

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.34

АНОМАЛИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ В СВЯЗИ С КУДАРИНСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 9 ДЕКАБРЯ 2020 Г. С $M_w = 5.6$ В БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЕ

© 2023 г. А. А. Добрынина^{1,2,*}, В. А. Саньков¹, С. А. Борняков¹,
С. А. Король¹, А. В. Саньков¹

Представлено академиком РАН Е.И. Гордеевым 02.12.2022 г.

Поступило 02.12.2022 г.

После доработки 03.12.2022 г.

Принято к публикации 04.12.2022 г.

Исследованы вариации микросейсмических шумов, полученные на широкополосных и короткопериодных сейсмических станциях в районе Южного Байкала до и после сильного Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. с $M_w = 5.6$. За 10 дней до землетрясения наблюдается постепенное увеличение амплитуд колебаний в частотном диапазоне от 0.01 до 0.1 Гц, увеличение фона наблюдалось также в течение 4 дней после главного толчка (период с 01.12.2020 до 13.01.2021 г.). Максимальное увеличение амплитуд колебаний составляет 19.5 относительно фона. За это время было зафиксировано 48 афтершоков. Анализ направления движения частиц в сейсмических волнах за указанный период выявил резкую смену ориентации колебаний, хорошо согласующуюся с азимутом на эпицентр основного толчка. Анализ сейсмограмм за последующий период (с 13 декабря) после Кударинского землетрясения подобных эффектов в поле микросейсмических шумов не показал. По-видимому, в поле микросейсмических шумов отразился процесс медленных движений по разлому перед землетрясением и после основного срыва (толчка) с последующим затуханием.

Ключевые слова: микросейсмический шум, краткосрочный предвестник, Кударинское землетрясение

DOI: 10.31857/S2686739722602733, **EDN:** TIERWH

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что большинство тектонических землетрясений связаны с подвижками по существующим разломам, их разрастанием или образованием новых разломов. Процессы подготовки таких землетрясений, особенно сильных, должны находить свое отражение в изменениях (вариациях) геофизических полей вблизи зоны разлома (зоны подготовки очага будущего землетрясения). Таким образом, при поиске предвестников землетрясений важнейшей задачей становится выбор прогностического параметра, отражающего реальные геофизические процессы в литосфере, изменения которого с большой вероятностью могут свидетельствовать о приближении сейсмического события в пределах локального участка литосферы сейсмоактивной зоны. С этой точки зрения перспективным представляется анализ микросейсми-

ческих шумов природного происхождения. Естественные микросейсмические шумы несут в себе информацию обо всем спектре деформационных процессов, происходящих в земной коре на различных энергетических уровнях, — от перемещений тектонических плит и связанных с ними катастрофических землетрясений до лунно-солнечных приливных деформационных процессов и микроземлетрясений. В последние десятилетия в связи с глобальным переходом на цифровую регистрацию сейсмических событий и ростом числа сейсмических станций в мире широко развиваются способы сейсмического мониторинга, основанного на выделении и анализе компонент волнового поля океанических микросейсм и микросейсмических шумов, направленные на поиск и получение прогностических данных [1–7]. Ярким примером удачного прогноза сейсмического события по микросейсмам является прогноз катастрофического землетрясения Тохоку (Япония) 11.03.2011 с магнитудой $M = 9$ [3, 4]. Хорошо зарекомендовала себя методика выделения предвестников землетрясений на основе анализа приливных микросейсм [1]. Возможность краткосрочного прогноза для Байкальской рифтовой системы

¹Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Геологический институт Сибирского отделения
Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: dobrynina@crust.irk.ru

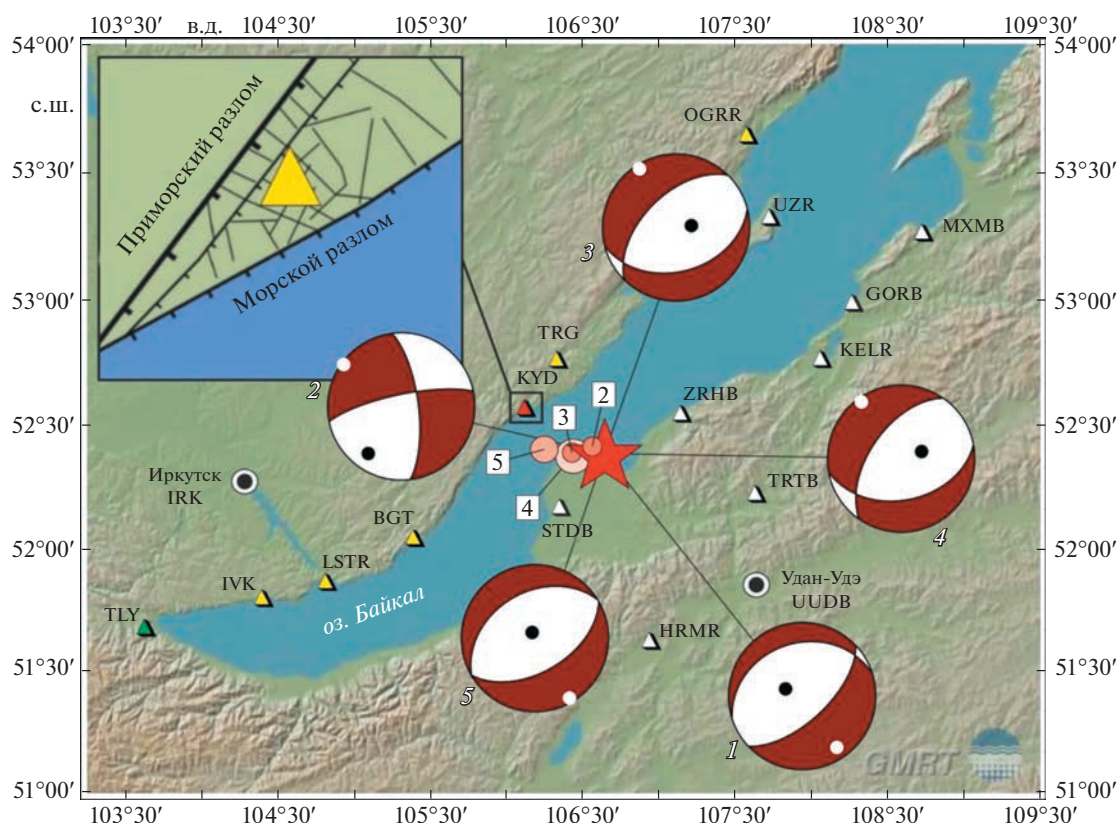


Рис. 1. Положение сейсмических станций Байкальского (желтые треугольники) и Бурятского филиалов (белые треугольники) ФИЦ ЕГС РАН, полигона комплексного мониторинга “Бугульдейка” (красный треугольник) и эпицентра Кударинского землетрясения (звездочка), на врезке: разломно-блоковая структура в районе полигона “Бугульдейка”. Цифрами показаны механизмы очага: 1 – GEOFONE, 2 – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 3 – Institute de Physique du Globe de Paris, 4 – Колумбийский университет, США, 5 – Geoscience Australia.

(БРС) по изменениям спектрального состава микросейсмического шума перед близкими сильными и умеренными землетрясениями показана в работах [7, 8].

09.12.2020 в 21: 44: 34 (время UTC) в Байкальской впадине в районе дельты р. Селенга произошло землетрясение с магнитудой $M_w = 5.6$ [9], получившее название “Кударинское” (рис. 1). Очаг землетрясения располагался в зоне Дельтового сброса северо-восточного простирания, типичного для центральной части БРС [10]. Кударинское землетрясение сопровождалось афтершоковой активностью — за период с 09.12.2020 по 12.01.2021 было зарегистрировано более 70 толчков с энергетическими классами $K = 5.3–12.2$ [11]. Механизмы очага Кударинского землетрясения, полученные разными сейсмологическими агентствами, отражают обстановку растяжения коры в направлении северо-запад — юго-восток со сбросовыми подвижками в очаге, иногда — с незначительной сдвиговой компонентой (кроме сдвигового механизма, полученного Байкальским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (ФИЦ ЕГС

РАН, № 2 на рис. 1). По данным опросов населения установлено, что Кударинское землетрясение проявилось с максимальной интенсивностью VI–VII 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 V до VI баллов [11]. Пятибалльные сотрясения были зафиксированы на расстояниях от 22 до 253 км, в том числе в крупных городах Прибайкалья (Улан-Удэ, Иркутске, Ангарске, Шелехове, Усолье-Сибирском) [11].

Близ западного борта оз. Байкал расположены полигоны комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН — “Бугульдейка” и “Приольхонье” (обозначены кодами KYD и TRG по названиям сейсмических станций соответственно, рис. 1), входящие в состав ЦПК “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН и оснащенные аппаратурой для мониторинга деформаций горных пород. На полигоне “Бугульдейка” с 30.11.2020 также действует широкополосная сейсмическая станция “Куяда” (локальный код KYD, координаты: 52.567° с.ш., 106.136° в.д., высота — 484 м). Сей-

смическая станция оснащена тремя датчиками (один вертикальный и два горизонтальных) и работает в непрерывном режиме, частота дискретизации — 100 отсчетов в секунду, рабочая полоса частот от 120 сек до 108 Гц. Указанный частотный диапазон позволяет не только регистрировать землетрясения, но также фиксировать и анализировать вариации микросейсмического шума. Пункты мониторинга деформаций горных пород созданы на основе инструментального комплекса авторской разработки [12]. Пункт “Бугульдейка” расположен в зоне сочленения локальных разломов (рис. 1, врезка). Деформации здесь измеряются в ортогональных направлениях двумя горизонтальными штанговыми датчиками с базой 10 м, заглубленными в грунт на глубину 2.5 м. В пункте “Приольхонье” оборудованы 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 расположена в пределах ненарушенного блока, измерение деформаций в ней проводится одним горизонтальным датчиком с базой 10 м, заглубленным на 2.5 м и ориентированным вдоль направления действия регионального растяжения.

В данных деформационного мониторинга была зафиксирована подготовка завершающей фазы Кударинского землетрясения на пунктах “Бугульдейка” и “Приольхонье” (расстояния до эпицентра — 37 и 45 км соответственно, рис. 1). Несмотря на относительно близкое расположение пунктов мониторинга “Бугульдейка” и “Приольхонье” 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. Во втором пункте в первой точке за десять дней до него начался экспоненциальный рост деформаций, во второй точке визуальных признаков подготовки землетрясения не выявлено [13]. Причина отличий деформационных признаков подготовки Кударинского землетрясения в пунктах “Бугульдейка” и “Приольхонье” объясняется 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 (рис. 1, врезка). 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.

В настоящей работе сделана попытка определить возможные предвестники Кударинского землетрясения по данным о микросейсмических шумах. Ранее нами были выявлены проявления возможных предвестников близких сильных и умеренных землетрясений БРС на эпицентральных расстояниях до 80 км, выразившихся в понижении уровня микросейсмического шума за периоды от нескольких часов до десятков минут до толчка в частотной области от 0.5 Гц и выше [7]. В случае Кударинского землетрясения значимых изменений в амплитудно-частотном составе микросейсмических колебаний для указанных частот выявлено не было [7], поэтому мы анализировали низкочастотный диапазон — от 0.01 до 1 Гц.

Анализировались сейсмограммы микросейсмического шума перед и после землетрясения, полученные на сейсмических станциях, расположенных в пределах центральной части БРС (эпицентральных расстояния варьировались от 30 до 250 км, рис. 1). Сейсмическая станция “Куяда” начала работу в непрерывном режиме с 30.11.2020 (т.е. за 10 дней до Кударинского землетрясения), что затрудняет анализ непосредственно фоновых колебаний до землетрясения, поэтому в работе анализировался временной период от начала регистрации и до апреля 2022 г., для того чтобы оценить характеристики микросейсмического шума в спокойном состоянии.

Для всех сейсмических станций на расстояниях до 250 км были определены средний спектр микросейсмического шума и его поляризация в низкочастотной области от 0.01 до 1 Гц по архивным данным непрерывной сейсмической регистрации. Далее выполнялся спектрально-временной анализ 30-минутных участков записи микросейсмических колебаний (рис. 2): для них строились СВАН-диаграммы (спектрограммы) и поляризационные диаграммы, показывающие направление колебаний в горизонтальной плоскости. В итоге проводилось сравнение полученных текущих спектров и поляризационных диаграмм со средними спектрами и поляризационными диаграммами для каждой станции.

Анализ микросейсмического шума на станции Куяда в интервале от 0.01 до 1 Гц выявил периодическое увеличение амплитуд колебаний по горизонтальным компонентам в частотном диапазоне 0.01–0.1 Гц за период от 10 дней до Кударинского землетрясения и до 4 дней — после (до 20 ч 13.12.2020, рис. 2). За 14 ч до Кударинского землетрясения и 9 ч после него наблюдалось максимальное увеличение амплитуд колебаний — приблизительно в 20 раз относительно спокойного

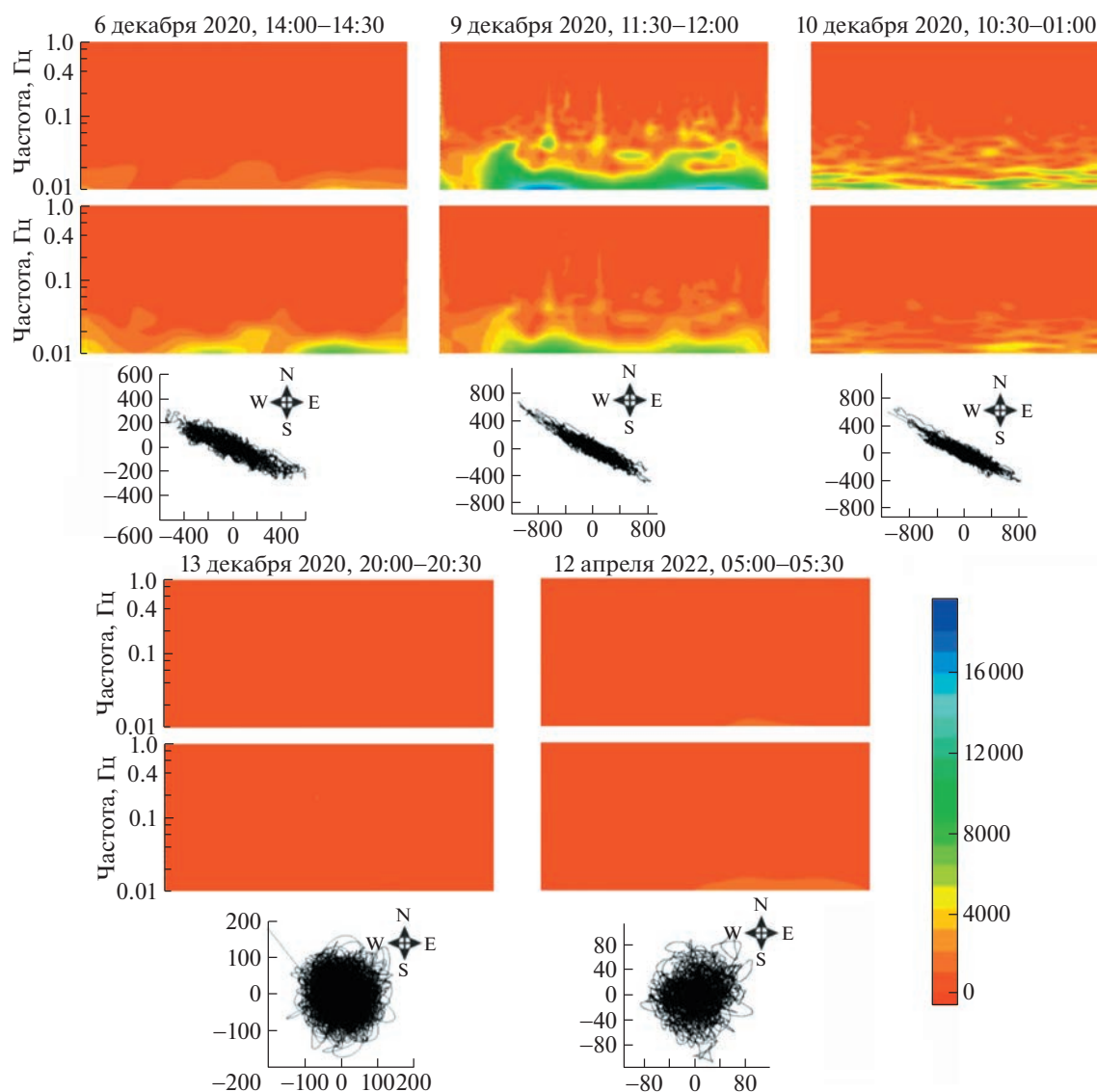


Рис. 2. Спектрограммы и поляризационные диаграммы микросейсмического шума в частотном диапазоне 0.01–1 Гц до и после Кударинского землетрясения на станции Куяда.

фона (рис. 2). Частоты излучения сейсмических волн для самого Кударинского землетрясения составляют: 7–20 Гц для Р-волны и 2–15 Гц для S-волны.

Для всего периода (с 01.12.2020 до 14.12.2020) на станции Куяда также отмечается резкая смена ориентации колебаний с беспорядочной на выраженную северо-западную – юго-восточную (рис. 2). Фоновые микросейсмические колебания складываются из сейсмических волн от множества эндогенных и экзогенных источников и, по большей части, представляют собой поверхностные волны. Влияние множества расположенных в разных азимутах источников обуславливает наблюдаемое отсутствие направленности излучения микросейсмических шумов (рис. 2). Амплитудно-частотный состав микросейсмических ко-

лебаний в конкретном пункте измерений является относительно постоянным с вариациями в зависимости от сезона, антропогенной нагрузки, метеопараметров, прибойных эффектов, влияния зон разломов и пр. ([3, 8, 14] и мн. др.), но может значительно меняться при достаточно сильном внешнем воздействии сторонних факторов, таких как перестройка среды при подготовке сильного землетрясения [1, 2, 4–7]. В нашем случае влияние метеоусловий и прибойных эффектов может быть исключено – скорость ветра, в основном, не превышала 2–5 м/с, направление ветра – западное, восточное, только 5 и 12 декабря направление сменилось на северо-западное (<https://www.gismeteo.ru>). Антропогенный фактор также исключается. Таким образом, можно заключить, что в микросейсмических шумах на

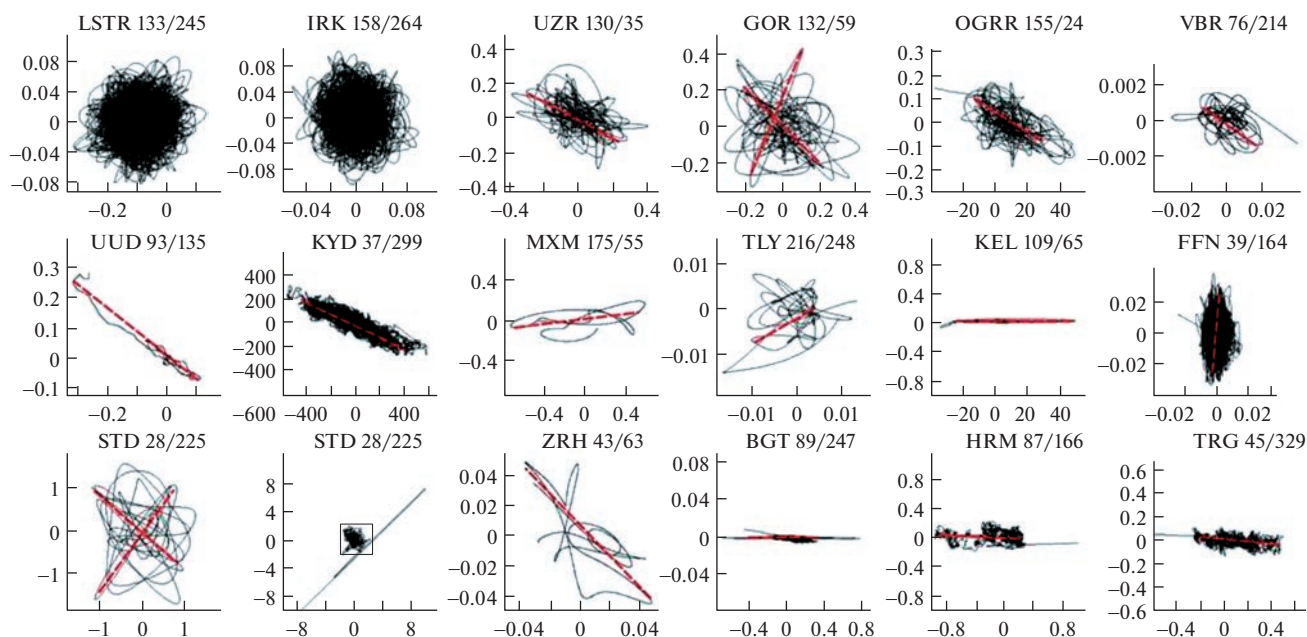


Рис. 3. Поляризационные диаграммы в частотном диапазоне 0.01–1 Гц микросейсмического шума перед Кударинским землетрясением на станциях, расположенных в различных азимутах относительно эпицентра.

станции Куяда отразился процесс перестройки среды перед землетрясением, что подтверждается также наблюдаемыми аномалиями деформаций горных пород [13].

Процесс подготовки землетрясения должен был отразиться на других станциях вблизи от эпицентра, поэтому в работе были проанализированы данные, полученные на сейсмических станциях Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, расположенных в районе Южного Байкала на расстояниях от 28 до 158 км от эпицентра (рис. 1). На рис. 3 приведены поляризационные диаграммы колебаний микросейсмических шумов в горизонтальной плоскости в частотном диапазоне 0.01–1 Гц для сейсмических станций, расположенных в центральной части БРС. Для удаленных станций (эпицентральное расстояние больше 130 км) выраженная смена ориентации колебаний отсутствует, в то время как для станций, близких к эпицентру, наоборот, наблюдается резкая смена ориентации колебаний. Необходимо отметить, что на станциях, расположенных в разных азимутах относительно эпицентра Кударинского землетрясения, ориентация колебаний в горизонтальной плоскости заметно отличается, при этом, совпадая с азимутом на эпицентр. Среди этих станций выделяется группа достаточно удаленных станций с ориентацией колебаний, перпендикулярной к азимуту на эпицентр — эти станции расположены в зонах крупных разломов, ограничивающих Южнобайкальскую впадину, или за ними.

Сравнение спектрограмм и поляризации по трем компонентам (С–Ю, В–З и вертикальная) показало, что усиление колебаний наблюдалось только для горизонтальных компонент, для амплитуд вертикальной компоненты значительных изменений не обнаружено. Диаграммы направленности движения частиц (поляризационные диаграммы, рис. 2, рис. 3) также показывают, что движения происходили в горизонтальной плоскости. При этом поляризационные диаграммы S-волны от Кударинского землетрясения показывают обычную для поперечных волн поляризацию колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях — с направлением на очаг землетрясения (поляризованные SV- и SH-волны соответственно). Отсутствие колебаний в вертикальной плоскости характерно для продольных сейсмических волн, SH-волн и поверхностных волн Лява. В случае Кударинского землетрясения эпицентральные расстояния слишком малы для формирования поверхностных волн, что свидетельствует о доминировании в поле микросейсмических шумов в указанный период объемных волн.

Для того, чтобы определить зону готовящегося землетрясения, на карту были нанесены отрезки с точкой начала в месте локализации сейсмической станции и с азимутом колебаний, полученным по поляризационной диаграмме (на рис. 4 эти отрезки показаны пунктирными линиями). Район пересечения этих отрезков указывает на источник возмущений — зону готовящегося сильного сейсмического события. Наблюдаемые отклонения точного азимута на эпицентр землетрясения и

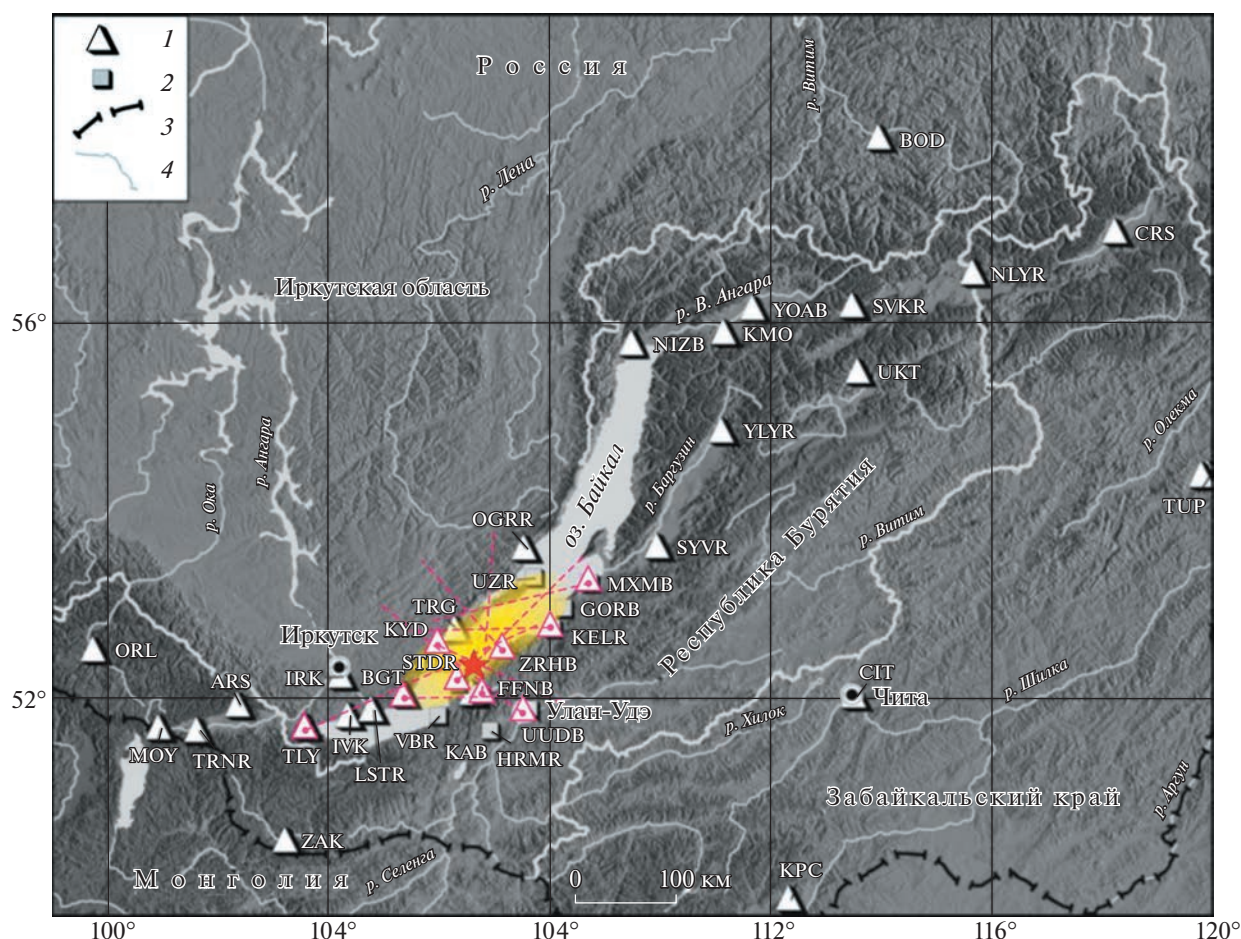


Рис. 4. Выделение зоны очага готовящегося сильного сейсмического события (желтая область) по данным об ориентации колебаний микросейсмического шума. Звездочкой показан эпицентр Кударинского землетрясения, пунктиром — азимуты колебаний микросейсмического шума, треугольниками с красными границами обозначены станции, на которых наблюдалась смена поляризации колебаний микросейсмического шума с ориентацией на эпицентр землетрясения. 1 — ЦСС Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 2 — ЦСС Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 3 — государственная граница; 4 — границы административного деления РФ.

ориентации колебаний, полученной по поляризационной диаграмме, частично объясняются использованием среднего азимута ориентации колебаний, а не всего азимутального створа, в котором наблюдаются колебания, а также размерами эпицентральной зоны сильного землетрясения, занимающего достаточно большой и протяженный объем.

Сопоставление данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволяет сделать предположение о том, что в поле микросейсмических шумов, по-видимому, отразился процесс медленных движений по разлому перед землетрясением и после основного срыва (толчка) с последующим затуханием. Предлагаемый способ позволяет осуществлять краткосрочное определение подготовки сильного сейсмического события и его положение и предпринять необходимые меры по предотвращению серьезных по-

следствий на объектах повышенной опасности, на которых ведется сейсмический мониторинг.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”, и данных, полученных на уникальной научной установке “Южно-Байкальский инструментальный комплекс”, входящей в состав Центра коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований

и Государственным фондом естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-55-53019 с использованием Уникальной научной установки (УНУ) “Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saltykov V.A.* On the Possibility of Using the Tidal Modulation of Seismic Waves for Forecasting Earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 2. P. 250–261.
2. *Sobolev G.A.* Microseismic Variations Prior to a Strong Earthquake // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2004. V. 40. № 6. P. 455–464.
3. *Sobolev G.A., Lyubushin A.A., Zakrzhevskaya N.A.* Asymmetrical Pulses, the Periodicity and Synchronization of Low Frequency Microseisms // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2008. V. 2. P. 118–134.
4. *Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 1. С. 9–35
5. *Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
6. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
7. *Korol S.A., Sankov A.V., Dobrynina A.A., Sankov V.A.* Ambient Seismic Noise Variations before Earthquakes in the Baikal Rift System // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13. № 2s. P. 0632.
8. *Черных Е.Н., Табулевиц В.Н.* О создании базы данных по сейсмическим шумам // *Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов*. Архангельск: Институт экологических проблем севера УРО РАН, 2004. Т. 2. С. 357–361.
9. *Dobrynina A.A., Perevalova N.P., Sankov V.A., Edemsky I.K., Likhnev A.V.* Analysis of the Seismic and Ionospheric Effects of the Kudarinsky Earthquake on December 9, 2020 // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13. № 2s. P. 0622. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0622>
10. *Sankov V.A., Dobrynina A.A.* Active faulting in the Earth's crust of the Baikal rift system based on the earthquake focal mechanisms // *Moment Tensor Solutions*. Springer Natural Hazards. Springer, Cham., 2018. P. 599–618.
11. *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.
12. *Салко Д.В., Борняков С.А.* Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // *Приборы*. 2014. № 6. С. 24–28.
13. *Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильасова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А., Снопков С.В.* Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. 13(5): 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
14. *Добрынина А.А., Саньков А.В., Шагун А.Н.* Сезонные вариации амплитудно-частотных характеристик микросейсмических колебаний по данным сейсмических станций Байкальской сети // *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2018. Т. 41. № 3 (64). С. 22–34.

ANOMALOUS SEISMIC NOISES FROM THE DECEMBER 9, 2020 $M_w = 5.6$ KUDARA EARTHQUAKE IN THE BAIKAL BASIN

A. A. Dobrynina^{a,b,#}, V. A. Sankov^a, S. A. Bornyakov^a, S. A. Korol^a, and A. V. Sankov^a

^a*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^b*Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*

[#]*E-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

Presented by Academician of the RAS E.I. Gordeev December 2, 2022

Studies have been conducted on the variations of ambient noise recorded by broadband and short-period seismic stations in the area of South Baikal before and after the large December 9, 2020 Kudara earthquake with $M_w = 5.6$. 10 days before the earthquake, there was a gradual increase of oscillation amplitudes in the frequency range from 0.01 to 0.1 Hz, with an increasing background observed also during 4 days after the main shock (period from 01.12.2020 to 13.01.2021). The maximum amplitude increase is 19.5 against the background. During this time, there were recorded 48 aftershocks. The analysis of direction of particle motion in seismic waves over the reporting period showed an abrupt change in the orientation of oscillations, which is fully consistent with the azimuth for the main shock epicenter. The analysis of seismograms over the next period (from December 13) did not show similar effects in the ambient noise field. Apparently, the ambient noise field reflected the process of slow faulting before the earthquake and after the main shock with subsequent attenuation.

Keywords: ambient noise, short-term precursor, Kudara earthquake