда и механизм очага землетрясения. При малой магнитуде Кударинского землетрясения амплитуда вызванных им АГВ, вероятно, оказалась слишком малой для того, чтобы привести к возмущениям ПЭС в ионосфере, различимым на уровне фоновых флуктуаций.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным, полученным на оборудовании пункта комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН «Бугульдейка» (ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН и ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН, проведен анализ характеристик Кударинского землетрясения и поведения ионосферы во время этого события.

Обработка записей широкополосной сейсмической станции позволила получить оценки основных очаговых параметров сейсмического события, согласующиеся с определениями ведущих сейсмических агентств.

С использованием методик, адаптированных к Байкальской рифтовой зоне, установлена серия важных дополнительных характеристик – энергия землетрясения ( $M_0=3.02 \cdot 10^{17}$  Н·м), размеры очага (2.43 км), величина сброшенного напряжения (1.26 МПа).

Проведенный с помощью приемников GPS/ГЛОНАСС анализ поведения ионосферы не выявил возмущений, обусловленных Кударинским землетрясением, что, вероятнее всего, обусловлено малой магнитудой этого землетрясения.

Анализ рядов наблюдений в отношении Кударинского землетрясения (09.12.2020,  $M_w=5.6$ ) показал эффективность использования оборудования центров коллективного пользования и пунктов комплексного мониторинга для исследования сейсмичности, которая является наиболее опасным природным процессом для Байкальского региона.

### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), компании EFT GROUP, компании NIVE за предоставление данных приемников GPS/ГЛОНАСС, а также лично А.В. Веснину за обеспечение наблюдений на сети SibNet. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Геодинамика и геохронология» ([https://ckp-rf.ru/ckp/433687/?sphrase\\_id=7107870](https://ckp-rf.ru/ckp/433687/?sphrase_id=7107870); грант № 075-15-2021-682) и ЦКП «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>).

### 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).

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>.

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., Sankov V.A., Chechelnickey 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>.

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 Space Climate* 4, A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2014024>.

Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva 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>.

Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P.-D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Tsydypova L.R., 2021. Kударинский Earthquake of 09.12.2020 ( $M_w=5.5$ ) 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. ( $M_w=5.5$ ) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47]. DOI:10.21455/VIS2021/4-2.

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>.