

БЫСТРИНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 21.09.2020 г. ($M_w = 5.6$) НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ФЛАНГЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ: ВЕХА В МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. Я. Б. Радзиминович^{1,2, *}, А. В. Новопашина³,
О. Ф. Лухнева⁴, Н. А. Гилёва¹, Е. А. Кузьмина⁴

¹Байкальский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”, г. Иркутск, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, г. Москва, Россия

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

⁴Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

*E-mail: yan.radziminovich@gmail.com

Поступила в редакцию 20.12.2023 г.

После доработки 05.02.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В статье представлены макросейсмические данные о Быстринском землетрясении 21.09.2020 г. ($M_w = 5.6$), произошедшем в восточной части Тункинской системы впадин на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны. Информация была собрана главным образом посредством интерактивного опросного листа, размещенного на сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Всего было получено 3013 откликов очевидцев; такое количество макросейсмических данных является беспрецедентным за всю историю сейсмологических наблюдений в Байкальском регионе. Часть макросейсмических данных была получена с использованием традиционной почтовой рассылки опросных листов. В общей сложности были собраны сведения из 263 населенных пунктов. Максимальная интенсивность сотрясений (VI–VII баллов по шкале MSK-64) наблюдалась в д. Быстрая и пос. Култук. Интенсивность сотрясений V баллов отмечена на расстоянии до ~180 км; интенсивность IV балла – на расстоянии до ~550 км. Анализ данных о Быстринском землетрясении выявил существенно более низкое затухание колебаний по сравнению с ожидаемым по региональному макросейсмическому уравнению. В целом, в связи с большим объемом данных, собранных с помощью современных коммуникационных технологий, Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. можно рассматривать как важную веху в макросейсмических исследованиях в Восточной Сибири.

Ключевые слова: макросейсмические данные, землетрясение, интернет-опросник, Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050108>, **EDN:** EJTBXT

ВВЕДЕНИЕ

Юг Восточной Сибири считается одной из наиболее опасных в сейсмическом отношении территорий России [Уломов, 2013]. Сейсмическая активность приурочена главным образом к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), протягивающейся с юго-запада на северо-восток почти на 2000 км. Центральным и древнейшим звеном БРЗ является впадина оз. Байкал, юго-западный и северо-восточный фланги представлены более молодыми суходольными впадинами [Логачев, 2003]. В течение года в БРЗ регистрируется

в среднем 8000–10 000 землетрясений [Мельникова и др., 2009], хотя сильные сейсмические события ($M \geq 5.0$) происходят сравнительно редко. Среди сейсмически активных районов Восточной Сибири юго-западный фланг БРЗ занимает особое место, прежде всего в силу высокого сейсмического потенциала активных разломов. Землетрясения этого района представляют непосредственную опасность для территории Южного Прибайкалья, характеризующейся высоким уровнем урбанизации, высокой плотностью населения, а также наличием развитой

транспортной инфраструктуры и промышленных предприятий. Сильные сейсмические события юго-западного фланга БРЗ могут сопровождаться повреждениями зданий и значительным материальным ущербом. В качестве примера можно привести разрушительное Култукское землетрясение 27.08.2008 г. ($M_w = 6.3$) [Мельникова и др., 2012], вызвавшее тяжелые повреждения некоторых зданий в ближней к эпицентру зоне и ощущавшееся на огромной площади на расстояниях до 900 км [Радзиминович и др., 2009]. Землетрясение 21.09.2020 г. ($M_w = 5.6$), произошедшее в восточной части Тункинской долины, вблизи д. Быстрая, является еще одним ярким примером сильного сейсмического события в рассматриваемом районе [Гилёва и др., 2020; Filippova et al., 2022].

По нескольким причинам Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. является одним из наиболее значимых сейсмических событий для юга Восточной Сибири за последние десятилетия. Во-первых, оно спровоцировало ощутимые эффекты на большой площади и вызвало широкий общественный резонанс. Во-вторых, землетрясение сопровождалось повреждениями зданий в ближней к эпицентру зоне и причинило заметный материальный ущерб. В-третьих, землетрясение дало нечастую возможность протестировать региональную интернет-систему сбора макросейсмических данных в условиях сильного сейсмического воздействия и массовых обращений пользователей к сайту, а также наметить пути ее усовершенствования. И, наконец, полученные макросейсмические данные позволили проверить соответствие наблюдавшегося затухания сейсмических колебаний региональному макросейсмическому уравнению. Следует также отметить еще одно немаловажное обстоятельство. Относительная редкость сильных землетрясений в пределах Тункинской системы впадин обуславливает дефицит макросейсмических данных, необходимых для разработки реалистичных сценариев сейсмического воздействия на урбанизированные территории Южного Прибайкалья. Кроме того, интерес представляет и то, что землетрясение сопровождалось рядом нетипичных проявлений, в частности, сильными акустическими эффектами, заметными на больших эпицентральных расстояниях. Таким образом, любое относительно сильное сейсмическое событие в исследуемом районе может рассматриваться как ценный источник новых данных.

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), включающий Тункинскую систему впадин, юго-восточный сегмент Главного Саянского разлома, впадину оз. Хубсугул, а также западное замыкание впадины оз. Байкал, характеризуется в целом высокой сейсмичностью. Вместе с тем эпицентрально поле этого района отличается неравномерностью (рис. 1). Эпицентры землетрясений сосредоточены, главным образом, в западной части Тункинской системы впадин, в то время как ее восточная часть почти асейсмична [Голенецкий, 1998; Мельникова и др., 2009]. Основными активными структурами, определяющими сейсмическую опасность территории, являются Тункинский и Главный Саянский разломы. Их сейсмический потенциал составляет $M_{\max}$ 7.7 и 8.0 соответственно [Чипизубов и др., 2009; Уломов, 2013]. Согласно палеосейсмологическим исследованиям, на протяжении голоцена в зоне Тункинского разлома неоднократно возникали сильные землетрясения, магнитуда которых превышала 7.0 [McCalpin, Khromovskikh, 1995; Smekalin et al., 2013]. В зоне Главного Саянского разлома также были обнаружены сейсмодислокации голоценового возраста, образованные при землетрясениях с магнитудой 7.5–8.0 [Чипизубов, Смекалин, 1999; Ritz et al., 2018], что позволяет считать его одной из наиболее опасных тектонических структур в Восточной Сибири [Писаренко и др., 2022].

Рассматриваемый район в целом характеризуется сдвиговой кинематикой современных тектонических движений [Мельникова, Радзиминович, 2007]. Скорость относительных горизонтальных движений на юго-западе БРЗ оценивается в $0.5\text{--}1.4\text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ [Лухнев и др., 2021], в то время как в центральной части рифтовой зоны этот параметр значительно выше и составляет $3.2\text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ [Лухнев и др., 2010].

В течение периода инструментальных наблюдений землетрясения, сравнимые по магнитуде с палеособытиями, на юго-западном фланге БРЗ не регистрировались. К сравнительно сильным и наиболее значимым сейсмическим событиям относятся Мондинское землетрясение 04.04.1950 г. ($M_w = 6.9$) [Delouis et al., 2002], Еловское землетрясение 29.06.1995 г. ($M_w = 5.7$) [Голенецкий, 2001; Баранников и др., 2008], Култукское землетрясение 27.08.2008 г. ($M_w = 6.3$)

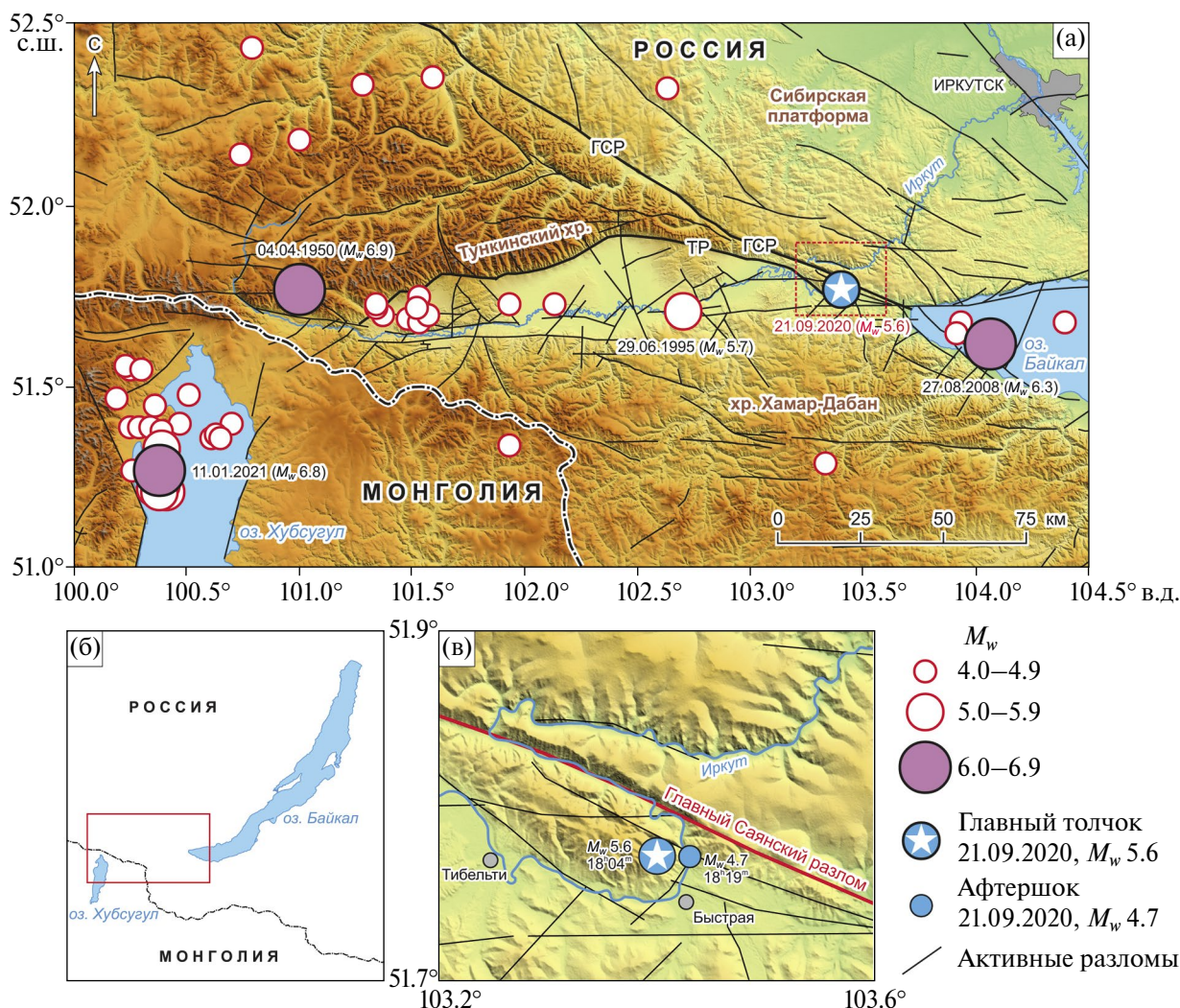


Рис. 1. Сейсмичность юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны (1960 – наст. время) – (а); местоположение района исследований в пределах Байкальского региона – (б); локализация эпицентров главного толчка ($M_w = 5.6$) и сильнейшего афтершока ($M_w = 4.7$) Быстринского землетрясения – (в). Красная пунктирная линия на рис. (а) оконтуривает область, показанную на рис. (в). Моментные магнитуды землетрясений в случае отсутствия прямых определений пересчитаны из энергетических классов [Rautian et al., 2007] с использованием соотношения из работы [Середкина, Гилева, 2016]. Активные разломы показаны по работе [Lunina, 2016]; ГСР – Главный Саянский разлом; ТР – Тункинский разлом.

[Мельникова и др., 2012; 2013], а также недавнее Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 г. ($M_w = 6.8$) [Liu et al., 2021; Lukhnev et al., 2022].

Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ($M_w = 5.6$) также можно отнести к этому ряду (таблица). Его очаговые параметры и тектоническая позиция детально рассмотрены в работе [Filipova et al., 2022]. Отметим, что очаг Быстринского землетрясения приурочен к юго-восточному сегменту Главного Саянского разлома и может рассматриваться как практически единственное надежное подтверждение активности этого фрагмента структуры на современном этапе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДАННЫЕ

Сбор макросейсмических данных о Быстринском землетрясении осуществлялся несколькими способами. Основной объем информации был получен с использованием интернет-опросника, размещенного на веб-сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>). Этот метод получения макросейсмических данных демонстрирует исключительно высокую эффективность, позволяя собирать большое количество информации за короткое время. На текущий момент он широко используется как в глобальном, так и в региональном масштабе [Sbarra et al., 2010; Wald et al., 2011; Bossu et al.,

Основные параметры Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. и его наиболее сильного афтершока согласно различным источникам

Источник данных	T_0 , чч:мм:сс	Гипоцентр			M
		φ° , с.ш.	λ° , в.д.	h , км	
Основной толчок					
BAGSR	18:04:57.4	51.78	103.41	12	
MOS	18:04:56.8	51.779	103.445	14	$mb = 5.5, MS = 5.2$
NEIC	18:04:57.67	51.857	103.480	25.5	$M_w = 5.5$
GCMT	18:05:00.10	51.85	103.50	25.9	$M_w = 5.5$
GFZ	18:04:59.06	51.81	103.47	19	$M_w = 5.4$
ISC	18:04:57.99	51.8212	103.4802	11.2	$mb = 5.3, MS = 5.2$
[Гилёва и др., 2020]	18:04:57.40	51.744	103.418	18.3	
[Filippova et al., 2022]				24	$M_w = 5.6$
Афтершок					
BAGSR	18:19:54.7	51.77	103.41	12	
MOS	18:19:53.6	51.804	103.456	9	mb 4.7, MS 4.2
NEIC	18:19:55.96	51.7902	103.4938	10	mb 4.6
GCMT	18:19:58.20	51.80	103.48	18.5	M_w 4.8
GFZ	18:19:55.49	51.795	103.617	10	mb 4.6
ISC	18:19:54.55	51.8458	103.4980	4.8	mb 4.5, MS 4.0
[Гилёва и др., 2020]	18:19:55.28	51.730	103.449	17.7	
[Filippova et al., 2022]				6	M_w 4.7

Примечания: BAGSR – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН (Иркутск, Россия, <http://seis-bykl.ru>); MOS – ФИЦ ЕГС РАН (Обнинск, Россия, <http://www.ceme.gsras.ru>); NEIC – National Earthquake Information Center (США, <https://earthquake.usgs.gov>); GFZ – Helmholtz Centre Potsdam (Германия, <https://geofon.gfz-potsdam.de>); GCMT – The Global Centroid-Moment-Tensor Project (США, <https://www.globalcmt.org>); ISC – International Seismological Centre (Великобритания, <http://www.isc.ac.uk>).

2017; Quitoriano, Wald, 2020], в том числе в сейсмоопасных регионах России [Митюшкина и др., 2011; Чеброва и др., 2020; Тубанов и др., 2021; Чебров и др., 2021; Коновалов и др., 2022; 2023].

В Восточной Сибири метод практикуется с сентября 2008 г. [Радзиминович и др., 2014]. Детальное описание интернет-опросника, его структуры, а также опыт его использования для массового сбора макросейсмических данных в Южном Прибайкалье приводится в работе [Radziminovich et al., 2022]. Для анализа мы использовали только те опросные листы,

в которых однозначно указывался населенный пункт и которые содержали хотя бы минимальную макросейсмическую информацию.

Необходимо отметить, что в связи с резким ростом количества обращений к сайту сразу после землетрясения сервер был перегружен запросами, что привело к техническим сбоям в его работе и временной недоступности сайта для пользователей. В свою очередь, это повлекло за собой значительное снижение количества откликов по сравнению с нашими ожиданиями. С целью восполнить недостаток откликов, мы осуществили рассылку обращения к жителям

Южного Прибайкалья посредством мессенджера Viber с просьбой заполнить опросный лист [Лухнева и др., 2023]. Эти действия позволили значительно улучшить ситуацию с поступлением откликов и увеличить их количество в несколько раз.

Наряду со сбором макросейсмических данных с помощью интернет-опросника был выполнен непосредственный опрос жителей населенных пунктов в пределах ближней зоны. В ходе полевого обследования также производилась фотодокументация последствий землетрясения, кроме того, часть фотоматериалов была любезно предоставлена местными жителями и администрациями населенных пунктов. К сожалению, в связи с продолжавшимся на тот момент распространением коронавирусной инфекции COVID-19 макросейсмическое обследование имело ограниченный характер. Небольшая часть данных была получена посредством почтовой рассылки опросных листов в местные органы власти. Этот метод все еще практикуется в Восточной Сибири, однако он показывает невысокую эффективность и его использование в будущем, по-видимому, будет ограничено лишь исключительными случаями.

Макросейсмические данные, собранные различными способами, были отсортированы по населенным пунктам. Оценка интенсивности сотрясений для каждого населенного пункта производилась с учетом всех имеющихся по нему сведений. Интенсивность сотрясений оценивалась по сейсмической шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965], до сих пор использующейся в России. Выбор шкалы MSK-64 обусловлен прежде всего полувековой историей ее применения в Прибайкалье, и, соответственно, накопленным за это время массивом данных об интенсивности сотрясений при землетрясениях БРЗ. Таким образом, использование MSK-64 в рассматриваемом случае позволяет обеспечить возможность сопоставления оценок интенсивности с данными о землетрясениях прошлых десятилетий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Быстринское землетрясение ($M_w = 5.6$) произошло в ночное местное время 22.09.2020 г. в 02 ч 04 мин 57 с (18:04:57 21.09.2020 г. по Гринвичу) (см. таблицу). Это событие стало первым сравнительно сильным землетрясением на юго-западном фланге БРЗ за 12-летний период с момента Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M_w = 6.3$). В течение этого времени магниту

землетрясений в пределах исследуемого района не превышала 5.0, при этом интенсивность сотрясений в крупных городах Южного Прибайкалья не превышала V баллов по шкале MSK-64. Быстринское землетрясение причинило материальный ущерб в населенных пунктах ближней зоны и уверенно ощущалось на большой площади. Через 15 минут после основного толчка последовал афтершок с $M_w = 4.7$ [Filipova et al., 2022], также вызвавший ощутимые эффекты на значительных расстояниях. Землетрясение сопровождалось сильными акустическими эффектами, заметными на большом удалении от эпицентра, а также в некоторых случаях ухудшением самочувствия очевидцев.

Землетрясение вызвало широкий общественный резонанс, что явным образом отражается в статистике посещений интернет-сайта БФ ФИЦ ЕГС РАН [Лухнева и др., 2023]. В течение 20 дней в сентябре 2020 г., предшествующих землетрясению, среднее количество визитов на сайт составляло 253 в сутки (момент посещения сайта фиксируется по московскому времени, UTC + 3). Землетрясение спровоцировало массовые обращения к сайту и в течение 21 сентября количество визитов составило 18 064, при этом ~99% из них приходится на последние три часа суток. В следующие сутки (22 сентября) сайт был посещен 14 438 раз. В последующий период до конца октября 2020 г. ежедневное количество визитов оставалось на заметно более высоком уровне по сравнению с периодом до землетрясения и составляло в среднем 770 визитов в сутки (рис. 2а).

Большая часть макросейсмических данных была получена посредством интернет-опросника, при этом, несмотря на ночное местное время, первые отклики респондентов поступили менее чем через 3 минуты после возникновения толчка. Через 11 минут после землетрясения нормальная работа сайта была прервана на 57 минут из-за массовых запросов пользователей (рис. 2б). В 05 ч 19 мин утра 22.09.2020 г. по местному времени последовал новый сбой продолжительностью 35 минут. Технические сбои оказали прямое влияние на динамику поступления откликов респондентов и их количество в первые часы после землетрясения. Рассылка обращения к жителям Южного Прибайкалья посредством мессенджера Viber позволила нормализовать этот процесс [Лухнева и др., 2023]. В течение первых суток после землетрясения был получен 2721 отклик, из них 597 поступило в течение первых 8 часов. Заполнение опросных листов продолжилось и в последующие дни;

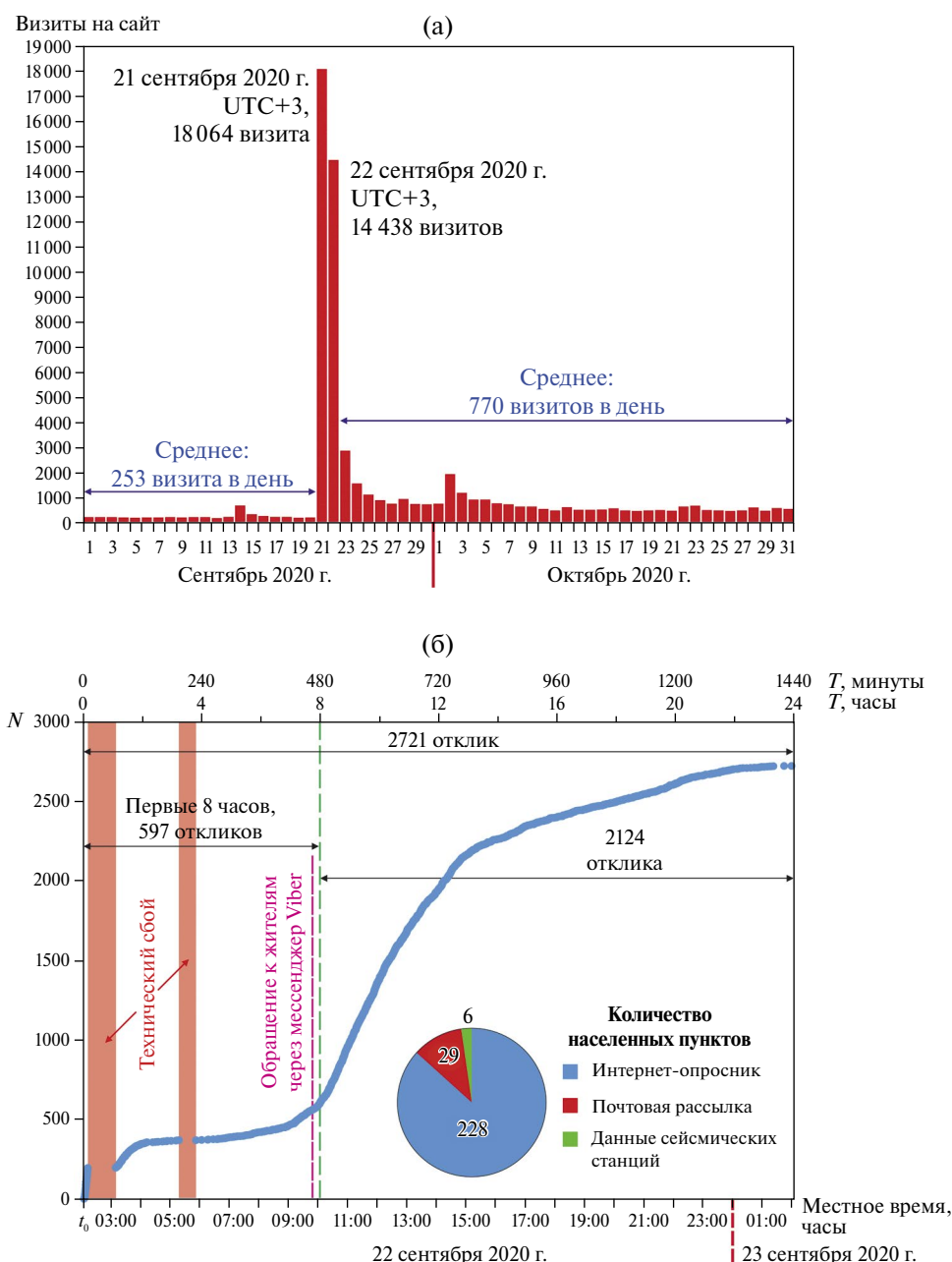


Рис. 2. Количество ежедневных визитов на веб-сайт БФ ФИЦ ЕГС РАН за период сентябрь–октябрь 2020 г. (а) и динамика поступления откликов респондентов в течение первых суток после Быстринского землетрясения (б).

всего в итоге было получено 3013 откликов, из которых 2733 отклика содержали по меньшей мере один диагностический признак и были признаны пригодными для дальнейшего анализа. Отметим, что из этого количества более половины откликов (1449) приходится на г. Иркутск.

С использованием интернет-опросника были собраны макросейсмические данные из 228 населенных пунктов, что позволяет считать этот метод наиболее эффективным как

в количественном отношении, так и в аспекте информативности и пространственного охвата. Сведения из 29 пунктов были получены посредством почтовой рассылки опросных листов; данные из 6 пунктов поступили от сотрудников сейсмических станций региональной сети. В трех населенных пунктах (Быстрая, Култук, Тибельти) материалы, полученные дистанционно, были подтверждены в ходе полевого макросейсмического обследования. В итоге, мы располагаем данными, позволяющими оценить



Рис. 3. Повреждения дымовых труб (а), (б) и печей (в), (г) в д. Быстрая.

интенсивность сотрясений в 263 точках наблюдения.

Наибольшая интенсивность сотрясений наблюдалась в ближайших к эпицентру населенных пунктах — д. Быстрая, с. Тибельти и пос. Култук. Деревня Быстрая и с. Тибельти, относящиеся к сельскому типу, застроены одноэтажными деревянными домами с печным отоплением. В д. Быстрая ($\Delta = 5$ км) землетрясение ощущалось всеми жителями и вызвало испуг и панику. Наиболее распространенные диагностические признаки включают сильное

раскачивание висячих предметов, сильное раскачивание и движение мебели, смещение и падение бытовых предметов с полок и столов, дребезжание посуды и стекол в шкафах. В помещении местной библиотеки (деревянное одноэтажное здание) на полках упали неустойчиво стоявшие книги. По свидетельству очевидцев, наблюдалось сильное сотрясение зданий; в помещениях отмечено осыпание чешуек побелки. В нескольких случаях отмечены повреждения печных труб и печей, в том числе в старом аварийном доме (рис. 3). При землетрясении был слышен сильный подземный гул.

Интенсивность сотрясений в д. Быстрая оценивается в VI–VII по шкале MSK-64.

Сходные, но менее выраженные эффекты землетрясения наблюдались в с. Тибельти (VI баллов; $\Delta = 12$ км). Очевидцы испытывали сильный испуг, у некоторых переходящий в панику; многие покинули помещения и выбежали на улицу. Отдельные люди теряли равновесие. Повреждения зданий возникли в немногочисленных случаях и сводились к возникновению трещин в кирпичной кладке печей и дымовых труб, а также к выпадению отдельных кирпичей и разрушению верхних частей труб (рис. 4а–4в). В помещениях отмечено возникновение трещин в штукатурке, падение ее кусков, осыпание чешуек побелки. Очевидцы упоминают дребезжание посуды и стекол в шкафах, раскачивание висячих предметов, колебание жидкости в посуде, смещение и падение неустойчивых предметов, дрожание и раскачивание мебели, сдвиг картин и фоторамок на стенах. В помещении магазина с полок упали товары (рис. 4г). Также был слышен сильный гул.

В поселке Култук (VI–VII баллов; $\Delta = 21$ км; население ~ 3400 чел.), преимущественно застроенном деревянными домами, согласно данным местной администрации, разрушено 12 печных труб, однако в целом последствия землетрясения нельзя назвать тяжелыми. Возможно, что отчасти это связано с капитальным ремонтом во многих жилых домах, выполненным после Култукского землетрясения 27.08.2008 г. [Радзинович и др., 2009]. В помещениях отмечено возникновение трещин в штукатурке и падение отдельных ее кусков (рис. 5а, 5б). Здесь также наблюдалось массовое падение незакрепленных предметов; примеры падения товаров с полок в одном из местных магазинов приведены на рис. 5в–5д. Очевидцы землетрясения испытывали сильный испуг, переходящий в панику, многие выбегали из домов.

В городе Слюдянка (VI баллов; $\Delta = 24$ км; население $\sim 18\,000$ чел.), застроенном зданиями различных типов (в основном деревянными и кирпичными), оценка интенсивности основана на 55 откликах очевидцев. К наиболее

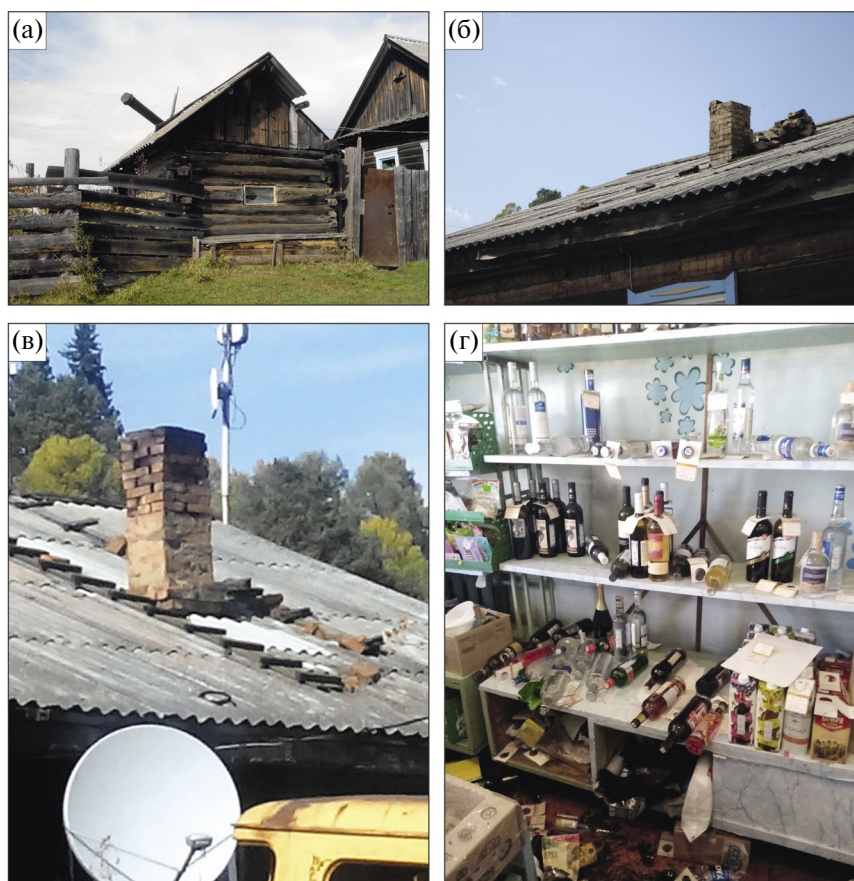


Рис. 4. Повреждения дымовых труб (а)–(в) и падение товаров с полок в одном из магазинов (г) в селе Тибельти. Фотография (г) любезно предоставлена администрацией магазина.



Рис. 5. Примеры повреждения штукатурки (а), (б) и падение товаров с полок в магазине (в)—(д) в поселке Култук. Фотографии (в)—(д) любезно предоставлены администрацией магазина.

выраженным диагностическим эффектам относится возникновение трещин в штукатурке, раскачивание и движение мебели, смещение и падение незакрепленных предметов, скрип и треск конструктивных элементов зданий. Сильные сотрясения привели к обрыву линии электропередачи и прекращению подачи электроэнергии в жилые дома на несколько часов. Землетрясение ощущалось всеми жителями города, при этом почти все очевидцы испытывали сильный испуг, около 20% — панику. Возможно, это было обусловлено не только сильными сотрясениями, но и мощным подземным гулом. Многие жители покинули помещения и долгое время провели на открытом воздухе, опасаясь возвращаться в дома из-за боязни повторных толчков.

Информация о макросейсмических эффектах, соответствующих интенсивности сотрясений V баллов, получена из 48 населенных пунктов, расположенных на эпицентральной расстоянии от 23 до 181 км. Землетрясение в зоне пятибалльных сотрясений вызвало пробуждение и испуг очевидцев и отчетливо ощущалось практически всеми жителями; некоторые покидали

дома и выходили на улицу. К типичным эффектам, наблюдавшимся в помещениях вне зависимости от этажа, относилось раскачивание мебели, в том числе тяжелой, раскачивание висячих предметов, смещение и падение незакрепленных предметов, дребезжание посуды и стекол в шкафах. Кроме того, во многих случаях наблюдалось образование тонких трещин в штукатурке и осыпание чешуек побелки. В некоторых населенных пунктах отмечены перебои в подаче электроэнергии во время землетрясения.

В 81 населенном пункте в диапазоне эпицентральных расстояний 49–421 км интенсивность сотрясений определяется менее уверенно и может быть оценена как IV–V баллов. Согласно описаниям очевидцев, наблюдавшиеся в этих пунктах макросейсмические эффекты были практически теми же, что и в зоне с интенсивностью V баллов, но несколько менее выраженными, при этом они также были замечены абсолютным большинством жителей.

Эффекты землетрясения, уверенно соответствующие интенсивности IV балла, отмечены

в 106 населенных пунктах на эпицентральных расстояниях от 52 до 554 км. Многие из очевидцев проснулись, некоторые испытывали испуг. В помещениях дребезжала посуда в шкафах, слегка раскачивались висятые предметы, дрожала мебель. Какие-либо повреждения в зданиях отсутствуют. Наиболее интересным обстоятельством является то, что интенсивность сотрясений IV балла зафиксирована на больших расстояниях в северных и северо-западных азимутах от эпицентра, в том числе в г. Нижнеудинск ($\Delta = 452$ км; население $\sim 30\,000$ чел.) и в г. Братск ($\Delta = 497$ км; население $\sim 224\,000$ чел.). Отметим, что оценка интенсивности в Братске основана на 56 откликах респондентов (максимальное количество для этого пункта за всю историю наблюдений) и может рассматриваться как вполне надежная. Наиболее удаленным пунктом, в котором Быстринское землетрясение вызвало ощутимые эффекты, является город Усть-Илимск (III балла; $\Delta = 692$ км; население $\sim 79\,500$ чел.). На основе всех собранных макросейсмических данных мы построили карту макросейсмических проявлений, представленную на рис. 6.

Большая часть макросейсмических данных относится к крупным городам Южного Прибайкалья с населением от 40 000 до 620 000 человек. Прежде всего, это Иркутск, Ангарск, Шелехов и Усолье-Сибирское; к числу крупных населенных пунктов можно отнести также п. Маркова и г. Слюдянка. Оценка интенсивности сотрясений в этих пунктах основана на довольно большом количестве откликов и может считаться надежной. Вместе с тем возможно, что значительное количество откликов, поступивших из крупных городов, а также их более высокая детальность обусловлены большей восприимчивостью городского населения к сейсмическим воздействиям. Не исключено, что в данном случае имеет место так называемый “фактор большого города”, в ряде случаев способный повлиять на оценку интенсивности сотрясений в сторону ее завышения [Татевосян и др., 2003].

Половина всех собранных с помощью интернет-опросника откликов очевидцев приходится на г. Иркутск (V баллов; $\Delta = 83$ км; население $\sim 620\,000$ чел.). Землетрясение ощущалось в городе абсолютным большинством жителей вне зависимости от этажа и типа здания. Диагностические признаки, имевшие массовый характер, включают общее сотрясение зданий, скрип и скрежет стен и полов, сильное дрожание и раскачивание мебели, в том числе тяжелой

(шкафы, кровати), дребезжание посуды, колебание и раскачивание бытовой техники (холодильники, телевизоры, системные блоки и мониторы компьютеров), сильные колебания висятых предметов, смещение картин и фоторамок на стенах. В сообщениях очевидцев часто упоминается падение незакрепленных предметов с полок, столов, шкафов. Случаи возникновения трещин в штукатурке и откалывания ее отдельных кусков были немногочисленны. Кроме того, отмечены случаи срабатывания сигнализации у припаркованных возле домов автомашин вследствие сильных сотрясений. Многие жители города слышали сильный гул [Лухнева и др., 2022].

Частота упоминания того или иного эффекта в откликах из шести крупных населенных пунктов Южного Прибайкалья приведена на гистограмме на рис. 7. Среди эффектов, описывающих реакцию предметов внутренней обстановки помещений, наиболее часто упоминается дрожание и раскачивание мебели (до 63%), а также дребезжание посуды и стекол (до 70%). На смещение или падение незакрепленных предметов указывается в 45% откликов, полученных из Слюдянки и Шелехова, а также, что вызывает удивление, в 58% откликов из г. Усолье-Сибирское, расположенного на большем расстоянии от эпицентра по сравнению с другими крупными городами. При этом данный показатель составляет 12% в Иркутске и 19% в Ангарске. Реакция людей, в основном, сводится к сильному испугу и по этому признаку не показывает существенного разброса между крупными городами, за исключением Слюдянки, где испуг при землетрясении испытали до 98% горожан. При этом 22–23% очевидцев в Слюдянке и в Усолье-Сибирском в панике выбегали из домов, хотя в других городах частота упоминания этого эффекта не превышает 10%. Спокойно покинули помещения от 20 до 53% очевидцев. Частота упоминания скрипа конструктивных элементов зданий варьируется от 6% в откликах из Усолья-Сибирского до 53% в сообщениях из Слюдянки, при 34–48% в остальных городах. Возникновение трещин в штукатурке упоминается главным образом в откликах из Слюдянки (36%), что согласуется с близким расположением к эпицентру и, соответственно, более высокой интенсивностью сотрясений. Акустические эффекты (подземный гул) упоминаются в 41–61% откликов из всех городов, за исключением наиболее удаленного от эпицентра г. Усолье-Сибирское.

Особый интерес представляет массовая и довольно острая реакция на землетрясение

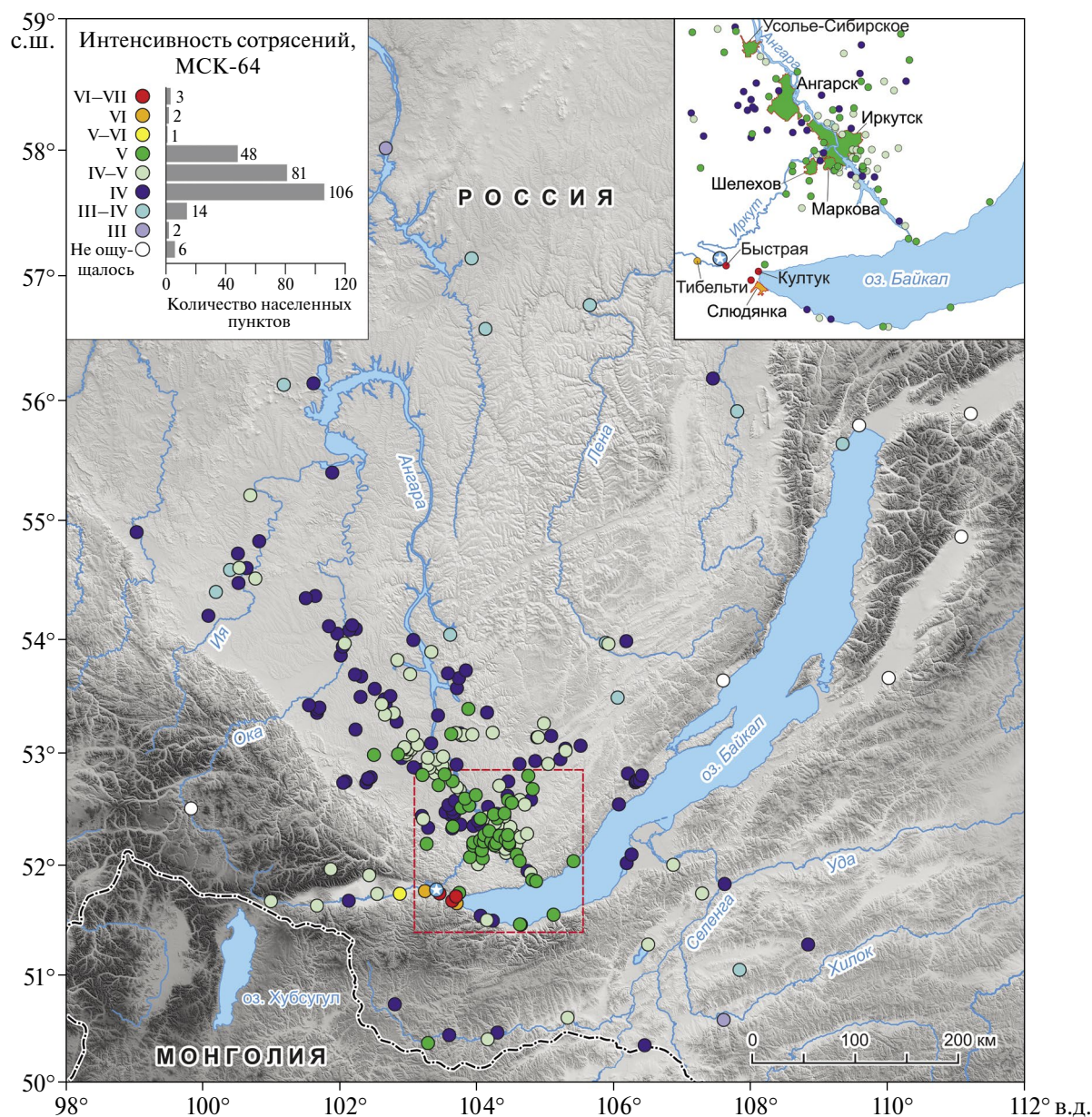


Рис. 6. Карта макросейсмических проявлений Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. Гистограмма показывает распределение населенных пунктов по интенсивности сотрясений. Красная пунктирная линия оконтуривает район, показанный на врезке. Белая звездочка в синем кружке означает эпицентр землетрясения.

домашних животных (частота упоминания от 34 до 50%) (рис. 7). Этот эффект наблюдался в диапазоне эпицентральных расстояний от 19 до 576 км. При сборе макросейсмических данных о землетрясениях прошлых лет реакции животных, как правило, уделялось очень мало внимания. Тем не менее результаты анализа данных о Быстринском землетрясении позволяют считать такой эффект достаточно распространенным и рассматривать его как часть общей картины макросейсмических проявлений [Радзиминович и др., 2021].

Среди эффектов землетрясений, до настоящего времени довольно редко встречавшихся в откликах очевидцев, следует отметить ухудшение самочувствия людей. В случае Быстринского землетрясения ухудшение состояния отмечалось заметно чаще и проявлялось с различными симптомами. Наиболее часто очевидцы упоминали ощущение тошноты, появлявшееся либо непосредственно в момент толчка, либо сразу после него. Кроме того, зафиксированы случаи возникновения головной боли, иногда начинавшейся за несколько часов до землетрясения,

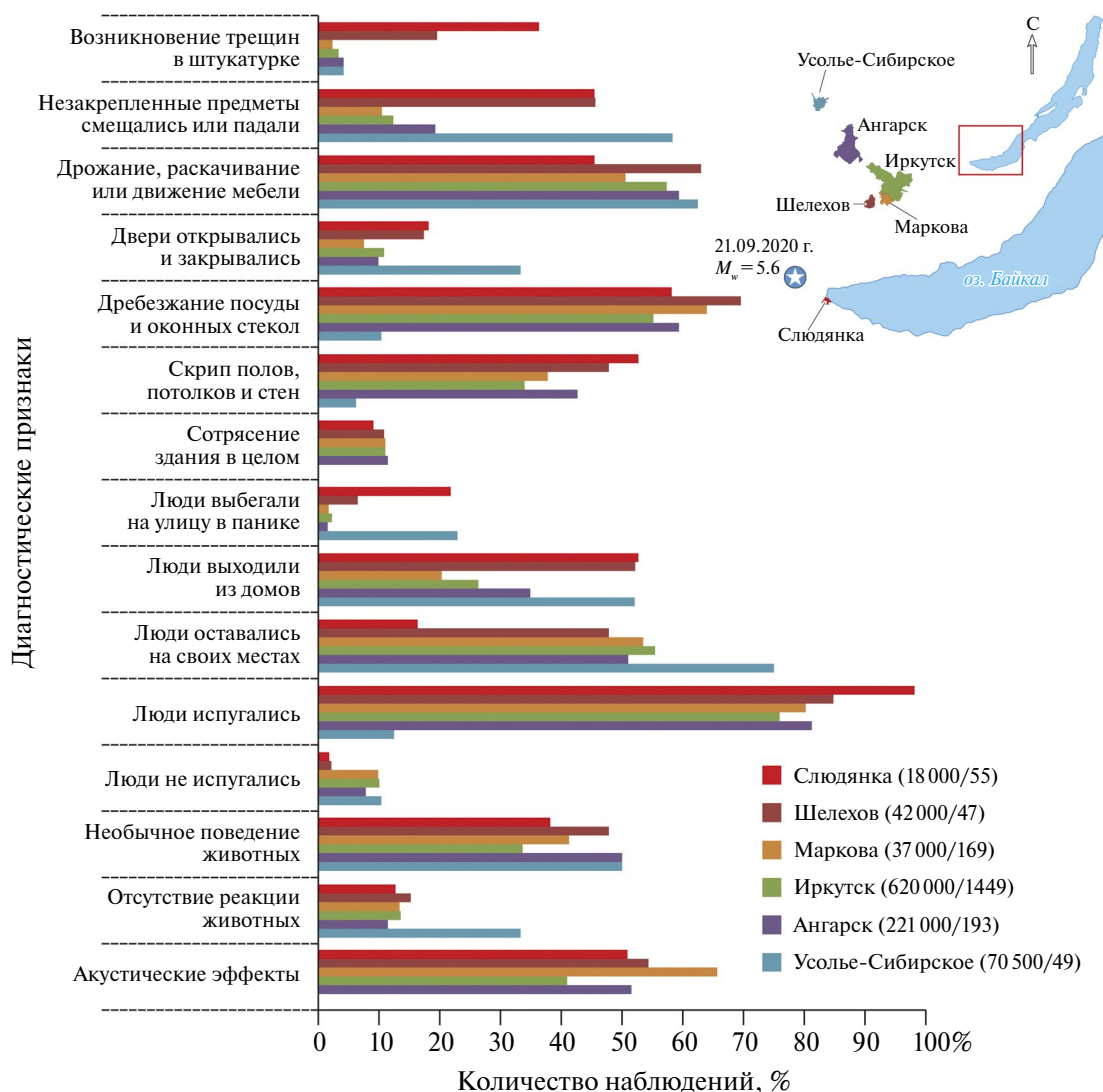


Рис. 7. Диагностические признаки, наблюдавшиеся в некоторых крупных городах юга Восточной Сибири при Быстринском землетрясении. Белая звездочка в синем кружке означает эпицентр землетрясения. В легенде в скобках после названия города указаны численность населения и количество откликов респондентов.

а также головокружения и изменения артериального давления. Некоторые очевидцы жаловались на тахикардию. Примечательно, что все перечисленные симптомы наблюдались в населенных пунктах, расположенных на эпицентральных расстояниях до 500 км и в которых интенсивность сотрясений составляла не менее IV баллов. Возможно, что ухудшение самочувствия связано с пережитым стрессом, обусловленным сильными сотрясениями. Косвенно на это указывают отмеченные случаи головокружения в г. Братск, жители которого довольно редко испытывают даже слабые землетрясения. Быстринское землетрясение ощущалось в г. Братск с интенсивностью IV балла, что на фоне отсутствия опыта пережитых сейсмических воздействий,

хотя бы умеренных, могло вызвать у очевидцев сильный испуг и стресс, и, как следствие, приступы тахикардии или головокружения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Карта макросейсмических проявлений (см. рис. 6) на первый взгляд показывает распространение сотрясений умеренной интенсивности преимущественно в северо-западных и северных азимутах от эпицентра. Подобная конфигурация макросейсмического поля наблюдается почти при каждом сильном землетрясении с эпицентром в пределах юго-западного фланга БРЗ или Среднего Байкала. В частности, очень похожая картина пространственного

распределения интенсивности сотрясений отмечена при Еловском землетрясении 29.06.1995 г. ($M_w = 5.7$) [Голенецкий, 2001], эпицентр которого располагался приблизительно в 50 км к западу от эпицентральной области Быстринского землетрясения. Такие же закономерности в распределении интенсивности сотрясений выявлены при Кударинском землетрясении 09.12.2020 г. ($M_w = 5.5$) с эпицентром в районе дельты р. Селенга (Средний Байкал) [Radziminovich et al., 2022]. В значительной мере такой характер макросейсмического поля определяется особенностями расположения населенных пунктов на юге Восточной Сибири. Абсолютное большинство городов, поселков и деревень сосредоточено в долинах крупных рек, а также вдоль основных транспортных путей. Этим же закономерностям подчиняется и плотность населения региона. Многие населенные пункты Южного Прибайкалья, в том числе крупные города, тяготеют к долине р. Ангара, простирающейся от озера Байкал сначала в северо-западном, а затем в северном направлении. Также в северо-западном направлении протягиваются железнодорожная линия и федеральная автотрасса Р-255 “Сибирь”. Соответственно, именно из этих районов поступил основной объем макросейсмических данных. С удалением от транспортных артерий и крупных рек количество населенных пунктов и плотность населения быстро снижаются, что обуславливает разреженность макросейсмического поля и создает в какой-то мере ложное впечатление о преобладающем распространении ощутимых колебаний в определенном направлении.

Быстринское землетрясение позволило нам протестировать соответствие наблюдаемой интенсивности сотрясений региональному макросейсмическому уравнению, связывающему магнитуду, интенсивность и гипоцентрального расстояние. На территории Восточной Сибири используется макросейсмическое уравнение Н.В. Шебалина [Shebalin, 1972]:

$$I = bM - v \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \quad (1)$$

где: I – интенсивность землетрясения; M – магнитуда; Δ – эпицентрального расстояние; h – глубина очага; b , v и c – коэффициенты уравнения, зависящие от региона. В сравнительных целях мы использовали три набора коэффициентов, один из которых отражает общемировые закономерности ($b = 1.5$, $v = 3.5$, $c = 3.0$) [Новый каталог..., 1977], а два других являются

региональными: $b = 1.5$, $v = 4.0$, $c = 4.0$ [Новый каталог..., 1977] и $b = 1.5$, $v = 3.44$, $c = 3.13$ [Фролова и др., 2019]. Кроме того, для сравнения нами проанализированы данные о Еловском (29.06.1995 г.) и Култукском (27.08.2008 г.) землетрясениях, также произошедших на юго-западном фланге БРЗ. Уравнение (1) предполагает использование магнитуды MS , в связи с чем мы воспользовались определением агентства ISC [International..., 2023], полученным по наибольшему числу сейсмических станций. Отметим, что в случае Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. оценки магнитуды MS , выполненные в ISC и в ФИЦ ЕГС РАН (MOS), полностью совпадают (см. таблицу). На рис. 8 представлены диаграммы затухания интенсивности сотрясений для Еловского, Култукского и Быстринского землетрясений, а также теоретические кривые затухания, построенные с использованием трех наборов коэффициентов макросейсмического уравнения. Как мы можем видеть, во всех трех случаях затухание колебаний существенно слабее, чем можно было бы ожидать из уравнения макросейсмического поля (1), вне зависимости от используемого набора коэффициентов. Несколько лучше соответствует фактическим данным кривая, построенная по уравнению с коэффициентами [Фролова и др., 2019], однако и она далеко не в полной мере удовлетворяет реальной ситуации. Наиболее ярко слабое затухание выражено именно для Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. Например, согласно уравнению (1), интенсивность сотрясений V баллов должна была наблюдаться на расстоянии до ~ 45 км, в действительности же такая интенсивность была отмечена на четверо большей дистанции (до 180 км). Столь же слабым затуханием характеризуется интенсивность сотрясений $IV-V$ и IV балла. Несмотря на заметное влияние на конфигурацию макросейсмического поля расположения населенных пунктов в Южном Прибайкалье, региональные особенности затухания колебаний, несомненно, также накладывают свой отпечаток. Причина слабого затухания колебаний в северных и северо-западных азимутах заключается, по-видимому, в тектоническом строении Байкальского региона. Большинство пунктов, в которых ощущалось Быстринское землетрясение, расположено в пределах стабильной Сибирской платформы, характеризующейся высокими значениями сейсмической добротности и наименьшим затуханием среди тектонических структур Восточной Сибири [Добрынина и др., 2016].

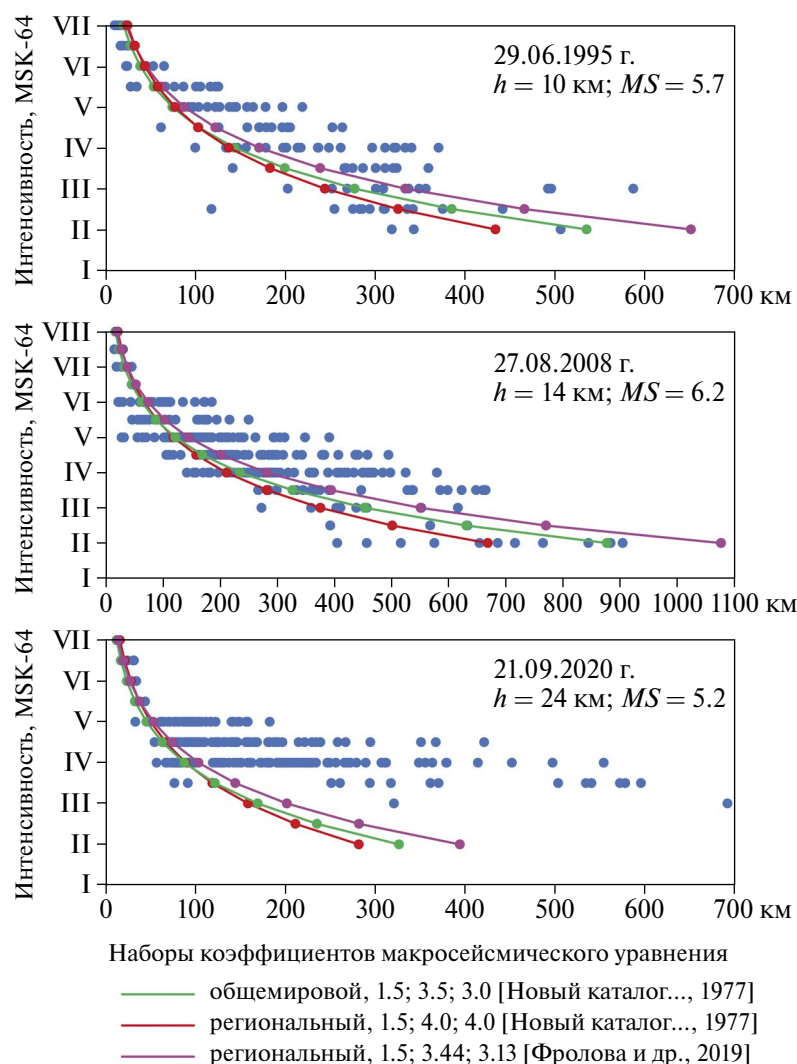


Рис. 8. Затухание интенсивности сотрясений при землетрясениях юго-западного фланга БРЗ. Синие точки отображают наблюдаемую интенсивность. Красная, зеленая и фиолетовая кривые отражают теоретическое затухание, рассчитанное по уравнению (1) с использованием различных наборов коэффициентов.

В случае Быстринского землетрясения нам представилась нечастая для Прибайкалья возможность оценить глубину гипоцентра по макросейсмическим данным. Для этого мы воспользовались уравнением, позволяющим рассчитать глубину исходя из известной интенсивности сотрясений в эпицентре и инструментально определенной магнитуды [Шебакин, 2003]:

$$h = 10^{\frac{bM - I_0 + c}{v}}, \quad (2)$$

где I_0 — эпицентральная интенсивность сотрясений; остальные обозначения те же, что и в уравнении (1). Эпицентр Быстринского землетрясения располагался на суше в непосредственной близости к д. Быстрая ($\Delta = 5$ км), поэтому

интенсивность сотрясений в этом пункте (VI–VII баллов) с небольшим допущением может быть принята в качестве I_0 . В этом случае, при использовании регионального набора коэффициентов (см. [Новый каталог..., 1977]) ($b = 1.5$, $v = 4.0$, $c = 4.0$) и $MS = 5.2$, глубина очага, рассчитанная по уравнению (2), составит $h = 21$ км. Если же воспользоваться набором коэффициентов по работе [Фролова и др., 2019] ($b = 1.5$, $v = 3.44$, $c = 3.13$), то глубина очага определяется как $h = 19$ км. Таким образом, значения глубины по макросейсмическим данным в целом неплохо согласуются с оценками, полученными в работах [Гилёва и др., 2020; Filippova et al., 2022], а также с определениями этого параметра по данным международных сейсмологических агентств NEIC, GCMT и GFZ (см. таблицу).

Одной из наиболее ярких особенностей Быстринского землетрясения является наличие очень сильных акустических эффектов, проявившихся в виде “подземного гула”. В целом, эффект излучения акустических волн из очаговой зоны землетрясения довольно хорошо известен [Шалимов и др., 2019; Спивак, Рыбнов, 2021; Arrowsmith et al., 2012; LePichon et al., 2003; Pilger et al., 2019; Shani-Kadmiel et al., 2021; Sylvander et al., 2007; Sylvander, Mogos, 2005; Tosi et al., 2000], однако применительно к сейсмоопасным территориям Восточной Сибири, это явление на данный момент изучено недостаточно и требует дополнительных исследований. В частности, сейсмоакустические эффекты землетрясения 05.12.2014 г. ($M_w = 5.0$) с эпицентром в акватории оз. Хубсугул проанализированы в работах [Сорокин и др., 2018; Сорокин, Ключевский, 2019]. Что касается Быстринского землетрясения, то анализ собранных макросейсмических данных позволяет утверждать, что акустическое излучение произвело значительное впечатление на очевидцев, которые описывают эти эффекты в весьма эмоциональных тонах и характеризуют гул как “неприятный”, “оглушающий”, “страшный”. Многие очевидцы слышали гул, похожий на работу тяжелой техники, еще до начала интенсивных колебаний в момент основного толчка. По другим свидетельствам, гул был слышен также в промежутке времени между основным толчком и наиболее сильным афтершоком. Афтершок также предварялся звуковыми эффектами, напоминающими шум ветра или работающей турбины. В целом, очевидцы наиболее часто сравнивают подземный гул с другими, привычными источниками сильного звука, среди которых шум тяжелой наземной техники, звук двигателей реактивного самолета, атмосферные явления (“сильный ветер”, “раскаты грома”), шум рельсового транспорта [Лухнева и др., 2022]. Сильные звуковые эффекты Быстринского землетрясения, согласно наблюдениям очевидцев, были слышны не только в ближней зоне, но и в населенных пунктах, расположенных на расстоянии до 350–370 км. Объективность этих сведений подтверждается инструментальной регистрацией акустических волн инфразвукового диапазона на станции I34MN, расположенной на территории Монголии в 500 км к югу от эпицентра [Семинский и др., 2021]. Отметим также, что акустические проявления, наряду с собственно фактом землетрясения, по-видимому, оказали долговременное влияние на психоэмоциональное состояние многих очевидцев и обусловили

возникновение у них сенсорных aberrаций. После Быстринского землетрясения и нескольких других сильных сейсмических событий, произошедших в Южном Прибайкалье в 2020–2021 гг., от жителей региона поступали многочисленные ложные сообщения о якобы ощущавшихся толчках, сопровождавшихся “подземным гулом” [Лухнева и др., 2022].

Сильное сейсмическое событие *apriori* предполагает острую реакцию общества, выражающуюся, в том числе, в активизации взаимодействия с сейсмологами. В этой связи мы ожидали поступления большого количества откликов от очевидцев сразу после землетрясения. В целом, наши ожидания оправдались, несмотря на технические сбои в работе сайта. С использованием интернет-опросника было получено 3013 откликов, из них 2721 в течение первых суток после толчка. Такое количество анкет от очевидцев землетрясения в Южном Прибайкалье было получено впервые. Этот результат был достигнут, прежде всего, благодаря своевременной работе с населением, в частности за счет прямого обращения к очевидцам землетрясения посредством мессенджера Viber с просьбой заполнить опросный лист [Лухнева и др., 2023]. Рассылка обращения была осуществлена в утренние часы (через 8 часов после землетрясения), когда большинство людей оправились от первого стресса и на первом месте оказался интерес к произошедшему событию. Это также способствовало увеличению количества откликов. Следует отметить, что очевидное влияние на динамику поступления откликов, которое оказывает рассылка прямого обращения к гражданам посредством социальных сетей и мессенджеров, подтверждается обследованиями некоторых землетрясений Европы. Например, такой подход был использован итальянскими сейсмологами при исследовании землетрясения 29.12.2020 г. ($M_w = 6.4$) в Хорватии и его проявлений на территории г. Триест (Италия). Обращение к населению через мессенджеры и соцсети дало прекрасные результаты и позволило собрать более 6000 откликов с помощью интернет-опросника [Sagad et al., 2023]. Ранее социальные сети были задействованы для сбора макросейсмических данных при исследовании землетрясения 22.04.2013 г. в Венгрии [Szanyi et al., 2014].

Использование интернет-опросника в случае Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. показало очень высокую эффективность по сравнению с традиционными способами сбора макросейсмических данных (см. рис. 2), однако в то же время позволило выявить некоторые

недостатки и ограничения метода. Инициатива по заполнению интернет-опросника, даже в случае прямого обращения к гражданам, принадлежит исключительно очевидцам землетрясения, что имеет несколько негативных следствий.

Во-первых, это во многом случайный характер списка населенных пунктов, из которых поступают макросейсмические данные, при этом большая часть данных приходится на большие города и пригородные зоны. Отдаленные небольшие сельские населенные пункты при использовании интернет-опросника часто остаются вне обследования. Отметим, что в случае сбора данных посредством почтовой рассылки опросных листов сейсмологи сами определяют желаемый перечень пунктов, с учетом их равномерного пространственного размещения в пределах зоны осязательности. Запрос по регулярной почте, как правило, имеет официальный характер, что позволяет рассчитывать на обратную связь. Соответственно, в случае использования традиционных методов сейсмологи обладают большим контролем над ситуацией.

Во-вторых, жители населенных пунктов, в которых землетрясение проявилось как слабое или очень слабое и не вызвало какого-либо ажиотажа, как правило, не имеют достаточной мотивации на заполнение интернет-опросника. В результате количество пунктов с оценками интенсивности сотрясений, характеризующимися низшими баллами (II, II—III и III), значительно снижается, что не позволяет уверенно оконтурить дальнюю зону и более детально оценить закономерности затухания колебаний с расстоянием.

В-третьих, онлайн-анкетирование чаще привлекает слои населения в возрастной категории 25—44 года, владеющие навыками обращения с мобильными устройствами, более интенсивно использующие мобильный интернет и проявляющие высокую активность в социальных сетях [Лухнева и др., 2023]. Наиболее остро эта проблема стоит в сельской местности, где значительная часть потенциальных респондентов остается неохваченной опросом как в ближней, так и в дальней зоне. В то же время полевое макросейсмическое обследование позволяет вовлечь в анкетирование более широкие слои общества, вне зависимости от возраста, благосостояния или уровня образованности.

Таким образом, основной проблемой онлайн-анкетирования населения юга Восточной Сибири, исходя из нашего опыта, является разная степень вовлеченности очевидцев землетрясения в процесс предоставления информации.

Жители крупных городов и пригородной зоны более часто мотивированы и более активно пользуются возможностью поделиться своими наблюдениями по сравнению с жителями сельской местности, особенно в отдаленных районах. Проблема усугубляется также крайне неравномерным размещением населенных пунктов в Южном Прибайкалье. Неравномерность распределения источников макросейсмических данных по площади заставляет нас рассматривать в качестве приоритетных задач подбор оптимальной пространственной конфигурации сети пунктов наблюдения, а также радикальное увеличение числа вовлеченных в сейсмологические исследования людей, готовых предоставлять свои данные на долгосрочной основе. Постоянная сеть должна охватывать потенциальных респондентов, проживающих как в эпицентральных областях возможных землетрясений, так и, что не менее важно, в дальней зоне. Более того, сеть постоянных респондентов должна включать как урбанизированные, так и сельские районы, при этом необходимо принимать во внимание важность получения наблюдений в зданиях различного типа и разных годов постройки. Все это в итоге должно способствовать повышению объективности оценок интенсивности сотрясений.

Беспрецедентно большой объем макросейсмических данных, собранных после Быстринского землетрясения 21.09.2020 г., открыл новые перспективы для макросейсмических исследований в Восточной Сибири. Некоторые проявления землетрясений оставались и продолжают оставаться вне сферы внимания сейсмологов, что негативно сказывается на полноте оценки последствий сильного сейсмического события. В частности, очень мало внимания уделялось реакции домашних или диких животных на сильное сейсмическое воздействие, причиной чему, очевидно, являлся недостаток информации. Однако резкое увеличение объема макросейсмических данных позволило сделать статистически представительные выводы о весьма острой реакции домашних животных на землетрясение, по крайней мере в пределах крупных городов [Радзиминович и др., 2021]. Другой аспект сейсмических проявлений, остающийся малоисследованным, связан с реакцией людей на сейсмическое воздействие и, что более важно, с долгосрочными социально-психологическими последствиями такого воздействия. Данные о Быстринском землетрясении, наряду с информацией о других сильных землетрясениях Южного Прибайкалья в 2020—2021 гг., позволили нам сделать первые

шаги в разработке этого направления исследований [Лухнева и др., 2022]. Еще одно перспективное направление заключается в зонировании территорий крупных городов по интенсивности сотрясений. Согласно сложившейся еще в начале XX века традиции, при анализе последствий сильных землетрясений Восточной Сибири интенсивность сотрясений оценивается для всей территории населенного пункта вне зависимости от его размера или численности населения. В случае большого города, такого, как, например, Иркутск, подобная практика представляется некорректной и, в целом, неприемлемой. Более целесообразным выглядит деление территории большого города на отдельные, меньшие по размерам районы (или микрорайоны), в которых оценка интенсивности должна быть выполнена для каждого района в отдельности [Радзиминович и др., 2022].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстринское землетрясение можно рассматривать как одно из наиболее значимых событий в сейсмической истории Южного Прибайкалья. Для такого утверждения есть несколько оснований, несмотря на то, что в регионе известны землетрясения с более высокой магнитудой и более разрушительными последствиями.

1. Землетрясение вызвало весьма широкий общественный резонанс, что, в свою очередь, заметно повысило интерес жителей региона к актуальной сейсмологической информации и создало предпосылки для обратной связи между обществом и сейсмологами.

2. В полной мере продемонстрирован потенциал онлайн-анкетирования населения на территории Южного Прибайкалья. С использованием этого метода собраны макросейсмические данные из 228 населенных пунктов, при том, что общее количество пунктов с установленной интенсивностью сотрясений составляет 263. Также, что не менее важно, выявлены некоторые ограничения и недостатки метода.

3. Собранные макросейсмические данные позволяют расширить диапазон эффектов землетрясений, на которые в будущем следует обращать более пристальное внимание. Среди них, прежде всего, влияние сейсмических воздействий на самочувствие людей, а также сильные акустические эффекты и реакция животных.

4. Быстринское землетрясение и особенности его проявления обозначили потенциал для развития некоторых новых для региона направлений

исследований. В частности, большой объем макросейсмических данных является основой для детального районирования территории крупных городов или городских агломераций с целью более точной оценки интенсивности сотрясений и выявления аномалий в распределении интенсивности по площади.

Таким образом, Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. представляется своеобразной вехой в сейсмологических и, особенно, в макросейсмических исследованиях в Восточной Сибири.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность двум анонимным рецензентам за внимательное ознакомление с рукописью и высказанные конструктивные и доброжелательные замечания, позволившие улучшить содержание статьи и благодарят за возможность использования данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранников В.Г., Татьков Г.И., Чебаков Г.И., Будаев Р.Ц., Новикова Л.С. Тункинское землетрясение 30 июня 1995 года на территории республики Бурятия и его последствия // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 3. С. 14–25.
- Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ($M_w = 5.5$) в Южном Прибайкалье: Предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 55–71. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-4>
- Голенецкий С.И. Еловское землетрясение 29 июня 1995 года ($M_S = 5.9$). Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М.: ГСРАН. 2001. С. 183–187.
- Голенецкий С.И. Сейсмичность района Тункинских впадин на юго-западном фланге Байкальского рифта в свете инструментальных наблюдений второй половины XX века // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 260–270.

- Добрынина А.А., Саньков В.А., Предеин П.А., Чечельницкий В.В., Тубанов Ц.А. Неоднородности поля затухания сейсмических волн на территории Южного Прибайкалья и Забайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2016. Т. 17. С. 46–63.
- Коновалов А.В., Степнов А.А., Богданов Е.С., Дмитриенко Р.Ю., Орлин И.Д., Сычев А.С., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Цой А.Т., Степнова Ю.А. Новые методы и технологии оперативной оценки сейсмических воздействий на примере о. Сахалин // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 3. С. 54–74. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.3-3>
- Коновалов А.В., Степнова Ю.А., Степнов А.А. Сильное землетрясение 05.02.2022 г. ($M_L 5.5$) вблизи нефтегазового месторождения на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 1. С. 60–75. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-1-60-75>
- Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–403.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 7. С. 1006–1017.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Саньков А.В., Бызов Л.М. Тектонические деформации и последующие сейсмические события юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS-измерений // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 58–63. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090139>
- Лухнева О.Ф., Киселева И.Н., Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В. Возникновение сенсорных aberrаций у жителей Восточной Сибири при повторяющихся сейсмических воздействиях // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 39–51. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-5>
- Лухнева О.Ф., Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Кадетова А.В. Использование современных коммуникационных технологий при землетрясениях: как повысить эффективность сбора макросейсмических данных // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 142–154. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.3-6>
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР. 1965. 11 с.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 42–62.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Середкина А.И. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: напряженно-деформированное состояние очаговой области по данным об афтершоках // Физика Земли. 2013. № 4. С. 120–134.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Масальский О.К., Чечельницкий В.В. Сейсмичность Байкальской рифтовой зоны за период цифровой регистрации землетрясений (2001–2006 гг.) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 40–55.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Параметры сеймотектонических деформаций земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 4. С. 543–545.
- Митюшкина С.В., Токарев А.В., Раевская А.А., Чеброва А.Ю. Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе Интернет-опросника. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. / В.Н. Чебров (ред.). Обнинск: ГС РАН. 2011. С. 376–380.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин (ред.). М.: Наука. 1977. 535 с.
- Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Скоркина А.А., Левина Е.А. Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2022. № 3. С. 37–55. <https://doi.org/10.31857/S000233372203005X>
- Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Радзиминович Н.А., Ружич В.В., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Эффекты Култукского землетрясения 27 августа 2008 года с $M_w = 6.3$ в ближней к эпицентру зоне: результаты макросейсмического обследования // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 56–71.
- Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф. Сейсмические воздействия и аномальное поведение животных: Пример Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. ($M_w = 5.5$) в Южном Прибайкалье // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 3. С. 61–75. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.3-4>
- Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Кадетова А.В., Гилева Н.А. Детальное макросейсмическое обследование и рациональный подход к оценке интенсивности сотрясений на территории крупного города (на примере последствий Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. в Иркутске) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 1. С. 34–51. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-3>
- Радзиминович Я.Б., Хритова М.А., Гилева Н.А. Современные способы получения макросейсмических данных и возможности их применения на территории Восточной Сибири // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 59–74. <https://doi.org/10.7868/S0203030614060066>
- Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 727–743. <https://doi.org/10.15372/GiG2021109>
- Середкина А.И., Гилева Н.А. Зависимость между моментной магнитудой и энергетическим классом для землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 29–38.

- Сорокин А.Г., Ключевский А.В. Инфразвуковые сигналы от землетрясений 5 декабря 2014 г. в акватории озера Хубсугул (Северная Монголия) // Докл. РАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 610–614. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845610-614>
- Сорокин А.Г., Ключевский А.В., Демьянович В.М. О генерации инфразвуковых сигналов при землетрясениях 5 декабря 2014 г. в акватории озера Хубсугул (Северная Монголия) // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 95–105. <https://doi.org/10.12737/szf-44201810>
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. Акустические эффекты сильных землетрясений // Физика Земли. 2021. № 1. С. 41–50. <https://doi.org/10.31857/S0002333721010099>
- Татевосян Р.Э., Плетнев К.Г., Бяков А.Ю., Шестопалов В.Л. Нижнекубанское землетрясение 9 ноября 2002 г.: результаты макросейсмического обследования // Физика Земли. 2003. № 11. С. 42–53.
- 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. <https://doi.org/10.21455/VIS2021.4-2>
- Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 5–20.
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 5. С. 23–37. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37>
- Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дроздин Д.В., Дрознина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Семенов С.Л., Серафимова Ю.К., Сергеев В.А., Ячук В.В. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и ее развитие: Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 28–49. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02>
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения поздне Палеогенового Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–947.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 7–22.
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 199–213. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191199-213>
- Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. Вып. 34. М.: ГЕОС. 2003. С. 57–200.
- Arrowsmith S.J., Burlacu R., Pankow K., Stump B., Stead R., Whitaker R., Hayward C. A seismoacoustic study of the 2011 January 3 Circleville earthquake // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. № 2. P. 1148–1158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05420.x>
- Bossu R., Landès M., Roussel F., Steed R., Mazet-Roux G., Martin S.S., Hough S. Thumbnail-based questionnaires for the rapid and efficient collection of macroseismic data from global earthquakes // Seismological Research Letters. 2017. V. 88. № 1. P. 72–81. <https://doi.org/10.1785/0220160120>
- Delouis B., Deverchere J., Melnikova V., Radziminovitch N., Loncke L., Larroque C., Ritz J.-F., San'kov V. A reappraisal of the 1950 (M_w 6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone // Terra Nova. 2002. V. 14. № 6. P. 491–500. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00445.x>
- Filippova A.I., Bukchin B.B., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Y.B., Gileva N.A. Source process of the September 21, 2020 M_w 5.6 Bystraya earthquake at the South-Eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // Tectonophysics. 2022. V. 822. 229162. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162>
- International Seismological Centre. 2023. On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Le Pichon A., Guilbert J., Vallée M., Dessa J.X., Ulziibat M. Infrasonic imaging of the Kunlun Mountains for the great 2001 China earthquake // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 15. 1814. <https://doi.org/10.1029/2003GL017581>
- Liu G., Qiao X., Yu P., Zhou Y., Zhao B., Xiong W. Rupture kinematics of the 11 January 2021 M_w 6.7 Hovsgol, Mongolia, earthquake and implications in the Western Baikal rift zone // Seismological Research Letters. 2021. V. 92. № 6. P. 3318–3326. <https://doi.org/10.1785/0220210061>
- Lukhnev A.V., Lukhneva O.F., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I. Coseismic effects of the 11 January 2021 Hovsgol, Mongolia, earthquake // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13. № 2s. 0626. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0626>
- Lunina O.V. The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. V. 7. № 3. P. 407–434. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>
- McCalpin J.P., Khromovskikh V.S. Holocene paleoseismicity of the Tunka fault, Baikal rift, Russia // Tectonics. 1995. V. 14. № 3. P. 594–605. <https://doi.org/10.1029/95TC00837>
- Pilger C., Gaebler P., Ceranna L., Pichon A.L., Vergoz J., Pertu A., Tailpied D., Taisne B. Infrasonic and seismoacoustic signatures of the 28 September 2018 Sulawesi super-shear earthquake // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2019. V. 19. № 12. P. 2811–2825. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2811-2019>
- Quitoriano V., Wald D.J. USGS “Did You Feel It?” – Science and lessons from 20 years of citizen science-based macroseismology // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. 120. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00120>

- Radziminovich Y.B., Gileva N.A., Tubanov T.A., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Tsydyanova L.R. The December 9, 2020, M_w 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022. V. 20. № 3. P. 1297–1324. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8>
- Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Seismological Research Letters*. 2007. V. 78. № 6. P. 579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>
- Ritz J.-F., Arzhannikova A., Vassallo R., Arzhannikov S., Larroque C., Michelot J.-L., Massault M. Characterizing the present-day activity of the Tunka and Sayan faults within their relay zone (Western Baikal rift system, Russia) // *Tectonics*. 2018. V. 37. № 5. P. 1376–1392. <https://doi.org/10.1002/2017TC004691>
- Saraò A., Tamaro A., Sandron D., Slejko D., Rebez A. On the crowdsourcing of macroseismic data to characterize geological settings // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023. V. 96. 103934. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103934>
- Sbarra P., Tosi P., De Rubeis V. Web-based macroseismic survey in Italy: Method validation and results // *Natural Hazards*. 2010. V. 54. № 2. P. 563–581. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9488-7>
- Shani-Kadmiel S., Averbuch G., Smets P., Assink J., Evers L. The 2010 Haiti earthquake revisited: An acoustic intensity map from remote atmospheric infrasound observations // *Earth and Planetary Science Letters*. 2021. V. 560. 116795. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116795>
- Shebalin N.V. Macroscopic data as information on source parameters of large earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1972. V. 6. № 4. P. 316–323. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(72\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90016-7)
- Smekalin O.P., Shchetnikov A.A., White D. Arshan palaeoseismic feature of the Tunka fault (Baikal rift zone, Russia) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 62. P. 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.011>
- Sylvander M., Mogos D.G. The sounds of small earthquakes: Quantitative results from a study of regional macroseismic bulletins // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005. V. 95. № 4. P. 1510–1515. <https://doi.org/10.1785/0120040197>
- Sylvander M., Ponsolles C., Benahmed S., Fels J.F. Seismo-acoustic recordings of small earthquakes in the Pyrenees: Experimental results // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2007. V. 97. № 1B. P. 294–304. <https://doi.org/10.1785/0120060009>
- Szanyi G., Grácz Z., Györi E. Macroscopic intensity data of the 22 April 2013 Tenk (Hungary) earthquake // *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2014. V. 49. № 3. P. 283–294. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0060-x>
- Tosi P., De Rubeis V., Tertulliani A., Gasparini C. Spatial patterns of earthquake sounds and seismic source geometry // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27. № 17. P. 2749–2752. <https://doi.org/10.1029/2000GL011377>
- Wald D.J., Quitoriano V., Worden C.B., Hopper M., Dewey J.W. USGS “Did You Feel It?” internet-based macroseismic intensity maps // *Annals of Geophysics*. 2011. V. 54. № 6. P. 688–707. <https://doi.org/10.4401/ag-5354>

The September 21, 2020 ($M_w = 5.6$) Bystraya Earthquake at the South-Western Flank of the Baikal Rift Zone: a Milestone in Macroseismology of Eastern Siberia

Ya. B. Radziminovich^{a,b,*}, A. V. Novopashina^c, O. F. Lukhneva^d,
N. A. Gileva^a, and E. A. Kuz'mina^d

^aBaikal Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 630033 Russia

^bInstitute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074 Russia

^dInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

*e-mail: yan.radziminovich@gmail.com

Received December 20, 2023

revised February 5, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – The article presents analysis of macroseismic data on the September 21, 2020 ($M_w = 5.6$) Bystraya earthquake, which occurred in the eastern part of the Tunka basins system on the southwestern flank of the Baikal rift zone. Macroscopic data were collected mainly through an Internet questionnaire posted on the website of the Baikal Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy Sciences. A total of 3013

eyewitness responses were collected, which is currently an unprecedented number in the entire history of macroseismic observations in the Baikal region. In total, we collected data for 263 Intensity Data Points. The maximal shaking intensity (VI–VII MSK-64) was observed in the Bystraya village and the Kultuk settlement. The shaking intensity V MSK-64 was noted at a distance of up to ~180 km; intensity IV MSK-64 was recorded at a distance of up to ~550 km. Analysis of data on the Bystraya earthquake revealed significantly lower attenuation compared to that expected from the regional macroseismic equation. Due to the large volume of macroseismic data collected, as well as the high efficiency of the data collection method used, the Bystraya earthquake can be considered an important milestone in macroseismic research in East Siberia.

Keywords: macroseismic data, earthquake, Internet questionnaire, Baikal rift zone, East Siberia