

БЫСТРИНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ПРИЗНАКИ ПОДГОТОВКИ И СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ

К.Ж. Семинский¹, С.А. Борняков^{1,2}, А.А. Добрынина^{1,3}, Н.А. Радзиминович^{1,4}, С.В. Рассказов^{1,2},
В.А. Саньков^{1,2}, П. Миалле⁵, А.А. Бобров¹, А.М. Ильясова¹, Д.В. Салко¹, А.В. Саньков¹,
А.К. Семинский¹, Е.П. Чебыкин^{1,6}, А.Н. Шагун¹, В.И. Герман^{1,7}, Ц.А. Тубанов³, М. Улзибат⁸

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

² Иркутский государственный университет, 664033, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

³ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

⁴ Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

⁵ Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, 1400, Vienna, Austria

⁶ Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

⁷ Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья,
660049, Красноярск, просп. Мира, 55, Россия

⁸ Институт астрономии и геофизики АНМ, 210620, Улан-Батор, п/я 152, Монголия

Представлены предварительные результаты изучения Быстринского землетрясения, которое произошло 21 сентября 2020 г. в Южном Прибайкалье и сопровождалось сотрясениями интенсивностью 6—7 баллов в эпицентральной области и 5 баллов в крупных городах юга Восточной Сибири — Иркутске, Ангарске, Усолье-Сибирском, Закаменске и др. Предварительная характеристика сейсмического события дана на основе комплексного анализа сейсмологических, структурно-тектонических, деформометрических, эманиционных и гидрогеохимических материалов, полученных в том числе в режиме мониторинга опасных геологических процессов на Байкальской природной территории. Установлены сейсмологические параметры Быстринского землетрясения, охарактеризованы сопровождающие явления, выделены эффекты, которые представляют интерес для дальнейших исследований в качестве предвестников сильных землетрясений в Прибайкалье. Результаты комплексного анализа позволяют предположить, что сейсмическое событие произошло в зоне Главного Саянского разлома при реализации взбросодвиговой подвижки по запад—северо-западному сместителю. Очаг землетрясения, по-видимому, располагался на небольшой глубине, о чем свидетельствуют длительность сотрясений, макросейсмические проявления и сильный гул, отмеченный в разных направлениях от эпицентра.

Афтершоки, механизм очага, предвестники, разломы, деформации породного массива, эманиции радона, режим подземных вод, Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье

THE BYSTRINSKOE EARTHQUAKE IN THE SOUTHERN BAIKAL REGION (21 SEPTEMBER, 2020, $M_w = 5.4$): MAIN PARAMETERS, PRECURSORS, AND ACCOMPANYING EFFECTS

K.Zh. Seminsky, S.A. Bornyakov, A.A. Dobrynina, N.A. Radziminovich, S.V. Rasskazov, V.A. San'kov,
P. Mialle, A.A. Bobrov, A.M. P'yasova, D.V. Salko, A.V. San'kov, A.K. Seminsky, E.P. Chebykin, A.N. Shagun,
V.I. German, Ts.A. Tubanov, M. Ulzibat

We present the preliminary results of a study of the Bystrinskoe earthquake, which occurred in the southern Baikal region on 21 September 2020 and was accompanied by shaking with an intensity of VI–VII on the MSK-64 scale in the epicentral area and with an intensity of V in large cities of southern East Siberia (Irkutsk, Angarsk, Ussolye-Sibirskoe, Zakamensk, etc.). A preliminary characteristic of the seismic event is given on the basis of a comprehensive analysis of seismological, structural-tectonic, strain, emanation, and hydrogeochemical data obtained during the monitoring of hazardous geologic processes in the Baikal natural territory. We have estimated the seismologic parameters of the Bystrinskoe earthquake, characterized the accompanying phenomena, and identified the effects that are of interest as probable precursors of future strong earthquakes in the Baikal region. The data obtained suggest that the earthquake occurred in the zone of the Main Sayan Fault as a

© К.Ж. Семинский✉, С.А. Борняков, А.А. Добрынина, Н.А. Радзиминович, С.В. Рассказов, В.А. Саньков, П. Миалле, А.А. Бобров, А.М. Ильясова, Д.В. Салко, А.В. Саньков, А.К. Семинский, Е.П. Чебыкин, А.Н. Шагун, В.И. Герман, Ц.А. Тубанов, М. Улзибат, 2021

✉e-mail: seminsky@crust.irk.ru

DOI: 10.15372/GiG2021109

result of strike-slip movement along the W–NW fault. The earthquake focus was apparently located at a shallow depth, as evidenced by the duration of the shocks, macroseismic manifestations, and the strong rumble heard at different directions from the epicenter.

Афтершоки, фокал механизм, прекурсоры, разломы, массивные деформации, радонная эмиссия, гидродинамика, Быстринское землетрясение в южной Байкальской области

ВВЕДЕНИЕ

Быстринское землетрясение 21 сентября 2020 г. с магнитудой 5.4 произошло в 18:04 по UTC; по местному времени это было 22 сентября 02 ч 4 мин. Эпицентр землетрясения находился в 20 км северо-западнее южной оконечности оз. Байкал в зоне влияния Главного Саянского разлома (ГСР) (рис. 1). ГСР характеризуется относительно невысокой сейсмической активностью за инструментальный период наблюдений. Наиболее сильными событиями последних лет здесь были толчки с $K_p = 13.6$ в 2005 и 2014 гг. Однако с данным разломом связывают землетрясение 1742 г. с $M = 7.8$ [Чипизубов, 2016], кроме того, в его юго-восточной части выявлено несколько палеосейсмодислокаций. Сейсмический потенциал разлома оценивается как $M_w = 7.3–8.0$ [Чипизубов, Смекалин, 1999; Саньков и др., 2004; Ritz et al., 2018; и др.].

Сотрясения при Быстринском землетрясении охватили значительную часть территории Прибайкалья и Забайкалья, разрушений и значительных повреждений зданий и сооружений в эпицентральной зоне не зафиксировано. Несмотря на относительно небольшую энергию, землетрясение предвлялось и сопровождалось многочисленными геодинамическими проявлениями: изменение режима подземных вод, сильный гул, аномальные изменения скорости накопления деформаций горных пород, изменения режима эмиссии радона и др. В настоящей работе приводится описание и предварительный анализ сейсмических параметров Быстринского землетрясения, его афтершоков, а также сопутствующих геодинамических эффектов.

ОБЩАЯ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Описываемое сейсмическое событие произошло на стыке двух крупных звеньев Байкальской рифтовой системы — ее центральной части (Байкальская впадина), и юго-западного фланга, представ-

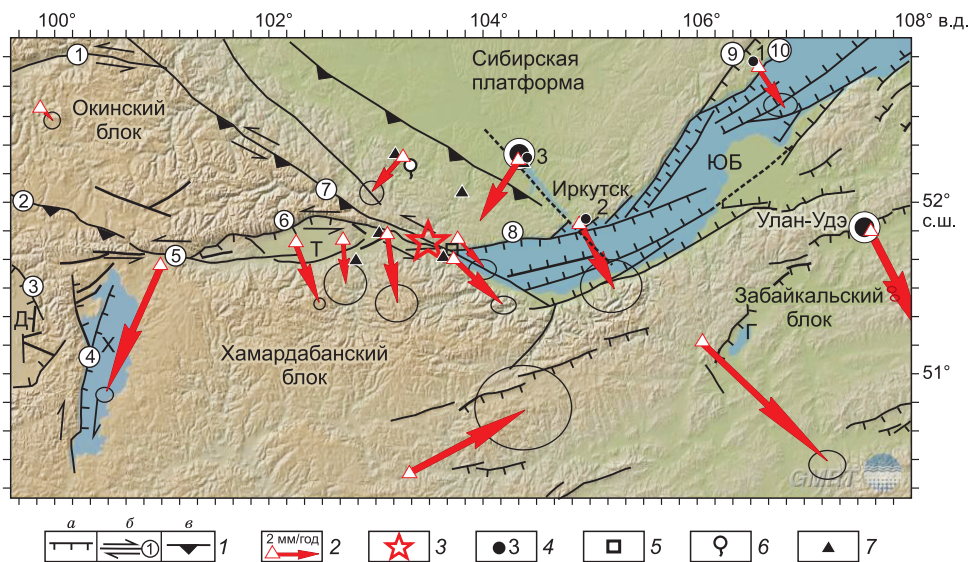


Рис. 1. Схема неотектонических структур южной части Байкальской рифтовой системы.

1 — активные разломы: а — сбросы, б — сдвиги, в — взбросы; 2 — векторы горизонтальных смещений земной поверхности по данным GPS измерений, по [Лухнев и др., 2010]; 3 — эпицентр Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. ($M_w = 5.4$); 4 — пункты измерения содержания радона в почве и воде (1 — Тырган, 2 — Листвянка, 3 — Иркутск); 5 — участок гидрогеохимического и деформометрического мониторинга; б — участок изменения гидрогеологического режима; 7 — временные сейсмические станции. Буквами обозначены впадины: X — Хубсугульская, Д — Дархатская, Т — Тункинская, ЮБ — Южно-Байкальская, Г — Гусиноозерская. Цифрами в кружках обозначены главные активные разломы: 1 — Жомболокский, 2 — Южно-Окинский, 3 — Дархатский, 4 — Хубсугульский, 5 — Байкало-Мондинский, 6 — Тункинский, 7 — Главный Саянский, 8 — Обручевский, 9 — Приморский, 10 — Морской. Штриховыми линиями обозначены предполагаемые разломы.

ленного субширотной цепью Тункинских впадин (см. рис. 1). Этот участок является узлом взаимодействия трех крупных рифтообразующих разломов — Обручевского, Тункинского и Главного Саянского, перемещения по которым обеспечивают смену режима деструкции коры от преимущественно растяжения в Байкальской впадине к преимущественно сдвигу на широтном отрезке юго-западного фланга рифтовой системы. Трансфер деформаций осуществляется по зоне Главного Саянского разлома.

В прошлые геологические эпохи ГСР являлся границей между Сибирской платформой и рядом разновозрастных террейнов, причленившихся к ней в раннем палеозое [Зорин и др., 1993]. Ширина зоны тектонически переработанных пород (бластомилониты, милониты) в юго-восточном сегменте разлома достигает 600—800 м. Плоскости сместителей отдельных разрывов в зоне разлома падают под углами 45—70° по аз. 190—210°. Юго-восточный сегмент Главного Саянского разлома длиной около 60—70 км неоднократно активизировался в голоцене, здесь А.В. Чипизубовым выделена Восточно-Саянская палеосейсмодислокация [Чипизубов, Смекалин, 1999]. С активностью данного разлома также связывают землетрясение 1742 г. с $M = 7.8$ [Чипизубов, 2016].

Эпицентр Быстринского землетрясения приурочен к Торско-Быстринской междувпадинной кристаллической перемычке, которая располагается на участке сочленения магистральных сместителей Главного Саянского и Тункинского разломов, простирающихся здесь параллельно друг другу (см. рис. 1). Согласно геолого-структурным [Шерман и др., 1973; San'kov et al., 1997; Парфеевец, Саньков, 2006], морфотектоническим и палеосейсмологическим [Ламакин, 1968; Чипизубов, Смекалин, 1999; Ritz et al., 2018] данным, Главный Саянский разлом является левосторонним сдвигом с небольшой взбросовой компонентой. Основываясь на возрасте двух последних палеоземлетрясений и амплитуде косейсмических смещений, авторы работы [Саньков и др., 2004] оценили скорость левосторонних смещений по юго-восточному сегменту Главного Саянского разлома в позднем голоцене в 3.1 ± 1.2 мм/год. Средний период повторяемости для пяти палеоземлетрясений, согласно [Чипизубов, Смекалин, 1999; Смекалин, 2008], оценивался порядка 2 тыс. лет. Используя датировки из работ [Чипизубов, Смекалин, 1999; Смекалин, 2008], а также собственные данные, Ж.-Ф. Ритц с соавторами [Ritz et al., 2018] оценили скорость левосторонних горизонтальных смещений по Главному Саянскому разлому за последние 15 тыс. лет в интервале 1.3—3.9 мм/год. При этом они выделили четыре разрывообразующих палеоземлетрясения за 15 тыс. лет со средним периодом повторяемости около 4 тыс. лет.

По данным измерений методом GPS геодезии скорость левосторонних горизонтальных движений Сибирской платформы относительно Хамардабанского блока оценивается значениями от 3.0 мм/год [Саньков и др., 2004] до 1.4 мм/год [Лухнев и др., 2014] (см. рис. 1). При этом отмечается, что в течение нескольких лет до Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M_w = 6.3$) Главный Саянский разлом в районе южной оконечности оз. Байкал был заперт: по данным измерений в ближней зоне смещений по нему не происходило [Саньков и др., 2004]. Поле горизонтальных деформаций Култукско-Быстринской междувпадинной перемычки характеризовалось примерным равенством значений относительного СЗ-ЮВ удлинения и укорочения, ориентированного в направлении ЮЗ-СВ [Лухнев и др., 2010].

Таким образом, исследуемый участок земной коры при ключевой позиции в структуре Байкальской рифтовой системы отличается сравнительно низким уровнем современной активности, что позволяет рассматривать его в качестве области накопления напряжений, разрядка которых при неблагоприятном сценарии может привести к землетрясению, более сильному, чем Култукское ($M_w = 6.3$), и описываемое здесь Быстринское ($M_w = 5.4$).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика Быстринского землетрясения представлена ниже на основе анализа сейсмологических, деформометрических, эманационных и гидрогеохимических материалов, большая часть которых была получена в результате мониторинга опасных геологических процессов, который организован Институтом земной коры СО РАН на Байкальской природной территории.

Сейсмологические данные. Быстринское землетрясение вызвало 5-балльные сотрясения в г. Иркутск, расположенном в 80 км от эпицентра. Через 15 мин произошел сильнейший афтершок, ощущавшийся в областном центре на 4 балла. Наибольшие сотрясения (6—7 баллов) ощутили жители населенных пунктов — Быстрое, Тибельти, Анчук, Култук, Слюдянка и др., расположенных в непосредственной близости от эпицентра [Байкальский филиал..., 2020а].

Несмотря на относительно невысокое значение магнитуды, землетрясение вызвало всеобщую реакцию местного населения, поскольку оно произошло ночью, когда большинство людей находились в состоянии покоя и могли в полной мере ощутить отчетливый гул, предвещающий и сопровождающий сотрясения, которые отличались необычно большой длительностью — порядка 30—40 с, по данным Байкальского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (персональное сообщение заместителя директора филиала, к.г.-м.н. В.В. Чечельницкого). Основной реакцией населения был сильный испуг,



Рис. 2. Макросейсмические эффекты в эпицентральной зоне Быстринского землетрясения:

а, б — осыпи в стенках карьеров (пос. Култук); *в, з* — повреждения печей (пос. Култук, дер. Анчук). Фото Н.А. Радзиминович.

многие жители покидали свои дома. Разрушений зданий не было зафиксировано, но обследование показало, что в населенных пунктах Култук, Тибельти, Быстрое, Анчук были единичные разрушения печных труб, появились трещины в печах и в штукатурке, отмечалось раскачивание мебели, падение мелких предметов с полок и т. д. На крутых склонах в плейстоценовой области отмечены осыпи и обвалы (рис. 2).

Район локализации Быстринского землетрясения — Култукско-Быстринская междупадинная перемычка и зона Главного Саянского разлома — характеризуется невысокой сейсмической активностью за инструментальный период сейсмологических наблюдений (с 1950 г.) (рис. 3). Наиболее сильными событиями последних лет здесь были толчки с $K_p = 13.6$ в 2005 и 2014 гг. Фактически этот район может рассматриваться как «сейсмическая брешь» в эпицентральной поле юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы (см. рис. 3, *а*).

Механизмы очага Быстринского землетрясения, полученные разными сейсмологическими агентствами по моделированию объемных и поверхностных волн, согласуются между собой (таблица). Все они показывают сдвиговые подвижки по плоскостям субмеридионального простирания (правостороннее смещение) и запад—северо-западного простирания (левостороннее смещение). Смещение по вертикали незначительно, в решении USGS оно определяется как сбросовое, в остальных решениях (GCMТ, Geofone) — как взбросовое; однако такое расхождение допустимо, поскольку нодальные плоскости практически вертикальны (см. таблицу).

Схожий механизм получен в ИЗК СО РАН по знакам первых вступлений на станциях Монгольской национальной сети, Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Центра реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края и по данным удаленных станций мировой сети (см. таблицу). Землетрясение, вероятно, было вызвано левосторонней сдвиговой подвижкой по плоскости СЗ простирания с падением на юг под углом 68° . Ось сжатия в очаге горизонтальна и ориентирована СВ-ЮЗ, ось растяжения наклонена (23°) и ориентирована СЗ-ЮВ. Механизм очага сильнейшего афтершока показал, что он был также вызван левым сдвигом, но с чуть большим вкладом взбросовой компоненты (см. таблицу). Эти решения согласуются с известной кинематикой Главного Саянского разлома. По данным полевых исследований крупные сместители зоны разлома имеют падение на юг—юго-запад под углом около 65° . Инструментально определенный эпицентр располагается в 4.3 км от выхода главного сместителя на земную поверхность и проецируется на нее на глубине около 10.0 км.

Оценки моментной магнитуды M_w по данным разных агентств варьируют от 5.4 до 5.6. По записям станций Монгольской национальной сети, Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Центра реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края и мировых сетей с использованием модели Дж. Брюна [Brune, 1970] были оценены очаговые параметры Быстринского землетрясения и его сильнейшего афтершока: сейсмический момент, моментная магнитуда, геометрические размеры источника, сброшенные напряжения и амплитуда смещений в очаге. При расчетах использовалась стандартная методика определения очаговых параметров по спектру землетрясения, адаптированная для Байкальской рифтовой системы [Добрынина, 2009], и региональные характеристики затухания сейсмических волн [Dobrynina et al., 2016].

Энергия основного толчка оценивается в $2.28 \cdot 10^{17}$ Н·м (по *S*-волнам) и в $6.05 \cdot 10^{16}$ Н·м (по *P*-волнам), моментная магнитуда равна 5.4, размеры очага составляют 2.10×0.68 км, смещение в очаге 8 см, величина сброшенного напряжения $3.55 \cdot 10^6$ Па. Для сильнейшего афтершока получены значения сейсмического момента $2.05 \cdot 10^{15}$ Н·м (по *S*-волнам), магнитуда $M_w = 4.1$, очаговая область имеет размеры 0.87×0.29 км, значения сброшенных напряжений $1.27 \cdot 10^6$ Па.

После землетрясения с 22 сентября по 13 октября в окрестностях эпицентра была выставлена временная сеть сейсмических станций ИЗК СО РАН, состоящая из четырех пунктов (см. рис. 3, б): ZMU (пос. Зун-Мурино, с 09:30 UTC, координаты: 51.721417° с.ш., 102.893306° в.д.), TORU (пос. Торы, с 10:50 UTC, координаты: 51.814806° с.ш., 103.072444° в.д.), KHD (дер. Ходарей, с 13:00 UTC, координаты: 52.263127° с.ш., 103.213807°), SHM (дер. Шаманка, с 09:00 UTC, координаты: 52.069585° с.ш., 103.825829° в.д.). Пятая станция была установлена ранее в штольне на стационаре Талая в рамках программы деформационно-сейсмического мониторинга (TLY, 51.681° с.ш., 103.644° в.д.) и зарегистрировала как само Быстринское землетрясение, так и его форшоки и афтершоки.

Быстринское землетрясение предвлялось шестью форшоками, сильнейшие из которых с энергетическим классом $K = 5.1$ произошли 9 и 18 сентября (см. рис. 3, б). Для локализации использовались записи станции TLY: по амплитудам и полярности первых вступлений определялся азимут прихода волны на сейсмическую станцию, по разнице времен прихода продольных *P*- и поперечных *S*-волн — эпицентральное расстояние. Для верификации определений координат эпицентров дополнительно были определены положения эпицентров Быстринского землетрясения и его сильнейшего афтершока и сопоставлены с данными, полученными Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН по записям региональной сети станций (см. рис. 3, б). Разница в определении положений эпицентров составила около 5 км, что показывает удовлетворительное определение положение эпицентра по данным одной станции.

За три недели после землетрясения было зарегистрировано 25 афтершоков с энергетическими классами $K = 3.1$ —13.1, сильнейший из которых случился через 15 мин после главного толчка. Максимальное количество афтершоков (16 штук) произошло в первые сутки после главного события. Афтершоки локализуются на площади 7×10 км вблизи инструментально определенных эпицентров главного толчка и первого афтершока в пределах Култукско-Быстринской междувпадинной перемычки и тяготеют к зоне Главного Саянского разлома (см. рис. 3, б).

Во многих пунктах во время землетрясения наблюдателями фиксировался сильный гул, что позволило предположить наличие интенсивных акустических волн, излучаемых источниками в районе эпицентра. Генерация инфразвуковых волн при землетрясениях происходит вследствие резких вертикальных смещений земной поверхности (со скоростями больше скорости звука в атмосфере), что может быть вызвано как непосредственно смещением горных пород в эпицентральной области при подвижке в очаге (эпицентральный сигнал), так и взаимодействием сейсмических волн с рельефом региона (вторичный источник) [Le Pichon et al., 2003; Mutschlecner, Whitaker, 2005; Che et al., 2013]. Ближайшая к эпицентру землетрясения инфразвуковая станция расположена на расстоянии 500 км в Монголии (I34MN, рис. 4). Сеть I34MN состоит из четырех микробарометров, расположенных треугольником с апертурой 3 км, четвертый датчик находится в центре треугольника. Взаимное расположение датчиков позволяет проводить оценку скорости прихода акустической волны и расстояния до источника возмущений по разности времени прихода сигнала на разные датчики и ее азимут по пиковым амплитудам сигнала.

Параметры очага Быстринского землетрясения и его сильнейшего афтершока

Агентство	<i>H</i> , км	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}$, Н·м	STK	DIP	SLIP
				град.		
Главный толчок 21.09.2020, 18:04:57, $K_p = 14.5$						
USGS	12	5.4*	1.696	282	87	-5
GCMT	26	5.5	2.58	102	86	7
Geofone	19	5.4	1.6	288	72	6
ИЗК СО РАН	—	5.4	2.28	107	68	11
Афтершок 21.09.2020, 18:19:55, $K_p = 13.1$						
ИЗК СО РАН	—	4.1	0.0205	104	85	40

Примечание. *H* — глубина; M_w — моментная магнитуда; M_0 — сейсмический момент; STK — простирание нодальной плоскости; DIP — угол падения плоскости; SLIP — угол подвижки; K_p — энергетический класс по номограмме Т.Г. Раутиан, приведенный по оперативному каталогу Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

* Моментная магнитуда по объемным волнам (M_{wb}).

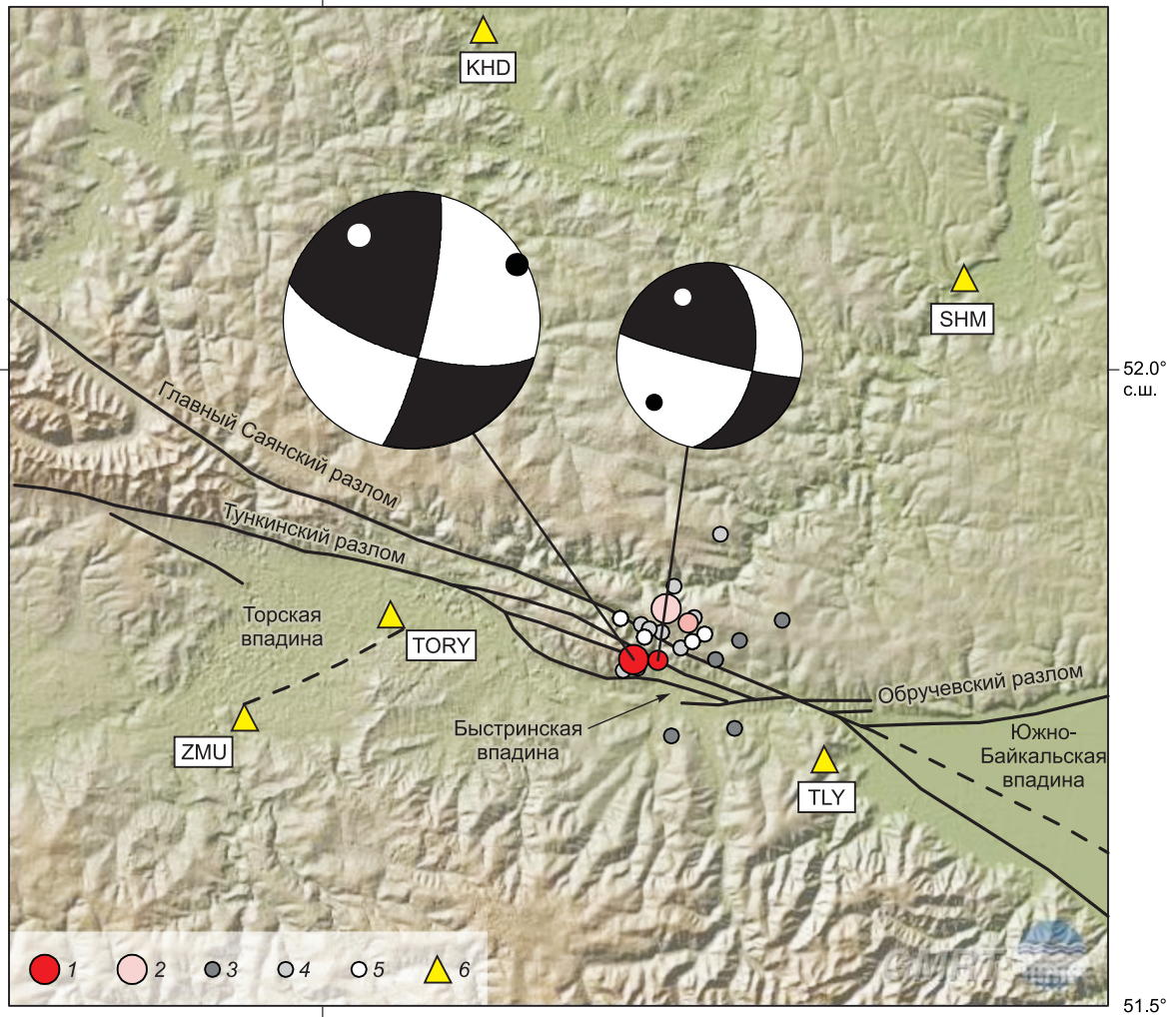
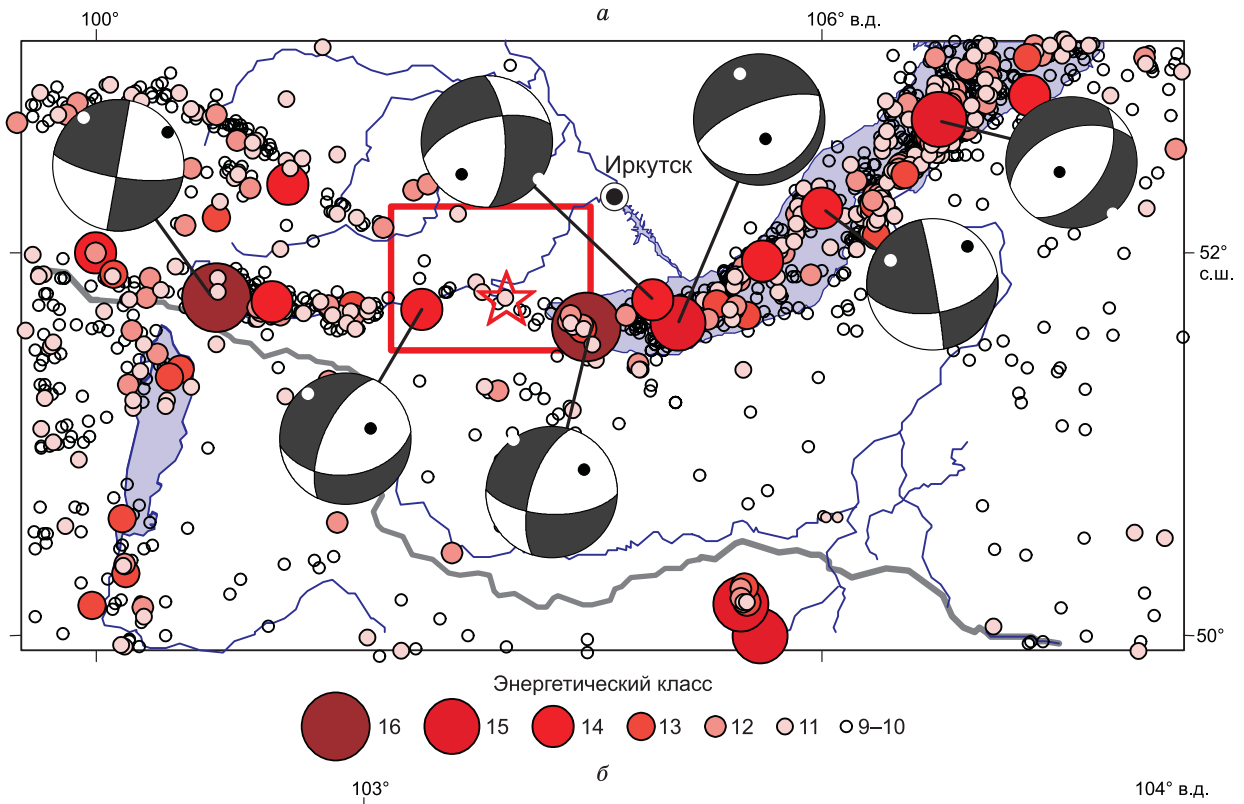


Рис. 3. Сейсмологическая характеристика и положение эпицентра Быстринского землетрясения 21 сентября 2020 г.

а — сейсмичность юго-западного фланга БРС за 1950–2019 гг., модифицированная карта сейсмичности из работы [Сейсмоионосферные..., 2012], эпицентры за период с 2012 по 2019 г., по данным [Байкальский филиал..., 2020а]. Для наиболее сильных землетрясений показаны фокальные механизмы (проекция нижней полусферы) [Doser, 1991; Солоненко и др., 1993; Мельникова, Радзиминович, 1998; Мельникова и др., 2014]. Прямоугольником выделен район локализации Быстринского землетрясения, эпицентр землетрясения показан красной звездочкой. *б* — положение Быстринского землетрясения, его форшоков и афтершоков: 1 — положение эпицентров главного толчка и сильнейшего афтершока по данным региональной сети БФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 — положение эпицентров главного толчка и сильнейшего афтершока по данным ст. Талая (штольня); 3 — форшоки; 4 — афтершоки по данным станции Талая (штольня); 5 — афтершоки по данным временной сети станций ИЗК СО РАН; 6 — пункты, пояснения см. в тексте. Показаны механизмы очагов главного толчка (в 18:04 UTC) и сильнейшего афтершока (в 18:19 UTC) по знакам первых вступлений (проекция нижней полусферы).

Барограмма, записанная инфразвуковой станцией I34MN, приведена на рис. 4, *а*. На барограмме отчетливо проявляются акустические волны, связанные с эпицентрными сигналами от главного толчка и афтершока, а также от вторичных источников, локализованных в горном обрамлении Южно-Байкальской и Быстринской впадин на общей площади 1200 км². На рисунках 4, *б* и *в* показаны азимутальная и скоростная развертки барограммы. Скорость эпицентральной инфразвуковой волны составляет ~0.45 км/с, скорость звука от вторичных источников колеблется в пределах 0.30–0.35 км/с. Появление вторичных источников акустических волн вызвано колебаниями горного обрамления впадин при прохождении сейсмических волн. Подобные сейсмоакустические эффекты с появлением вторичных источников инфразвуковых колебаний наблюдались ранее в этом регионе при Хубсугульском землетрясении 5 декабря 2014 г. [Добрынина и др., 2017; Dobrynina et al., 2018].

Наблюдаемая длительность сотрясений, макросейсмические проявления, сильный гул, отмеченный в разных направлениях от эпицентра, и локализация вторичных источников инфразвуковых колебаний в окрестностях эпицентра позволяют сделать предположение о приповерхностном положении очага Быстринского землетрясения. Вместе с наблюдаемой высокой степенью идентичности волновых форм афтершоков и основного толчка можно допустить, что разрыв произошел по сместителю хорошо проработанного разлома. Учитывая положение одной из нодальных плоскостей, такой разрывной структурой мог быть Главный Саянский разлом.

Деформометрические данные. Деформационный мониторинг проводится инструментальным комплексом авторской разработки в штольне, расположенной на территории сейсмостанции Талая БФ ФГУН ЕГС РАН, расположенной в 20 км по прямой от эпицентра Быстринского землетрясения (см. рис. 1, 3). Комплекс включает в себя прибор-регистратор (ПР), аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и штанговые датчики, измерительным элементом которых являются тензодатчики балочного типа. Его технические детали подробно описаны в [Салко, Борняков, 2014]. Измерения деформаций горных пород осуществляются пространственной сетью из девяти горизонтальных штанговых датчиков с базой 6 м, установленных на полу штольни в двух ортогональных направлениях (СВ 60° и ЮВ 150°) и одного вертикального датчика с базой 1.8 м (рис. 5). АЦП осуществляют опрос датчиков с частотой 8 Гц с 10-секундными интервалами. Накопленные за 10 с 80 измерений усредняются, и среднее значение отправляется на ПР. Последний каждые 40 с передает данные на базовый сервер в ИЗК СО РАН (г. Иркутск).

За шесть дней до землетрясения восемь датчиков из десяти зарегистрировали изменение скорости накопления деформаций горных пород. Наиболее отчетливо аномальные изменения в деформационном процессе проявились на датчиках 1, 4 и 8, ориентированных на очаговую область. Для примера на рис. 6 приведен временной ряд деформаций, зарегистрированных датчиком 8 за период с 5 сентября по 2 октября 2020 г. Из графика видно, что с 5 по 16 сентября деформации на фоне 12-часовых осцилляций, обусловленных лунно-солнечными приливами, в целом уменьшились на 5 мкм. С 16 сентября снижение деформаций сменилось их ростом. При этом по мере приближения к моменту землетрясения деформационный процесс развивался с ускорением, что следует из графика посуточного приращения деформации удлинения (см. рис. 6, врезка). После землетрясения деформации снова стали уменьшаться с постепенным их выходом на фоновые значения (см. рис. 6).

Результаты деформометрического мониторинга рассматривались с позиции модели прерывистого скольжения («stick-slip model»), описывающей эпизодические сейсмогенные смещения по уже существующему разлому [Brace, Byerlee, 1966]. Разными исследователями предпринимались многочисленные попытки ее экспериментального воспроизведения для выяснения физических закономерностей импульсных смещений на сейсмоактивных разломах в природе. Существенному прогрессу в этом направлении способствовало развитие синергетики [Haken, 1977; Kondepudi, Prigozhin, 1998]. С позиции синергетической интерпретации землетрясение стало рассматриваться как самоорганизованная критичность (СОК) [Bak, Tang, 1989] с кратковременной самоорганизацией деформационного процесса непо-

средственно перед сейсмической активизацией разлома [Feder, Feder, 1991; Olami et al., 1992; Ciliberto, Laroche, 1994]. Эта модель получила развитие в экспериментах по моделированию сейсмической активизации разломов по механизму «stick-slip» посредством нагруженной системы из двух блоков [Ma et al., 2012, 2014]. Благодаря высокоточной регистрации деформаций в модели и сопровождающей ее акустической эмиссии было показано стадийное развитие деформационного процесса в критическом состоянии системы перед импульсной подвижкой. Первая метастабильная стадия имеет место при достижении пикового значения приложенной к системе нагрузки. Ее переход во вторую, метанестабильную

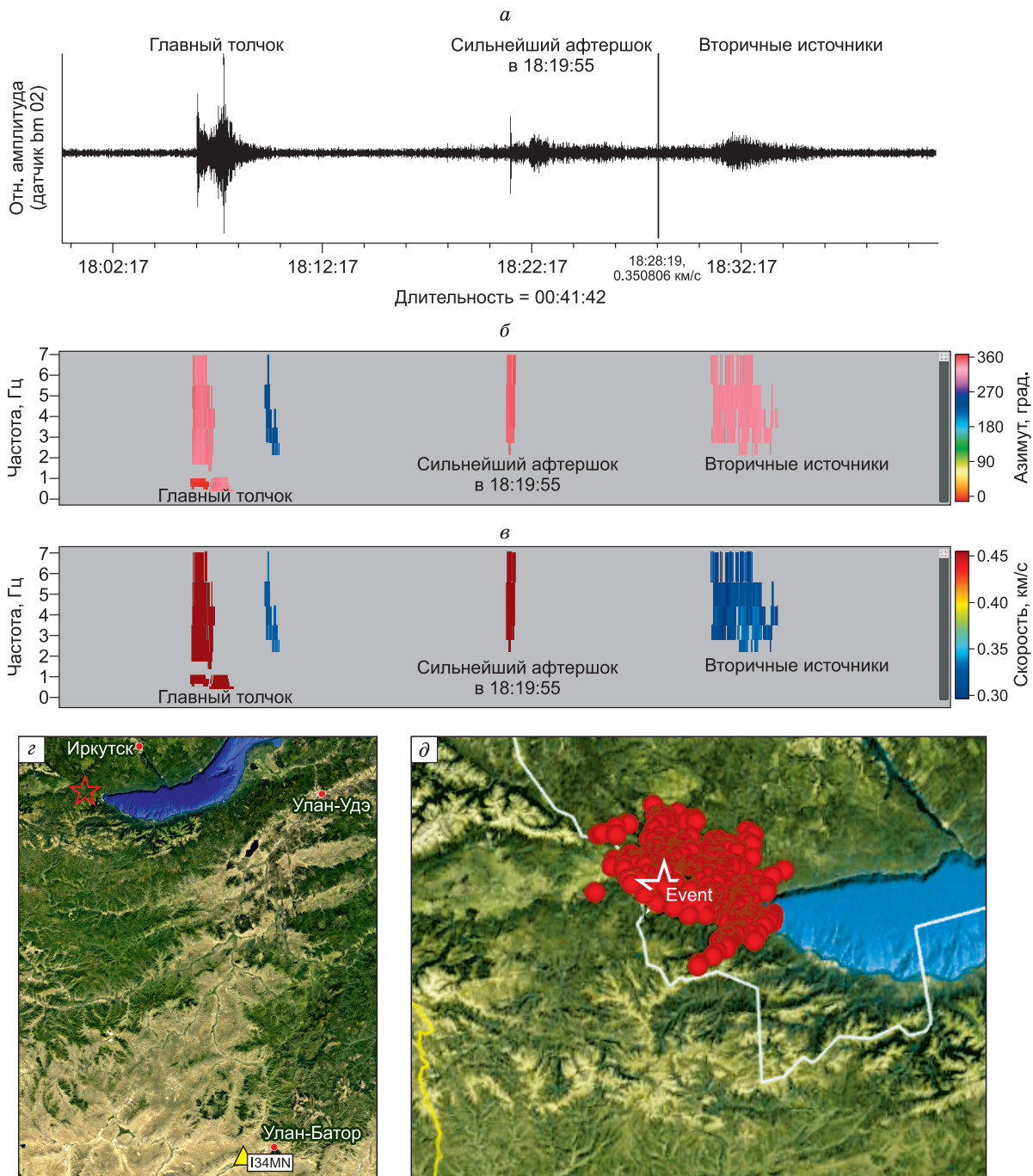
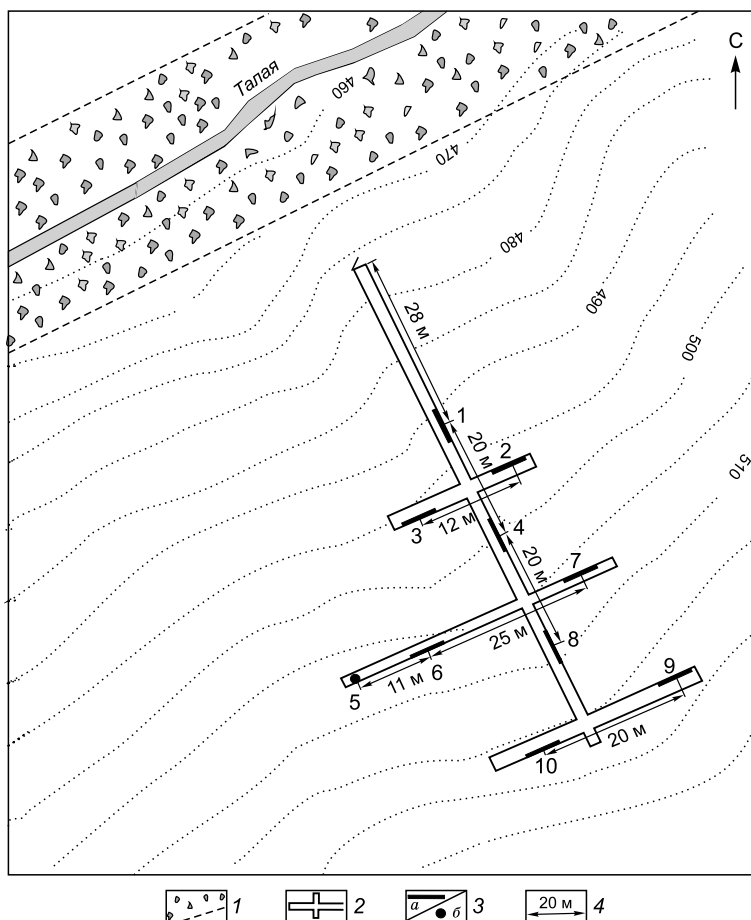


Рис. 4. Инфразвуковые эффекты Быстринского землетрясения и его афтершока, зафиксированные на инфразвуковой станции I34MN, Монголия (500 км от эпицентра).

a — барограмма событий, зарегистрированная датчиком bm02 (относительные амплитуды), *б* — азимутальная, *в* — скоростная развертка акустического сигнала, *г* — взаимное положение эпицентра Быстринского землетрясения и инфразвуковой станции, *д* — положение вторичных источников инфразвуковых колебаний.

Рис. 5. Схема расположения штанговых датчиков в штольне.

1 — зона разлома; 2 — контуры штольни; 3 — штанговые датчики (и их номера); а — горизонтальные, б — вертикальный; 4 — расстояние между датчиками. Пунктиром показаны изогибсы рельефа (м).



стадию начинается с первичным падением напряжений за счет активизации отдельных небольших сегментов разлома. Эта стадия по динамике развития деформационного процесса подразделяется на подстадии ранней и поздней метанестабильности. В первую подстадию происходит медленный спад напряжений за счет постепенного увеличения изолированных микроочагов активизации очагов деформации на плоскости разрыва. Во вторую подстадию, именуемую также подстадией ускоренного синергизма, реализация деформаций нарастает и ускоряется. Синергизм проявляется в тот момент, когда квазистатическое состояние трансформируется в квазидинамическое благодаря кооперативному взаимодействию активизированных сегментов разлома. Изолированные взаимодействующие сегменты разлома начинают объединяться, что соответствует критическому предсейсмогенному состоянию разлома [Ma et al., 2012, 2014].

Описываемое Быстринское землетрясение реализовано по модели «stick-slip»: динамика развития предшествующего ему шестидневного деформационного процесса, зарегистрированного в пункте мониторинга Талая, полностью укладывается в описанные представления о ранней и поздней метанестабильности в заключительную метанестабильную стадию эволюции очага землетрясения. Деформационный процесс в первую подстадию развивался (с 16 по 20 сентября) с медленным ускорением и существенно ускорился во вторую подстадию (20 сентября) с кратковременным замедлением непосредственно перед главным толчком, произошедшим 21 сентября (см. рис. 6).

Таким образом, в представленных результатах деформационного мониторинга отчетливо проявились признаки заключительной метанестабильной стадии подготовки Быстринского землетрясения, выражающиеся в характерной и закономерной динамике развития деформационного процесса. Развитие аномальных деформаций по определенному сценарию в рамках ранней и поздней метанестабильности может рассматриваться как краткосрочный предвестник приближающегося сильного сейсмического события.

Эманационные данные. Как известно, колебания эманационного поля во времени отражают изменения напряженно-деформированного состояния породного массива. Это является причиной проведения мониторинга радона (Rn) в почвенном воздухе [Козлова, Юрков, 2005; Уткин и др., 2006] или в подземных водах [King et al., 1991; Kuo, 2014] с целью поиска предвестников сильных землетрясений. На территории Байкальского региона мониторинговые исследования, направленные на изучение общих закономерностей флуктуаций радонового поля в почвенном воздухе, были начаты в 2010 г. [Семинский, Бобров, 2013], а в подземных водах — в 2012 г. [Семинский, Семинский, 2016].

Эманационные мониторинговые исследования объемной активности радона в почве (Q , Бк/м³) проводятся скважинным прибором «ВМС-2», который осуществляет замеры с периодичностью 1 ч. Датчик «ВМС-2» характеризуется чувствительностью 50 Бк/м³. Каждая проба сопровождается записью информации о дате и времени измерения, а также атмосферном давлении и температуре воздуха. Чтобы исключить влияние сезонных изменений атмосферных параметров, каждый из приборов помещался в перфорированную трубу на глубину ≈ 3 м. Круглогодичные измерения активности почвенного радона

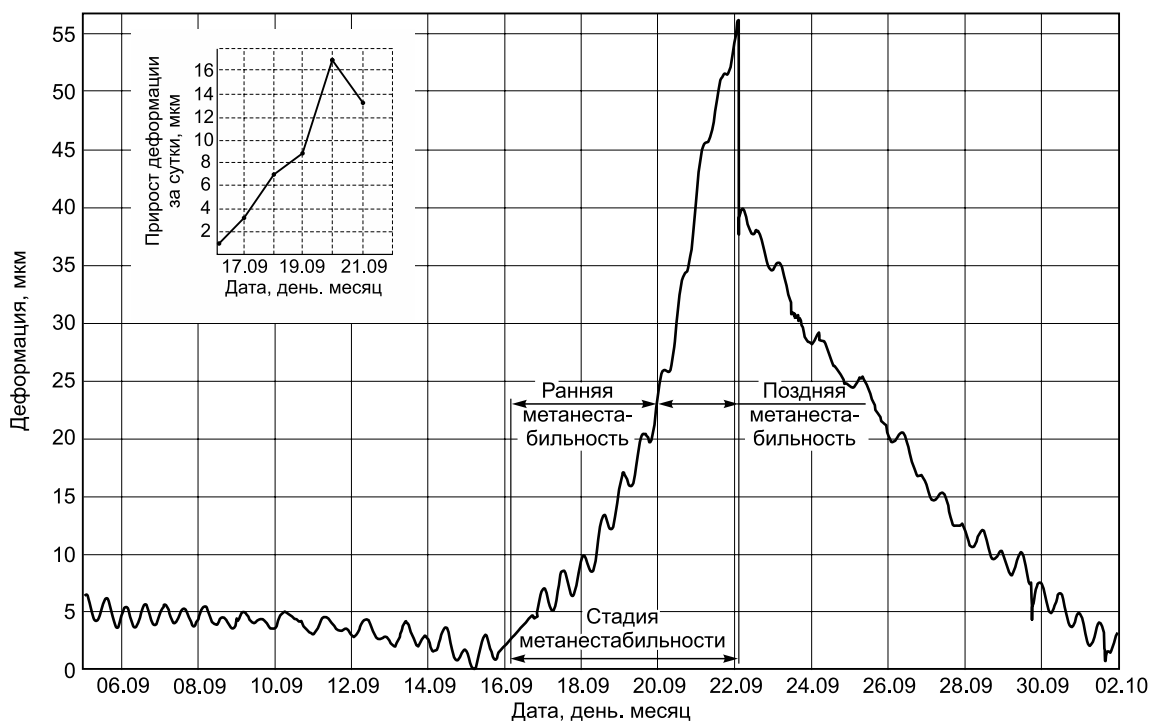


Рис. 6. График деформаций, зарегистрированных штанговым датчиком 8 с 5 сентября по 2 октября 2020 г. в штольне сейсмостанции Талая.

На врезке — график посуточного прироста деформаций с 16 по 22 сентября 2020 г.

проводились на двух станциях — Тырган и Листвянка, располагающихся в Юго-Западном Прибайкалье (см. рис. 1).

На мониторинговой станции Листвянка примерно за три недели до момента главного толчка Быстринского землетрясения имело место нарушение обратной зависимости между концентрацией радона в почве и атмосферным давлением (рис. 7, б), которая типична для сравнительно стабильных периодов тектонического развития региона. Согласно данным предшествовавших исследований [Zmazek et al., 2003; Семинский, Бобров, 2013], это может рассматриваться как предвестниковый признак готовящегося сейсмического события. Кроме того, за ≈ 10 дней до землетрясения произошло изменение характера флуктуаций: объемная активность радона за короткие промежутки времени скачкообразно менялась практически на порядок с ≈ 1000 до ≈ 10000 Бк/м³. Минимальное и максимальное значения за этот период времени составили соответственно 568 и 15118 Бк/м³. Через неделю после момента землетрясения радоновая активность снизилась до минимума (≈ 1000 Бк/м³), причем наблюдаемые колебания на графике вариаций радона практически полностью исчезли.

На мониторинговой станции Тырган Быстринскому землетрясению соответствует начало резкого снижения объемной активности почвенного радона (см. рис. 7, в), которая затем проходит глубокий минимум и через ≈ 85 ч достигает максимума 38533 Бк/м³. Эта величина явно связана с изучаемым сейсмическим событием, так как за последние полтора года является самой высокой из абсолютных значений Q , наблюдаемых в данном пункте мониторинга. Возвращаясь к предыдущей станции, следует отметить, что и здесь примерно в тот же временной интервал (серый цвет на рис. 7, б) имеет место аналогичное по основному тренду изменение параметра Q . Однако переход значений от одного максимума (момент землетрясения) через минимум к другому максимуму завуалирован промежуточными экстремумами, которые, как было отмечено выше, характерны для всего 10-дневного отрезка времени, предшествовавшего главному сейсмическому событию.

Сеть опробования на предмет изучения вариаций концентрации радона (Q , Бк/л) в подземных водах включала восемь источников, расположенных на территориях Южного Приангарья (г. Иркутск и правобережье Иркутского водохранилища). Эти водоупункты соответствуют следующим требованиям, предъявляемым к мониторинговым исследованиям: 1) $16 \leq Q \leq 99$ Бк/л; 2) свободный режим водообмена и малый доступ атмосферных газов к подземным водам; 3) круглогодичное функционирование; 4) приуроченность к бортам долин разломного происхождения. Отбор проб производился один раз в две

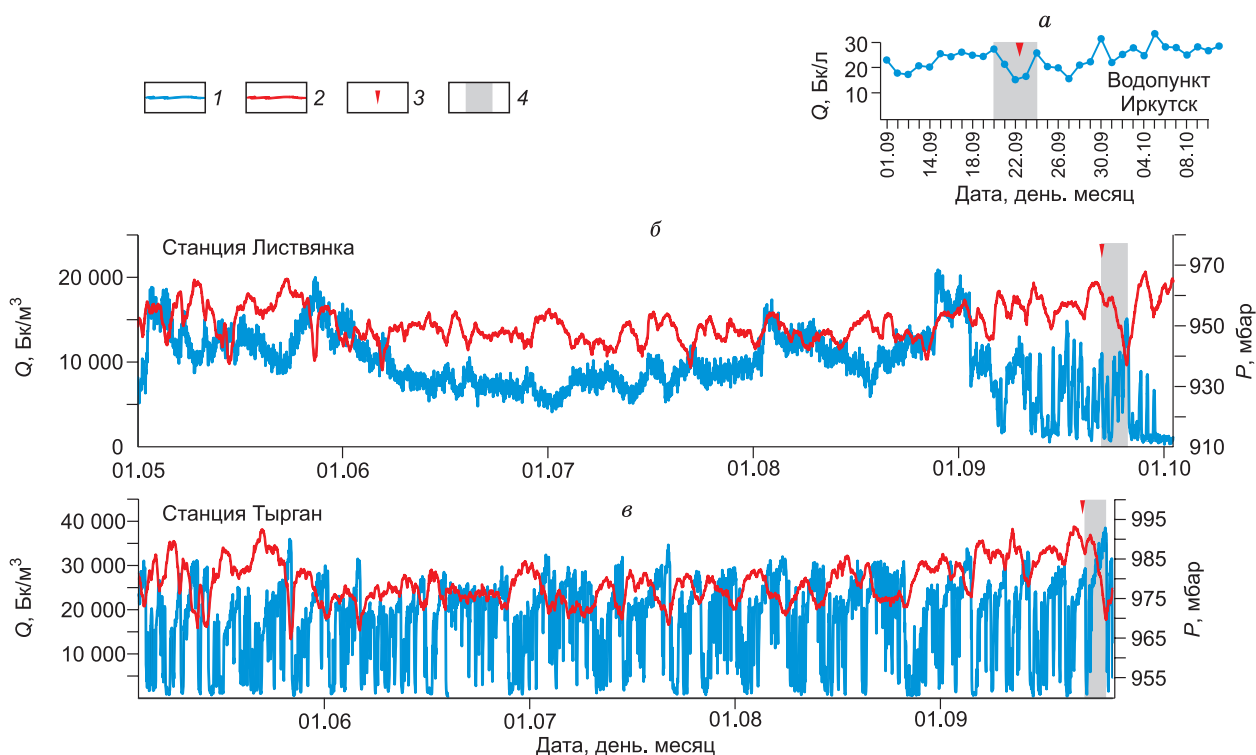


Рис. 7. Графики временных вариаций объемной активности радона (Q) и атмосферного давления (P), полученные по данным эманационного мониторинга в воде на ст. Иркутск (*а*), а также в почве на станциях Листвянка (*б*) и Тырган (*в*) в 2020 г.

1 — график вариаций параметра Q ; 2 — график вариаций параметра P ; 3 — момент главного толчка Быстринского землетрясения; 4 — период характерного изменения поля радона, связанного с землетрясением.

недели. Замеры осуществлялись с помощью радиометра радона РРА-01М-03, для которого предел максимальной погрешности составляет 30 % [Радиометр..., 2001]. На основе полученных данных были сделаны первичные выводы о пределах изменчивости параметра Q в подземных водах, общих закономерностях колебаний радона во времени, средних значениях данного параметра для разных сезонов года, а также выбран водопункт для ежедневного опробования с целью углубленного анализа связи эманаций с сейсмической активностью в регионе. Этим водопунктом стал родник Иркутск, который обладает достаточно высокой концентрацией растворенного радона ($Q_{cp} \approx 30$ Бк/л) и доступен для частого отбора и анализа проб. Замеры параметра Q производились ежедневно в одно и то же время начиная с 01.04.2020 г. Для исследования его взаимосвязи с сейсмической активностью использовался энергетический класс землетрясений (K), происходящих на территории Байкальского региона [Байкальский филиал..., 2020 б].

Согласно проведенного для водопункта Иркутск анализа, во временных рядах 200-дневной продолжительности наблюдается слабая статистическая связь между параметрами Q и K . Также отмечается регулярное снижение параметра Q на 15—20 % сразу после наиболее крупных землетрясений, находящихся на расстоянии, превышающем расчетный радиус эманационного отклика [Семицкий, Семицкий, 2020]. Быстринское землетрясение, являющееся за последние 12 лет одним из наиболее сильных сейсмических событий в регионе, также проявилось в виде минимума с последующим увеличением интенсивности эманаций. Снижение объемной активности радона достигло 60 % от среднего значения для осеннего времени года. Важной особенностью в данном случае является то, что минимум был зафиксирован за 8 ч до сейсмического события, а период времени между крайними максимумами практически равен продолжительности флуктуаций аналогичного вида, выявленных ранее на графиках вариаций концентрации радона в почве (см. полосы серого цвета на рис. 7).

Таким образом, анализ данных мониторинга поля радона на двух станциях в почвенном воздухе и в одном водопункте показал, что влияние Быстринского землетрясения обнаруживается во всех случаях, но проявляется по-разному. Общей закономерностью следует считать приуроченность к сейсмическому событию минимума объемной активности радона с экстремально низким значением для воды

и экстремально высокими последующими максимумами Q для почвы. При одинаковой продолжительности данной флуктуации (≈ 85 ч) ее начало на станциях мониторинга почвенного радона совпадает с главным толчком, а в водоисточнике предшествует ему. На данном этапе исследований эта закономерность может быть в целом объяснена сжатием пор и трещин до землетрясения и их расширением после события [Куо, 2014] со смещением времени проявления для конкретного пункта мониторинга в зависимости от его удаленности от эпицентра, технологии опробования и других факторов. Кроме того, актуальным в качестве отдаленного предвестника остается нарушение обратной связи объемной активности почвенного радона с атмосферным давлением [Zmazek et al., 2003; Семинский, Бобров, 2013], отчетливо проявившееся в одном из пунктов мониторинга за три недели до момента главного толчка Быстринского землетрясения.

Гидрогеологические данные. Специфической особенностью Быстринского землетрясения была реакция подземной гидросферы на изменение напряженно-деформированного состояния породного массива, имевшие место до и после этого сейсмического события.

Изменение режима подземных вод в период подготовки землетрясения было замечено в 59 км от инструментально установленного эпицентра в правом борту долины р. Тойсук в районе дер. Ходарей Усольского района Иркутской области (см. рис. 1). Разгрузка пресных вод с большим дебитом из карстованного массива кембрийских известняков, контактирующих здесь по разлому с протерозойскими гранитами, происходила из нескольких крупных выходов на дне курьи, впадающей в основную реку. За трое суток до главного сейсмического события, 18.09.2020 г., было отмечено появление многочисленных выходов подземных вод вдоль обнажения пологозалегающих известняков в основании врезки дороги, возвышающегося над уровнем воды в р. Тойсук на 1.2—1.5 м и более (рис. 8). Источники разного дебита образовали шесть линий длиной 50—100 м на отрезке 2 км. Максимально дебит для одного из выходов оценивается в 3—5 л/с. По наблюдениям, сделанным 13.10.2020 г., большая часть источников была осушена и выходы вод сосредоточились на отрезке длиной около 150 м вблизи контакта известняков и гранитов. Вероятно, имевшийся ранее канал ниже уровня поверхностных вод был забарражирован в результате подвижек по полой зоне разлома при подготовке землетрясения, и разгрузка

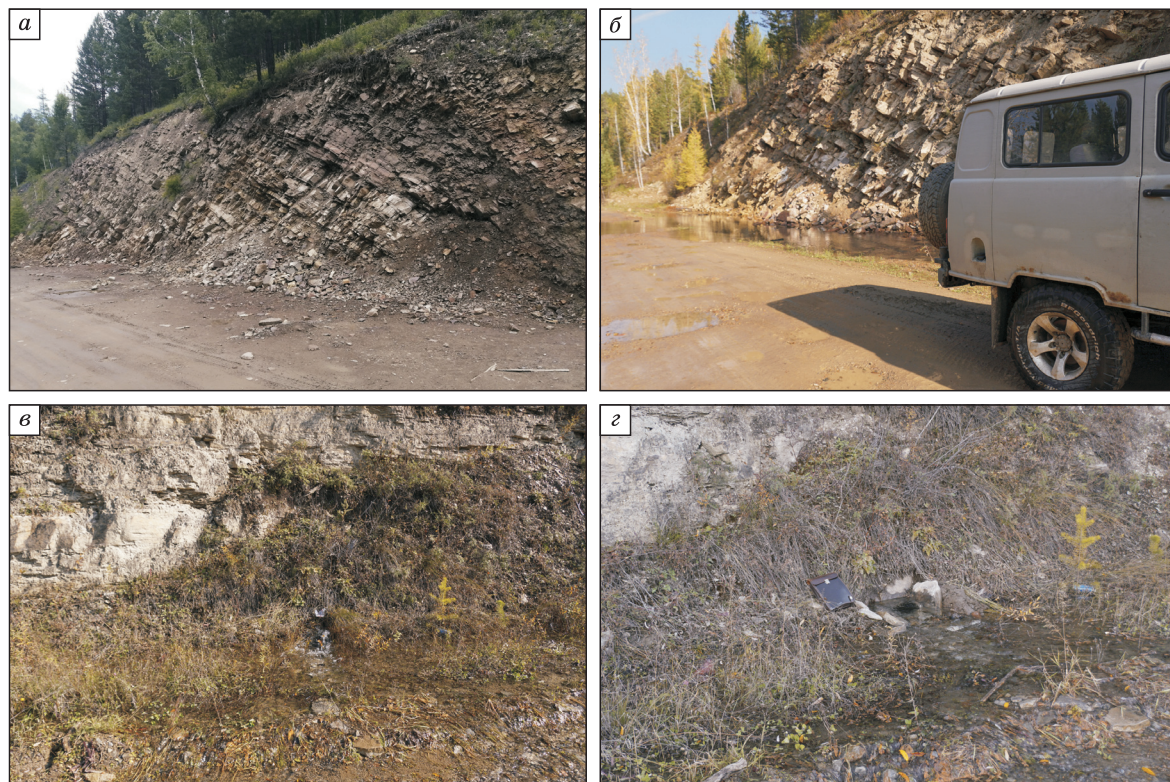


Рис. 8. Проявления изменения режима подземных вод во время подготовки Быстринского землетрясения в районе дер. Ходарей (Усольский район Иркутской области).

а — вид дорожной выемки до землетрясения; *б* — вид дорожной выемки 22.09.2020 г.; *в* — вновь образованный источник пресной воды в основании уступа; *г* — выход подземных вод с дебитом до 5 л/с. Фото В.А. Санькова.

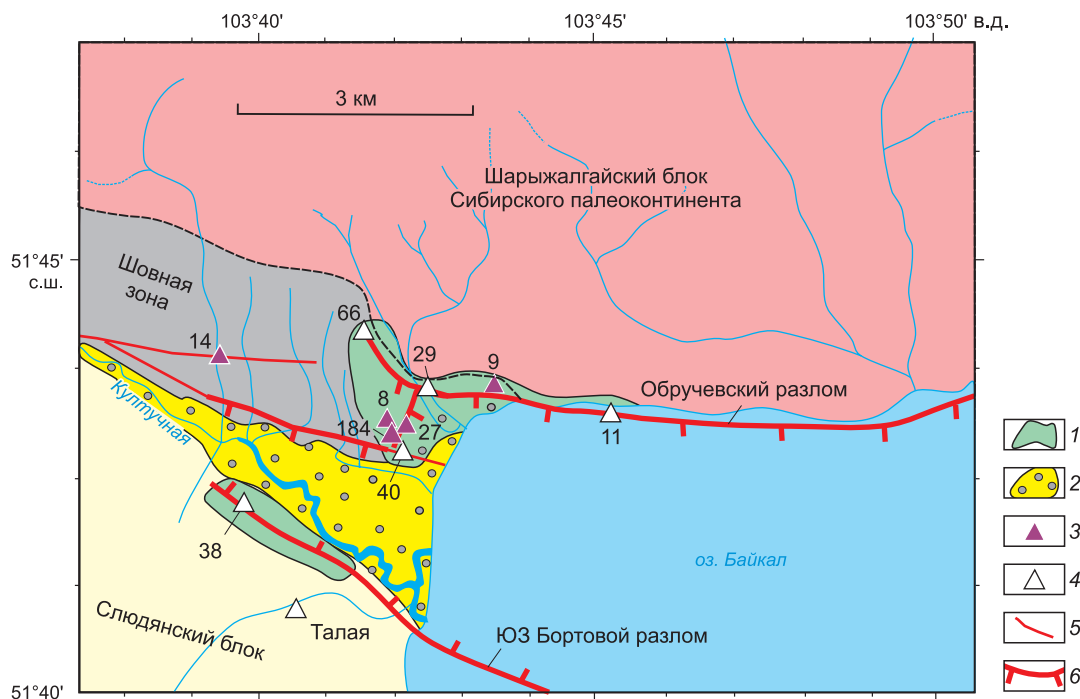


Рис. 9. Расположение пунктов гидрогеохимического опробования подземных вод в районе южной оконечности оз. Байкал.

1 — участок повышенных значений $OA_{4/8} = 2.0—3.3$ в подземных водах, по [Рассказов и др., 2015]; 2 — Суходольная область аккумуляции; 3 — основная станция мониторинга; 4 — вспомогательная станция; 5 — палеосейсмодислокация; 6 — рельефообразующий разлом. Положение палеосейсмогенных дислокаций показано в соответствии с [Чипизубов, Смекалин, 1999].

стала осуществляться по параллельной зоне, на 1.5 м выше по разрезу. Сброс напряжений в результате землетрясения привел к постепенному восстановлению прежних каналов миграции подземных вод.

Изменения отдельных характеристик состава и свойств подземных вод были зафиксированы после Быстринского землетрясения в районе южной оконечности оз. Байкал (см. рис. 1, 9), т. е. в непосредственной близости от эпицентра. Результаты мониторинга, проводимого с 2012 г. в пределах этого — Култукского — полигона, показывают его важную роль для регистрации откликов на землетрясения, происходившие в акватории Южного Байкала, т. е. восточнее полигона [Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015; Rasskazov et al., 2020]. Ключевую информацию о сейсмогенном состоянии породного массива дают значения отношения активностей $^{234}U/^{238}U$ ($OA_{4/8}$), снижающиеся в результате закрытия трещин при сжатии и возрастающие вследствие открытия трещин для циркуляции подземных вод. Максимальное значение $OA_{4/8} = 3.3$ определено в воде станции 27, минимальное значение (1.1), близкое к циклическому равновесию урана, на ст. 14 (см. рис. 9). В течение 8 лет наблюдались в целом однотипные гидроизотопные отклики всех станций Култукского полигона на подготовку и реализацию землетрясений, происходивших восточнее его, в акватории Байкала. Быстринское землетрясение впервые произошло западнее полигона. В результате этого землетрясения проявился разный характер откликов станций его западной части (родник в палеосейсмодислокации зоны Главного Саянского разлома, ст. 14) и в его восточной части (родники и скважины береговой тектонической ступени, наклоненной к Байкалу, ст. 8 и др.).

Наблюдения в пределах сети станций опробования показали вариации окислительно-восстановительного потенциала подземных вод (Eh), который используется как экспрессный показатель регистрации сейсмогенных гидрогеохимических эффектов. По измерениям, выполненным за 41 день до Быстринского землетрясения (12 августа 2020 г.), получен тренд относительного снижения Eh с возрастанием концентрации U . Измерения 22 сентября (через 10—12 ч после землетрясения) показали общее согласованное снижение Eh всех станций полигона от максимального значения 220 мВ (ст. 14) до отрицательного значения (–44 мВ). На станциях 9, 40 и 27 концентрации U не изменились, на ст. 14 снизились, а на станциях 8 и 184 возросли. Наиболее заметно концентрация U повысилась на ст. 184 (от 0.40 до 1.13 мкг/дм³) (рис. 10). Контрольное измерение 6 октября на ст. 8 вновь показало отрицательное значение Eh (–44 мВ). На станции 27 до землетрясения было получено значение $Eh = 194$ мВ, в день земле-

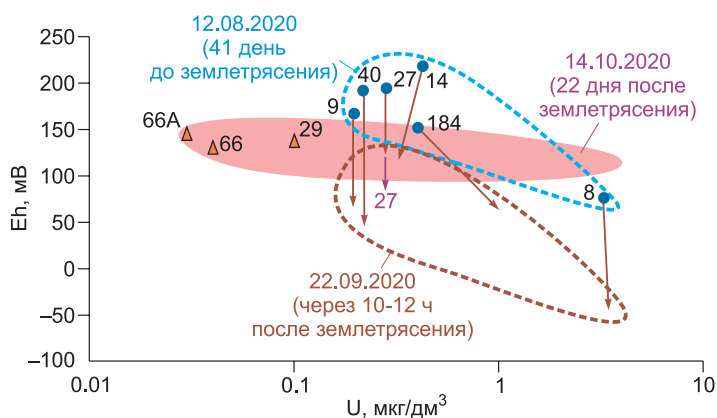


Рис. 10. Соотношение E_h — U в подземных водах южной оконечности оз. Байкал за 41 день до Быстринского землетрясения (12.08.2020), изменение соотношений непосредственно после него (22.09.2020, показано темно-коричневыми стрелками) и соотношение, установившееся через 22 дня (14.10.2020).

Для станций 66А, 66 и 29 приняты значения концентраций U , полученные до землетрясения. Фиолетовой стрелкой отмечено anomальное снижение E_h на ст. 27.

трясения значение снизилось до 124 мВ, а через 22 дня еще уменьшилась до 92 мВ. На других станциях полигона 14 октября 2020 г. наблюдалось возрастание E_h (относительно значений в день землетрясения), установившееся в интервале от 100 до 144 мВ (значение E_h ст. 27 вышло за нижний предел этого интервала) (см. рис. 10).

Снижение E_h в подземных водах свидетельствует о переходе от окислительного состояния, характерного для малоуглубинных и поверхностных вод, к восстановительному [Крайнов и др., 2012]. В данном случае это может быть связано с миграцией более глубоких вод к поверхности по разрывам, открывшимся в результате сейсмического события. Таким образом, существенные пространственные и временные вариации E_h в подземных водах южной оконечности оз. Байкал свидетельствуют, что Быстринское землетрясение инициировало гидрогеохимические процессы, выяснение причин которых требует детального анализа гидрогеохимических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ сейсмологических, структурно-тектонических, деформометрических, эманиционных и гидрогеохимических данных позволил получить предварительную характеристику Быстринского землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи южной оконечности оз. Байкал.

Землетрясение предварялось форшоками, сильнейшие из которых с энергетическим классом $K = 5.1$ произошли 9 и 18 сентября. Главный толчок произошел 21.09.2020 г. в 18.04 по UTC, т. е. по местному времени в 2 ч 4 мин 22 сентября. Энергия основного толчка оценивается в $2.28 \cdot 10^{17}$ Н·м, моментная магнитуда равна 5.4, размеры очага составляют 2.10×0.68 км, смещение в очаге 8 см, величина сброшенного напряжения $3.55 \cdot 10^6$ Па. Механизм очага Быстринского землетрясения представляет левосторонний сдвиг. Наибольшие сотрясения при землетрясении (6—7 баллов) наблюдались в близлежащих населенных пунктах: Быстрое, Тибельти, Анчук, Кулдук, Слюдянка и др. На крутых склонах в плейстоценовой области зафиксированы осыпи и обвалы, единичные разрушения печных труб, трещины в штукатурке и т. д. После землетрясения в течение трех недель было зарегистрировано 25 афтершоков, сильнейший из которых произошел через 15 мин после главного толчка и соответствовал ему по механизму очага, но с чуть большим вкладом взбросовой компоненты. Параметры сильнейшего афтершока: сейсмический момент $2.05 \cdot 10^{15}$ Н·м, магнитуда (M_w) 4.1, размеры очаговой области 0.87×0.29 км, величина сброшенных напряжений $1.27 \cdot 10^6$ Па.

Быстринское землетрясение сопровождалось серией предшествовавших и сопутствующих явлений различной природы, зафиксированных в разных местах плейстоценовой области и на смежной территории. К ним относятся изменение режима и свойств подземных вод, которое проявилось в появлении до события и исчезновении после него серии выходов подземных вод, а также в изменении после землетрясения их окислительного состояния до восстановительного. Предсейсмогенные вариации напряженно-деформированного состояния породного массива стали причиной флуктуаций эманиционного поля, выразившихся в нарушении за трое суток до события связи интенсивности эксхалляции радона с атмосферным давлением, а за несколько часов до него — в уменьшении концентрации радиоактивного газа в воде. Наконец, был зафиксирован краткосрочный предвестник землетрясения в виде характерной и закономерной динамики развития деформаций пород в пункте их мониторинга, располагающемся в штольне на расстоянии 20 км от эпицентра.

В региональном отношении Быстринское землетрясение приурочено к узлу сочленения трех крупных разломных зон — Главной Саянской, Тункинской и Обручевской, формирующих структуру Байкальского рифта и периодически генерирующих землетрясения, ощутимые для населения региона. Механизм очагов Быстринского землетрясения и его сильнейшего афтершока, а также деформометри-

ческие данные позволяют предположить, что сейсмическое событие произошло по модели «stick-slip» в ходе реализации взбрососдвиговой подвижки по хорошо проработанному запад—северо-западному сместителю в зоне Главного Саянского разлома.

Авторы выражают благодарность Бурятскому филиалу Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Институту астрономии и геофизики Монгольской академии наук, КГБУ «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края», а также Объединению научно-исследовательских сейсмологических институтов (Incorporated Research Institutions for Seismology) за предоставленные записи волновых форм землетрясений. Авторы благодарны директору ИЗК СО РАН, чл.-кор. Д.П. Гладкочубу за помощь и поддержку исследования на всех стадиях его реализации, д. г.-м. н. В.В. Ружичу и д. г.-м. н. О.В. Луниной за содействие в получении отдельных видов фактического материала и участие в его обсуждении, а также заместителю директора Байкальского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» к.г.-м.н. В.В. Чечельницкому за ценные советы и консультации.

Авторы выражают благодарность д.т.н. А.Ф. Еманову и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

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

ЛИТЕРАТУРА

Байкальский филиал геофизической службы [электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <http://seis-bykl.ru/>. Заглавие с экрана. (Дата обращения 10.10.20).

Байкальский филиал геофизической службы [электронный ресурс]. 2020а. Режим доступа: <http://seis-bykl.ru/>. Заглавие с экрана. (Дата обращения 21.09.20).

Байкальский филиал геофизической службы [электронный ресурс]. 2020б. Режим доступа: <http://seis-bykl.ru/>. Заглавие с экрана. (Дата обращения 15.10.20).

Добрынина А.А. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой системы // *Физика Земли*, 2009, № 12, с. 60—75.

Добрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В., Цыдыпова Л.Р., Герман В.И. Сейсмоакустические эффекты Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г. с $M_w = 4.9$ // *ДАН*, 2017, т. 477, № 6, с. 711—715.

Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Турутанов Е.Х., Кожевников В.М., Руженцев С.В., Дергунов А.Б., Филиппова И.Б., Томуртогоо О., Арвисбаатар Н., Баясгалан Ц., Бямба Ч., Хозбаяр П. Центральный Сибирско-Монгольский трансект // *Геотектоника*, 1993, с. 3—19.

Козлова И.К., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // *Уральский геофизический вестник*, 2005, № 7, с. 31—34.

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М., ЦентрЛитНефтеГаз, 2012, 672 с.

Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М., Наука, 1968, 247 с.

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., Ашурков С.В., Саньков А.В. Современные горизонтальные движения и деформации земной поверхности юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS измерений // *Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ. Тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран (11—16 августа 2014 г., г. Иркутск)*. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2014, с. 27.

Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991—1996 гг. // *Геология и геофизика*, 1998, т. 39 (11), с. 1598—1607.

Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w = 6.3$, $I_0 = 8—9$ (Южный Байкал) // *Землетрясения Северной Евразии*, 2008 год. Обнинск, 2014, с. 386—407.

Парфеев А.В., Саньков В.А. Геодинамические условия развития Тункинской ветви Байкальской рифтовой системы // *Геотектоника*, 2006, № 5, с. 61—84.

Радиометр радона портативный РРА-01М-03. Руководство по эксплуатации. М., НПП «Доза», 2001, 34 с.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмо-

прогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, № 4, с. 519—554.

Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы, 2014, № 6, с. 24—28.

Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В., Смекалин О.П., Мирошниченко А.И., Кале Э., Девершер Ж. Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS-геодезии и палеосейсмологии // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (11), с. 1369—1376.

Сейсмоионосферные и электромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2012, 304 с.

Семинаский А.К., Семинаский К.Ж. Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020, т. 33, с. 100—111.

Семинаский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов Западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика, 2013, т. 4, № 1, с. 1—12.

Семинаский К.Ж., Семинаский А.К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации // Геодинамика и тектонофизика, 2016, т. 7, № 3, с. 477—493.

Смекалин О.П. Изучение палеосейсмогенных деформаций Южного Прибайкалья. М., ИФЗ РАН, 2008, 101 с.

Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М., 1993, с. 113—122.

Уткин В.И., Мамыров Э., Канн М.В., Кривашеев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Физика Земли, 2006, № 9, с. 61—70.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинаский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // ДАН, 2015, т. 460, № 4, с. 464—467.

Чипизубов А.В. Проблемные исторические землетрясения Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии, 2016, т. 43, № 2, с. 53—72.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (6), с. 936—947.

Шерман С.И., Медведев М.Е., Ружич В.В., Киселев А.И., Шмотов А.П. Тектоника и вулканизм юго-западной части БРЗ. М., Наука, 1973, 136 с.

Vak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys. Res., 1989, v. 94 (B11), p. 15.635—15.637.

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science, 1966, v. 153, p. 990—992.

Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res., 1970, v. 75 (26), p. 4997—5009.

Che I.-Y., Kim G., Le Pichon A. Infrasound associated with the deep $M7.3$ northeastern China earthquake of June 28, 2002 // Earth Planets Space, 2013, v. 65, p. 109—113, doi:10.5047/eps.2012.07.010.

Ciliberto S., Laroche C. Experimental evidence of self-organization in the stick-slip dynamics of two rough elastic surface // J. Phys., 1994, v. 4, p. 223—236.

Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelnickey V.V., Déverchère J. Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal rift and surroundings from analysis of coda waves // Tectonophysics, 2016, v. 675, p. 50—68.

Dobrynina A.A., Sankov V.A., Тсудыпова Л.Р., German V.I., Chechelnickey V.V., Ulzibat M. Novgogol earthquake 5 December 2014, $M_w = 4.9$: seismic and acoustic effects // J. Seismol., 2018, v. 22, p. 377—389.

Doser D. Faulting within the eastern Baikal rift as characterized by earthquake studies // Tectonophysics, 1991, v. 196, p. 109—139.

Feder H.J.S., Feder J. Self-organized criticality in stick-slip process // Phys. Rev. Lett., 1991, v. 66 (20), p. 2669—2672.

Haken H. Synergetics: an introduction. Berlin, Heidelberg, Springer, 1977, 325 p.

King C.-Y., Walkingstick C., Basler D. Radon in soil gas along active faults in Central California // Field studies of radon in rocks, soils and water: U.S. Geological Survey bulletin / Eds. L. Gunderon, R. Wanty. Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1991, p. 77—133.

Kondepudi D., Prigozhin I. Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second Edition. Oxford, John Wiley & Sons, 1998, 506 p.

Kuo T. Correlating precursory declines in groundwater radon with earthquake magnitude // *Groundwater*, 2014, v. 52 (2), p. 217—224.

Le Pichon A., Guilbert J., Vallée M., Dessa J.X., Ulziibat M. Infrasonic imaging of the Kunlu Mountains for the great 2001 China earthquake // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, v. 30 (15), p. 1814, doi:10.1029/2003GL017581.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault // *Sci. China Earth Sci.*, 2012, v. 55, p. 869—881.

Ma J., Guo Y., Sherman S.I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, v. 2, p. 87—99.

Mutschlecner J.P., Whitaker R.W. Infrasonic sound from earthquakes // *J. Geophys. Res.*, 2005, v. 110, D01108, doi:10.1029/2004JD005067.

Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes // *Phys. Rev. Lett.*, 1992, v. 68 (8), p. 1244—1247.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.*, 2020, doi:10.1007/s11707-020-0821-5.

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, doi:10.1002/2017TC004691.

San'kov V.A., Miroshnitchenko A.I., Levi K.G., Likhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine*, 1997, v. 21 (2), p. 435—455.

Zmazek B., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction // *Appl. Radiat. Isot.*, 2003, v. 58 (6), p. 697—706.

*Рекомендована
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию 21 октября 2020 г.,
принята в печать 15 февраля 2021 г.*