

УДК 550.348.098.64 (571.53/.55)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИБАЙКАЛЬЯ и ЗАБАЙКАЛЬЯ в 2020 году**В.И. Мельникова^{1,2}, Н.А. Гилёва², Я.Б. Радзиминович², А.И. Филиппова³, Е.А. Кобелева²**¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, vimel@crust.irk.ru²Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, nagileva@crust.irk.ru³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, ale@izmiran.ru

Аннотация. Рассмотрен характер сейсмического процесса в Прибайкалье и Забайкалье в 2020 году. Общее число зарегистрированных землетрясений с $K_p \geq 5.6$ составило 7711. Большая их часть (94 %) произошла в Байкальской рифтовой зоне, где наибольшей активностью (по количеству землетрясений) характеризовались Южно-Байкальский и Байкало-Муйский районы. Наиболее сильные землетрясения – Быстринское 21 сентября 2020 г. ($M_w=5.6$) и Кударинское 9 декабря 2020 г. ($M_w=5.5$) – реализовались в Хубсугул-Гункинском и Южно-Байкальском районах соответственно. Оба события в ближней зоне ($\Delta \leq 19$ км) ощущались с интенсивностью 6–7 баллов. Ощутимые макросейсмические эффекты меньшей интенсивности наблюдались еще при 34 землетрясениях с $K_p \geq 8.4$. Механизмы очагов были определены для 77 землетрясений ($K_p \geq 9.1$) двумя методами: по знакам первых вступлений P -волн на региональных станциях и в результате расчета тензора сейсмического момента (в приближении двойной пары сил) на основе амплитудных спектров поверхностных волн. Установлено, что преобладающим типом смещений в очагах являются сбросы, часто сочетающиеся со сдвигами. В целом, 2020 г. в регионе характеризовался умеренной сейсмической активностью, при этом суммарная сейсмическая энергия составила $573 \cdot 10^{12}$ Дж, что примерно в два раза превышает аналогичный показатель 2018–2019 гг.

Ключевые слова: сейсмичность, механизм очага землетрясения, макросейсмические данные, Байкальская рифтовая зона.

Для цитирования: Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Филиппова А.И., Кобелева Е.А. Сейсмичность Прибайкалья и Забайкалья в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 135–147. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.12> EDN: GRYAKE

Введение. Сейсмический мониторинг Прибайкалья и Забайкалья осуществляется с целью детального анализа информации о землетрясениях и уточнения сейсмической опасности рассматриваемой территории. В связи с этим исследован сейсмический режим региона в 2020 г., представлены сведения о количестве и параметрах произошедших землетрясений, даны оценки механизмов очагов отдельных событий с $K_p \geq 9.1$, рассмотрены макросейсмические проявления ощутимых землетрясений. Особое внимание уделено наиболее сильным сейсмическим событиям: Быстринскому 21.09.2020 г. ($M_w=5.6$) и Кударинскому 09.12.2020 г. ($M_w=5.5$), произошедшим на юго-западе и в центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Сеть станций и инструментальные данные. В 2020 г. региональные цифровые сейсмические станции (ЦСС) Байкальского ($N=25$) и Бурятского ($N=10$) филиалов ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1) продолжали работать в прежнем режиме, осуществлялась лишь незначительная корректировка уровней чувствительности сейсмографов и акселерографов в короткопериодной аппаратуре (Прил. 1, 2). В некоторых случаях в сводной обработке материалов наблюдений использовались данные сейсмических станций соседних регионов [1].

В общий каталог за 2020 г. вошли параметры 7711 сейсмических событий с $K_p \geq 5.6$ (рис. 2, табл. 1). Подавляющее большинство землетрясений (более 94 %) традиционно произошло в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) [2]. Наибольшая сейсмическая активность наблюдалась в Байкало-Муйском районе БРЗ, наименьшая – на Сибирской платформе (рис. 2).

Каталог землетрясений, опубликованный в настоящем выпуске журнала, содержит 837 представительных ($K_p \geq 7.6$) событий (Прил. 3). Графики повторяемости землетрясений, построенные по разным энергетическим диапазонам: $K_p=7-11$ ($\gamma=-0.524 \pm 0.017$) и $K_p=7-15$ ($\gamma=-0.428 \pm 0.020$), показывают значительные расхождения в значениях коэффициентов γ (рис. 2) из-за учета во втором случае редких сильных сейсмических событий, период повторяемости которых гораздо выше, чем один год. Землетрясения с $K_p=6$ не являются представительными, поскольку регистрируются примерно на 75 % [3].

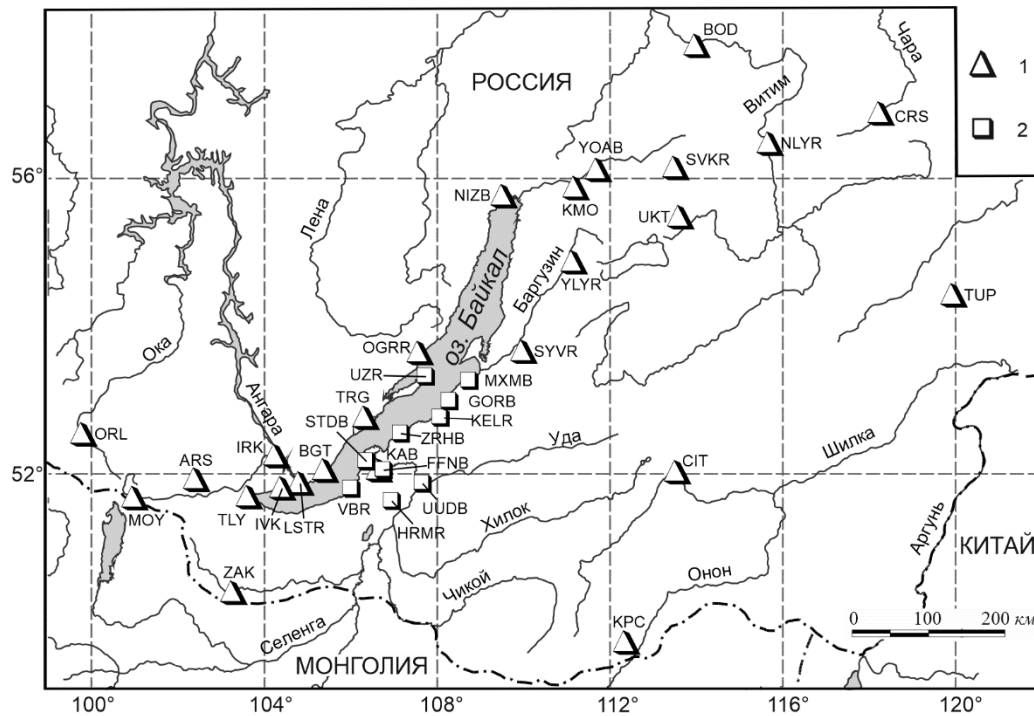


Рис. 1. Сейсмические станции Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г.

1, 2 – сейсмические станции Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН соответственно (Прил. 1, 2).

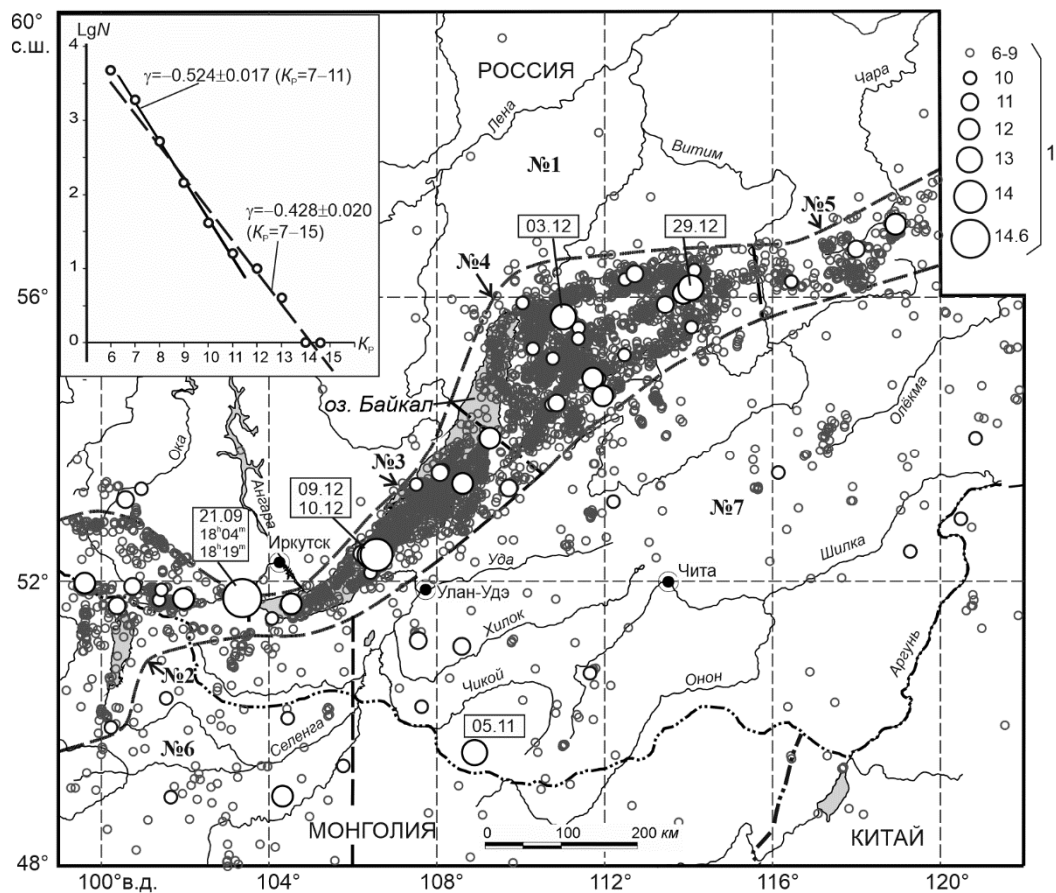


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Прибайкалья и Забайкалья ($K_p \geq 5.6$) за 2020 г.

1 – энергетический класс K_p ; пунктирная линия – условные границы сейсмоактивных районов региона по [2]; датами отмечены наиболее сильные землетрясения ($K_p=12.6-14.6$, $M_w=4.6-5.6$). На врезке слева показан график повторяемости землетрясений БРЗ.

Таблица 1. Распределение количества землетрясений по энергетическим классам (K_p) и суммарная сейсмическая энергия (ΣE) по районам в 2020 г.

Области (I–III) Районы (№№1–7)	K _p											N _Σ	ΣE, 10 ¹² Дж
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
I – Сибирская платформа													
1 – Сибирская платформа	29	9	6	2	1	1	–	–	–	–	48	0.074	
II – Байкальская рифтовая зона													
2 – Хубсугул-Тункинский р-н	258	128	38	15	3	2	2	1	–	1	448	412.387	
3 – Южно-Байкальский р-н	1376	598	140	47	8	5	3	1	1	–	2179	107.840	
4 – Байкало-Муйский р-н	2842	1054	306	73	29	8	4	2	–	–	4318	18.956	
5 – Кодаро-Удоканский р-н	202	98	32	9	1	1	1	–	–	–	344	0.461	
III – Забайкальская область													
6 – Западное Забайкалье	26	49	17	6	4		1	–	–	–	103	0.551	
7 – Восточное Забайкалье	94	111	39	15	8	2	1	1	–	–	271	32.502	
Всего	4827	2047	578	167	54	19	12	5	1	1	7711	572.771	

Механизмы очагов землетрясений в 2020 г. определены для 77 землетрясений с $K_p \geq 9.1$ (Прил. 9). Большая часть решений основана на знаках первых вступлений P -волн на региональных станциях и получена с помощью программного обеспечения, разработанного А.В. Ландером [4]. Для 17 событий с $K_p \geq 11.5$ ($M_w \geq 3.9$) по амплитудным спектрам поверхностных волн на удаленных станциях с учетом региональных знаков P -волн по методике, описанной в [5], рассчитан тензор сейсмического момента (ТСМ). Количественное распределение типов подвижек в очагах землетрясений, для которых определены механизмы, свидетельствует о том, что по плоскостям разрывов преимущественно ЮЗ–СВ простирания преобладают сбросовые смещения, иногда со сдвиговой компонентой (Прил. 9) (рис. 3 а, б).

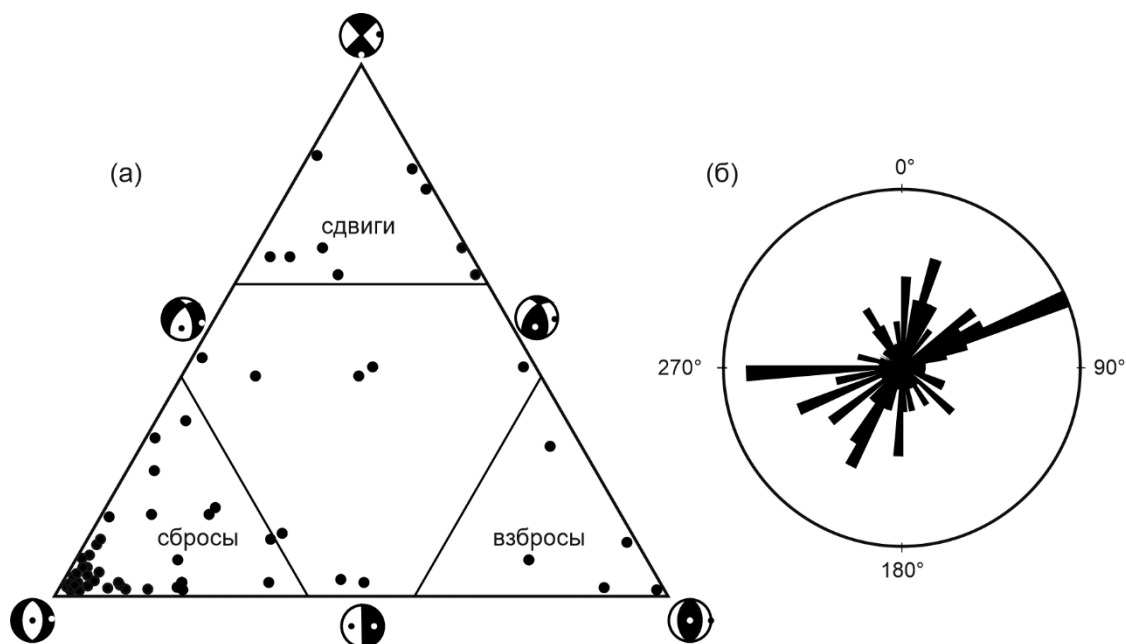


Рис. 3. Классификационная диаграмма механизмов очагов (а) и азимуты простирания плоскостей разрывов в очагах землетрясений (б) Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г.

Сейсмичность по районам. На *Сибирской платформе (район № 1)*, как указано выше, произошло наименьшее количество землетрясений ($N=48$). Максимальное событие имело энергетический класс $K_p=10.8$ (табл. 1, рис. 2).

В Хубсугул-Тункинском районе (№ 2) эпицентры большинства землетрясений, как обычно, располагались вдоль основных морфоструктур: Главного Саянского разлома, Тункинской системы впадин, а также Хубсугульской и Дархатской впадин (рис. 4).

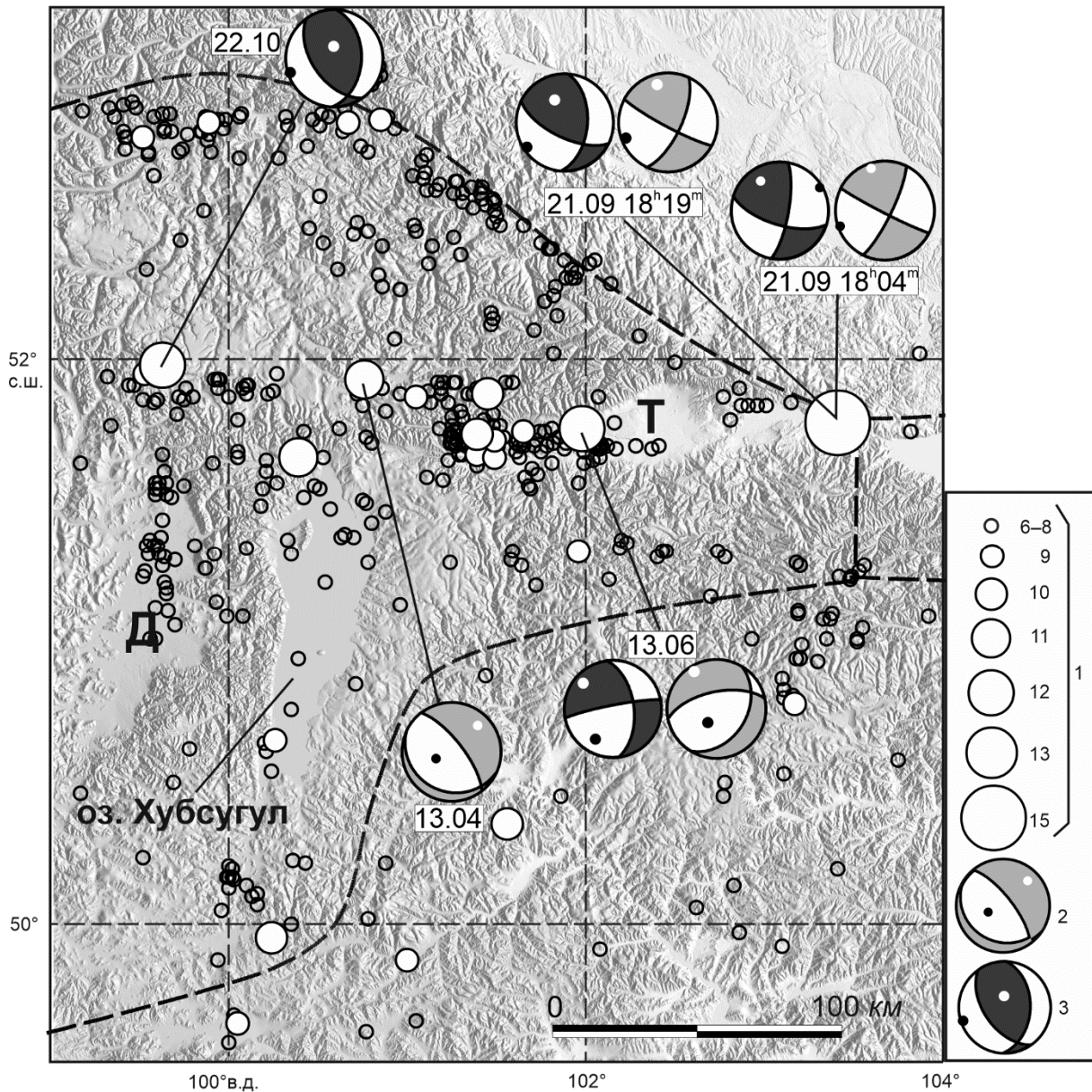


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Хубсугул-Тункинского района (№ 2 на рис. 2) в 2020 г.

1 – условные обозначения см. на рис. 2; 2, 3 – диаграммы фокального механизма землетрясения в проекции нижней полусферы (2 – решение получено по знакам первых вступлений P -волн, 3 – при совместной инверсии знаков первых вступлений P -волн и амплитудных спектров поверхностных волн; цифрами указаны даты и время землетрясений. Впадины рифтового типа: Т – Тункинская, Д – Дархатская.

Самым примечательным в районе стало сильное Быстринское землетрясение, произошедшее 21 сентября в 18^h04^m ($K_p=14.6$, $M_w=5.6$, $h=12\pm 3$ км) в ранее асейсмичной области на востоке Тункинских впадин. Через 15 мин (в 18^h19^m) после главного события был зарегистрирован один сильный афтершок ($K_p=13.1$, $M_w=4.7$, $h=12\pm 2$ км), а до конца октября 2020 г. в эпицентральной зоне Быстринского землетрясения отмечались лишь немногочисленные слабые толчки ($N=10$ с $K_p=5.8-8.6$) (Прил. 4). Стоит отметить, что использование в работе Н.А. Гилёвой с соавторами [6] при оценке глубин гипоцентров главного толчка и его сильного афтершока только четких вступлений близких станций ($\Delta < 200$ км) привело к заглублению обоих очагов ($h=18\pm 1.5$ км) относительно данных Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (Прил. 3, 4).

Максимальная интенсивность сотрясений, наблюдавшаяся в ближайших к эпицентру населенных пунктах (в д. Быстрая и пгт Култук на эпицентральных расстояниях 5 и 19 км соответственно), оценивается в 6–7 баллов по шкале MSK-64 (Прил. 10, 12).

Очаговые параметры главного толчка и его крупного афтершока были получены в работе [7] при расчете ТСМ (в приближении двойной пары сил) на основе амплитудных спектров поверхностных волн с привлечением дополнительной информации о знаках первых вступлений P -волн на региональных станциях. Установлено, что очаги главного толчка и его крупнейшего афтершока сформировались на глубинах 24 км и 6 км под влиянием СЗ–ЮВ растяжения и СВ–ЮЗ сжатия, при этом в субширотных плоскостях разрывов реализовались левосдвиговые смещения с надвиговой составляющей (рис. 5). Моментные магнитуды Быстринского землетрясения и его афтершока, как указано выше, – $M_w=5.6$ и $M_w=4.7$, скалярные сейсмические моменты – $M_0=3.0 \cdot 10^{17}$ Н·м и $M_0=1.1 \cdot 10^{16}$ Н·м соответственно. Отметим, что оценки глубин гипоцентров указанных событий, приведенные в работе [7], отличаются от определений Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН ($h=12 \pm 3$ км, Прил. 3, 4), что, вероятно, связано с использованием разных скоростных моделей среды.

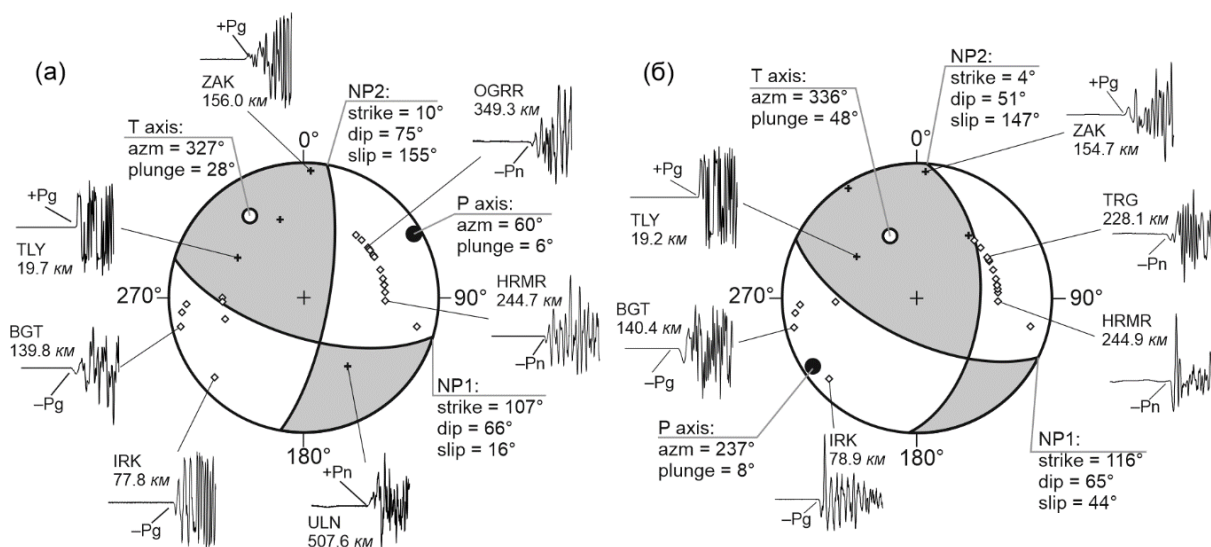


Рис. 5. Очаговые параметры Быстринского землетрясения (а) и его крупнейшего афтершока (б) по [7] с примерами записей первых вступлений P -волн, зарегистрированных на вертикальных компонентах региональных сейсмических станций (решение механизма очага приведено в нижней полусфере)

Кроме основных очаговых параметров, впервые в регионе для главного толчка были определены интегральные характеристики, описывающие его пространственно-временное развитие [7]. В результате выявлена «истинная» плоскость разрыва (субширотная), скорость разрываобразования (2.4 км/с) и длина разрыва (45 км), ориентированного в северо-западном направлении.

Кроме Быстринского землетрясения, в районе стоит отметить два ощутимых землетрясения с $K_p=11.6$ –12.0 (рис. 4). Одно из них (13 июня в 07^h36^m, $K_p=11.6$, $M_w=3.9$) со сбросо-сдвиговыми смещениями в очаге локализовалось в Тункинской долине и сопровождалось девятью слабыми афтершоками ($K_p \leq 8.8$). Интенсивность сотрясений при этом землетрясении на расстояниях $\Delta=13$ –87 км не превышала 4–5 баллов (Прил. 10). Второе событие (22 октября в 13^h38^m, $K_p=12.0$, $M_w=4.3$), произошедшее к северу от оз. Хубсугул, имело один слабый афтершок, ощущалось с интенсивностью 3–4 балла в п. Орлик (60 км) и характеризовалась взбросовыми смещениями в очаге (рис. 4).

Южно-Байкальский район (№ 3) по общему числу преимущественно слабых землетрясений на порядок превышает Хубсугул-Тункинский район, уступая последнему по количеству выделившейся сейсмической энергии (табл. 1). Однако, 9 декабря в 21^h44^m здесь произошло одно из самых сильных сейсмических событий региона в 2020 г. – Кударинское землетрясение ($K_p=14.0$, $M_w=5.5$, $h=22 \pm 2$ км), локализованное в районе дельты р. Селенги (рис. 6). Это событие не предвлялось форшоками, но сопровождалось значительным количеством афтершоков ($N=89$ с $K_p=5.6$ –12.6 до конца 2020 г.) (Прил. 7). По данным Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, глубины гипоцентров Кударинского землетрясения и его афтершоков, рассчитанные с однородной скоростной моделью коры [8], составили:

$h=22\pm 2$ км и $h=20\pm 6$ км (в среднем) соответственно. Использование модели горизонтально-слоистой коры, по мнению авторов [9], уточнило локализацию гипоцентров. В результате, для главного толчка $h=18$ км, а остальные сейсмические события (около 70 %) произошли в пределах глубин $h=10\text{--}20$ км.

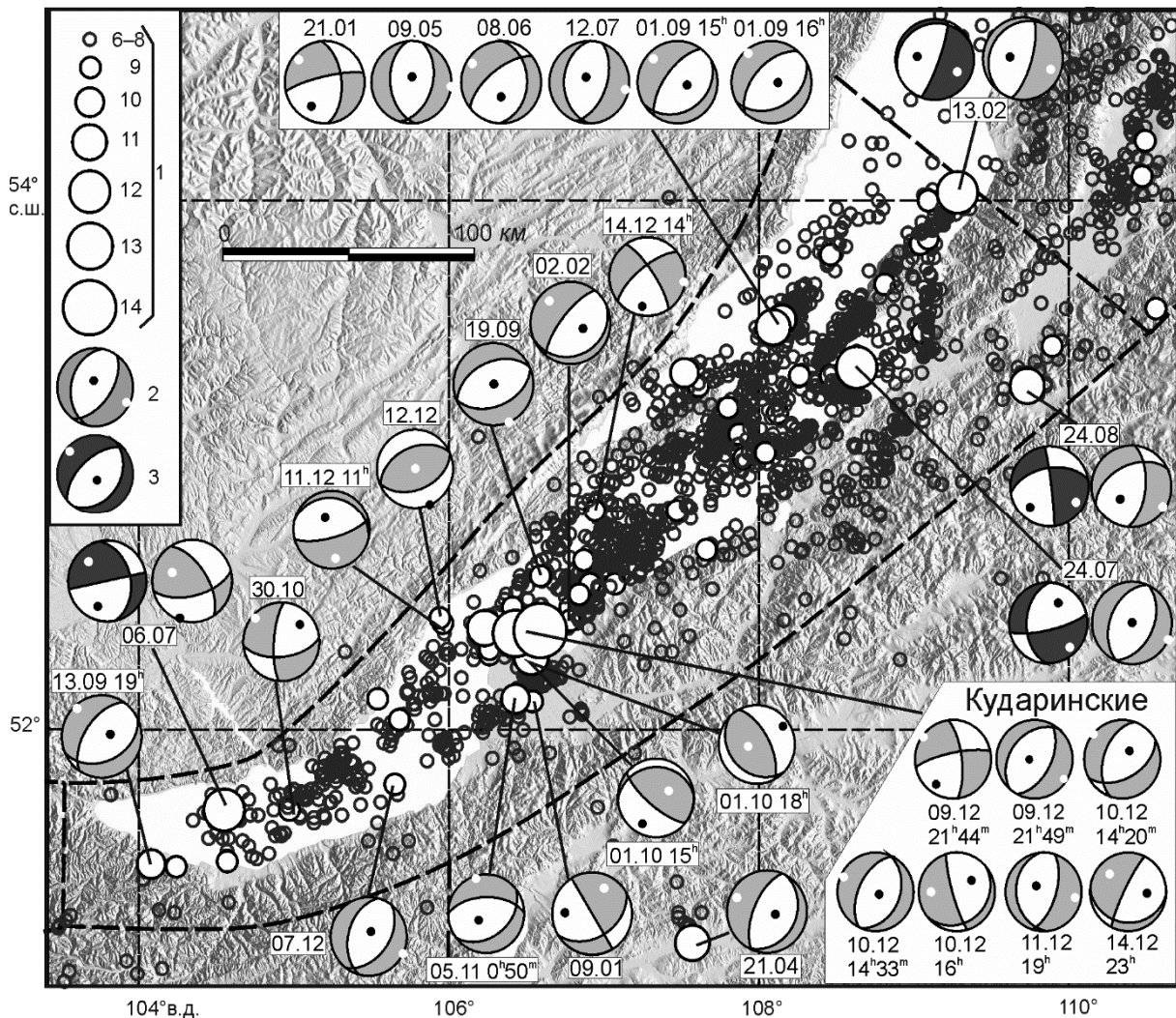


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Южно-Байкальского района (№ 3 на рис. 2) в 2020 г. Условные обозначения см. на рис. 2 и 4

Кударинское землетрясение ощущалось на значительной территории: в Бурятии, Иркутской области и в Забайкальском крае, а максимальная интенсивность сейсмических колебаний (6–7 баллов) наблюдалась в с. Кудара (18 км) (Прил. 10, 12).

Результаты решений механизма очага этого события, полученные нами по знакам первых вступлений P -волн и при расчете TCM (Прил. 9), не согласуются друг с другом (рис. 7 а, б). В первом случае под влиянием субгоризонтальных осей напряжений ЮЗ–СВ сжатия и СЗ–ЮВ растяжения в очаге реализовалось сдвиговое смещение, во втором – при близвертикальном субмеридиональном сжатии и СЗ–ЮВ растяжении – сбросовое. Тип подвижки в очаге Кударинского землетрясения, подобный полученному во втором случае (TCM), был установлен и по решениям международных агентств (GCMT, NEIC и др.). Учитывая четкость вступлений P -волн и «жесткое» закрепление знаками нодальных линий (рис. 7 а), несогласованность «знаковых» и тензорных решений можно объяснить сменой характера смещений в процессе разрывообразования: от сдвига в начале разрыва до сброса в основной фазе его развития. Сбросовая кинематика смещений наблюдалась далее и в очагах наиболее сильных афтершоков (рис. 6).

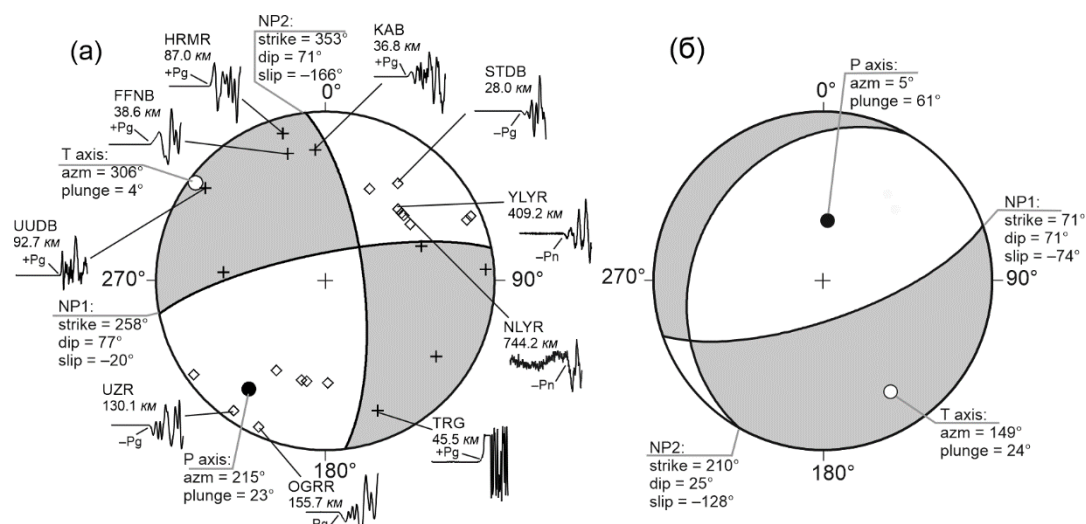


Рис. 7. Механизм очага Кударинского землетрясения 2020 г. ($M_w=5.5$) в проекции нижней полусферы. Решения получены: (а) – по знакам первых вступлений P -волн; (б) – при совместной инверсии амплитудных спектров поверхностных волн и знаков первых вступлений P -волн

Отметим, что за два месяца до Кударинского землетрясения в дельте р. Селенги, южнее его эпицентра, произошли два события (1 октября в $15^{\text{h}}00^{\text{m}}$ с $K_p=9.8$ и в $18^{\text{h}}00^{\text{m}}$ с $K_p=10.8$) со взбросовыми (не рифтовыми) подвижками в очагах (рис. 6). Известно, что для землетрясений, локализованных в этом районе, реверсивный характер смещений в очагах не редкость [10]. Надвиговые смещения со сдвиговой составляющей наблюдались и при одиночном землетрясении 6 июля в $11^{\text{h}}50^{\text{m}}$ ($K_p=12.1$, $M_w=4.3$), зарегистрированном в районе Южного Байкала (рис. 6). Максимальная интенсивность сотрясений при этом событии (4–5 баллов) наблюдалась в г. Байкальске (34 км).

В Среднем Байкале, между о. Ольхон и п-ом Святой Нос, под влиянием рифтового поля напряжений (доминирует СЗ–ЮВ растяжение) сформировался рой землетрясений (более 300 событий с $K_p \geq 5.6$ в течение года). В 2020 г. в районе многолетней Максимихинской последовательности землетрясений [11] произошло 103 землетрясения с $K_p \geq 5.6$. Очаг наиболее сильного из них – 24 июля в $13^{\text{h}}42^{\text{m}}$ ($K_p=12.1$, $M_w=4.3$) – сформировался в рифтовом поле напряжений. Данное событие сопровождалось слабым афтершоковым процессом ($N=10$ с $K_p=5.6$ – 9.2 за первые 6 часов), при этом максимальная интенсивность сотрясений (5 баллов) наблюдалась в с. Максимиха (14 км) (Прил. 10, 12).

Незначительное количество слабых афтершоков ($N \sim 10$ с $K_p=5.6$ – 8.2) и интенсивность колебаний в 4 балла в ближайших населенных пунктах наблюдались при землетрясениях 24 августа в $07^{\text{h}}49^{\text{m}}$ ($K_p=11.5$, $M_w=4.1$) и 13 февраля в $19^{\text{h}}23^{\text{m}}$ ($K_p=11.8$, $M_w=4.4$), локализованных в горном обрамлении восточного борта Байкала и на северо-востоке оз. Байкал соответственно (рис. 6). Оба события произошли в рифтовом поле напряжений, при этом очаг первого характеризовался сочетанием сбросов со сдвигами, очаг второго – чистыми сбросами.

В **Байкало-Муйском районе (№ 4)**, как обычно, зарегистрировано наибольшее число землетрясений (табл. 1, рис. 8). Повышенная сейсмическая активность здесь отмечается в районе Муяканского хребта, где вблизи восточного портала Северомуйского тоннеля в 2014 г. началась крупнейшая в регионе по численности событий и суммарной сейсмической энергии серия землетрясений [12, 13]. В эпицентральной зоне этих событий в 2020 г. произошло более 700 толчков ($K_p=5.6$ – 12.1). Самый сильный из них по моментной магнитуде (19 мая в $07^{\text{h}}22^{\text{m}}$ с $K_p=12.0$, $M_w=5.0$) реализовался в рифтовом поле напряжений, в то время как очаги других землетрясений, имеющих решение фокального механизма, характеризовались смешанными типами подвижек (рис. 8). Макросейсмические сведения были получены только для события 10 ноября в $06^{\text{h}}49^{\text{m}}$ ($K_p=12.1$, $M_w=4.4$), при котором максимальная интенсивность сейсмических колебаний (3 балла) наблюдалась в пос. Северомуйск (23 км).

К северо-востоку от активной области Муяканских землетрясений [12] 29 декабря в $00^{\text{h}}31^{\text{m}}$ зарегистрировано сейсмическое событие ($K_p=12.9$, $M_w=4.8$) сбросового типа с единичными

афтершоками (Прил. 8), ощущавшееся в четырех населенных пунктах ($\Delta=31\text{--}186\text{ км}$) с интенсивностью колебаний в 4 балла. Подобный тип смещений отмечен и в очаге землетрясения 5 марта в $04^{\text{h}}17^{\text{m}}$ ($K_p=10.9$), входящего в состав немногочисленной группы толчков ($N\sim 50$) на юго-западе Муяканского хребта.

На западных склонах Северо-Муйского хребта произошло еще одно землетрясение (3 декабря в $12^{\text{h}}37^{\text{m}}$, $K_p=12.8$, $M_w=4.6$) со сбросовыми смещениями в очаге. Оно сопровождалось афтершоками ($N=220$ с $K_p\geq 5.6$ до конца года) (Прил. 6) и ощущалось с интенсивностью колебаний в 5 баллов в пос. Кумора (20 км). Влияние рифтового поля напряжений сказалось также на продолжавшейся с 2015 г. Гулонгинской сейсмической активизации [14] (в 2020 г. более 500 землетрясений с $K_p\geq 5.6$), локализованной в Икатском хребте, на формировании рассеянной сейсмичности в районе Баргузинского хребта и у истоков р. Ципикан (рис. 8).

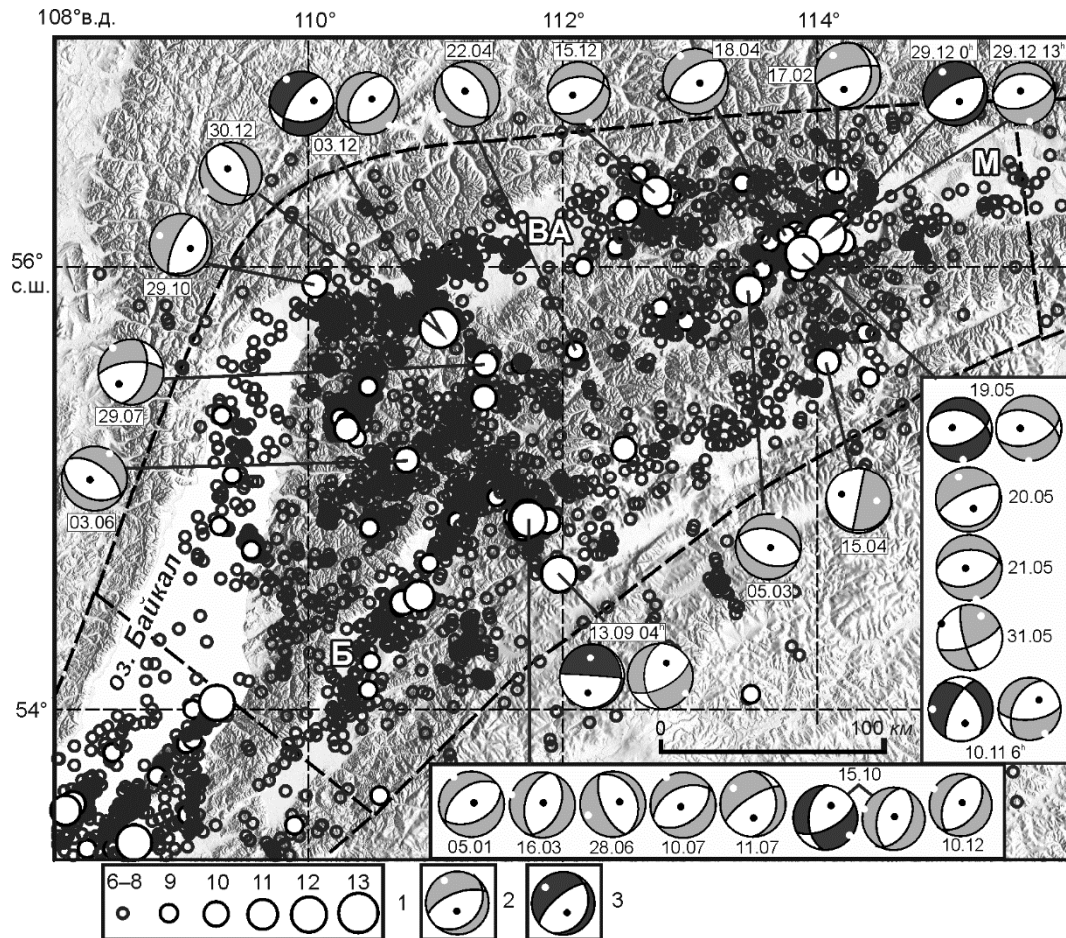


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений Байкало-Муйского района (№ 4 на рис. 2) в 2020 г.

Условные обозначения см. на рис. 2 и 4; буквами на карте обозначены впадины рифтового типа: ВА – Верхне-Ангарская, Б – Баргузинская, М – Муйская.

Отметим, что в обычно слабоактивной акватории Северного Байкала с 15 по 25 мая зарегистрирован компактный рой землетрясений ($N=77$ с $K_p=5.6\text{--}9.3$).

В **Кодаро-Удоканском районе (№ 5)** в 2020 г. отмечаются довольно низкий уровень суммарной сейсмической энергии и слабая рассеянная сейсмичность. Наиболее сильное землетрясение 15 февраля в $09^{\text{h}}29^{\text{m}}$ ($K_p=11.6$) сдвигового типа с небольшой надвиговой составляющей (Прил. 9) зарегистрировано в долине р. Чары вблизи с. Чапо-Олого. Макросейсмические сведения для этого события отсутствуют.

В **Западном Забайкалье (район № 6)** среди преимущественно слабых землетрясений (рис. 2, табл. 1) выделяется событие 3 марта в $07^{\text{h}}16^{\text{m}}$ ($K_p=11.7$), локализованное на левобережье р. Орхон (Монголия). Интенсивность колебаний при нем в г. Закаменске (171 км) составила 3–4 балла (Прил. 10, 12).

Восточное Забайкалье (№ 7) показало невысокий уровень сейсмической активности, однако суммарная сейсмическая энергия за счет двух относительно сильных и нескольких умеренных землетрясений на порядок превысила таковую в предыдущем районе (табл. 1). Самые сильные Мензинские события (по названию р. Менза) произошли 5 ноября в 00^h42^m ($K_p=11.8$, $M_w=4.1$) и в 03^h01^m ($K_p=13.5$, $M_w=4.8$) и входили в состав роя ($N=34$ до конца года) (Прил. 5), локализованного вблизи границы с Монголией. Оба очага характеризовались взбросо-сдвиговыми механизмами, при этом максимальная интенсивность колебаний (4 балла) в с. Архангельское (81 км) и в с. Большая Кудара (150 км) наблюдалась при землетрясении с $M_w=4.8$ (Прил. 9, 10, 12).

Из заметных сейсмических событий района можно отметить два умеренных землетрясения, произошедших южнее г. Улан-Удэ. Одно из них – сбросового типа (рис. 6) – зарегистрировано 21 апреля в 13^h20^m ($K_p=10.7$), другое – 20 июня в 07^h15^m ($K_p=11.0$) (рис. 2). Наибольшая интенсивность колебаний (4 балла) наблюдалась при первом событии в с. Барыкино (27 км), при втором (4–5 баллов) – в с. Куйтун (77 км).

Макросейсмические данные. В течение 2020 г. в Прибайкалье и Забайкалье зарегистрировано 36 ощутимых землетрясений ($K_p=8.4–14.6$). Максимальная наблюденная интенсивность сотрясений, составившая 6–7 баллов, была отмечена при двух сильнейших землетрясениях региона – Быстринском 21 сентября 2020 г. ($M_w=5.6$) [6, 7, 15] и Кударинском 9 декабря 2020 г. ($M_w=5.5$) [9, 16].

Всего в течение года было установлено 770 случаев наблюдения ощутимых эффектов в населенных пунктах или документально подтвержденного отсутствия таковых. Число уникальных точек наблюдения макросейсмических эффектов составило 381. Основной объем данных был получен при наиболее сильных землетрясениях 21 сентября и 9 декабря, а также при их афтершоках. В целом, в 2020 г. было собрано рекордное для региона количество макросейсмических данных. После Быстринского землетрясения 21 сентября посредством онлайн-анкеты было получено 3013 откликов, для Кударинского землетрясения 9 декабря число поступивших анкет составило 1433. Кроме того, немногим более 600 откликов респондентов поступило после землетрясения 6 июля 2020 г. ($K_p=12.1$) с эпицентром на Южном Байкале.

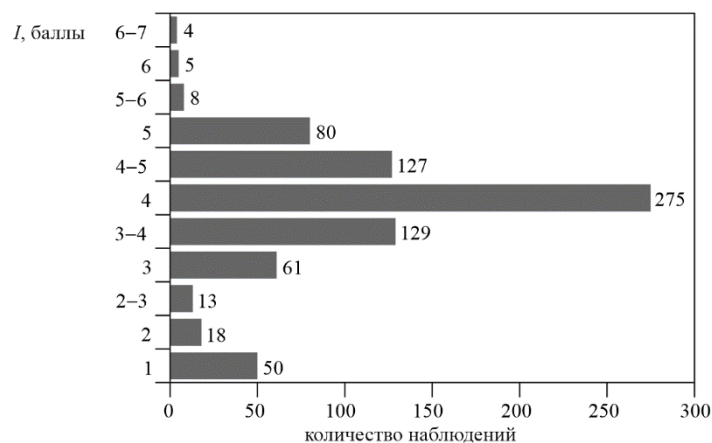


Рис. 9. Количество случаев сотрясений различной интенсивности в течение 2020 г. Интенсивность сотрясений 1 балл означает документально подтвержденное отсутствие ощутимых эффектов

На рис. 9 представлена гистограмма количества случаев макросейсмических эффектов различной интенсивности, наблюдавшихся в регионе в течение года. Наиболее часто отмечались сотрясения интенсивностью 4 балла (275 случаев); вдвое реже наблюдались сотрясения интенсивностью 4–5 и 3–4 балла. Интерес представляет сравнительно небольшое, с учетом общего количества данных, число случаев (50) документально подтвержденного отсутствия ощутимых сотрясений в том или ином пункте. Это обстоятельство, по-видимому, объясняется тем, что среди методов сбора макросейсмических данных в 2020 г. преобладало онлайн-

анкетирование. При отсутствии ощутимых эффектов у очевидцев нет мотивации к заполнению опросного листа без специального обращения или запроса, вследствие чего пункты, в которых землетрясение не проявилось, фактически остаются вне онлайн-обследования [17]. Карта максимальной наблюденной интенсивности сотрясений в Прибайкалье и Забайкалье в 2020 г. представлена в Прил. 12.

Обсуждение и заключение. 2020 г. в Прибайкалье и Забайкалье знаменателен тем, что на территории региона на фоне умеренной сейсмической активности произошли два крупных землетрясения: Быстринское 21 сентября 2020 г. ($M_w=5.6$), локализованное в ранее асейсмичном

районе на востоке Тункинских впадин, и Кударинское 9 декабря 2020 г. ($M_w=5.5$), эпицентр которого приурочен к дельте р. Селенги. Оба события стали сильнейшими в регионе после Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. с $M_w=6.3$ на юге Байкала [18] и ощущались в ближней зоне ($\Delta \leq 19$ км) с интенсивностью колебаний в 6–7 баллов. Отметим, что ощутимые макросейсмические эффекты меньшей интенсивности на территории региона наблюдались еще при 34 землетрясениях с $K_p \geq 8.4$ (Прил. 10, 12).

Реконструкция поля напряжений при Быстринском землетрясении показала, что сдвиговые смещения с надвиговой составляющей в его очаге хорошо согласуются с геодинамикой юго-западного фланга БРЗ [7]. В то же время, при оценке механизма очага Кударинского события выявилась несогласованность «знаковых» и тензорных решений, что, вероятно, связано со сменной кинематики смещений в процессе разрывообразования. В конечном итоге, на формирование очаговой зоны этого землетрясения повлияло типичное для этого района рифтовое поле напряжений.

Известно, что базовая характеристика сейсмотектонического деформирования земной коры БРЗ, где регистрируется большая часть землетрясений региона, связана с устойчивым (в масштабах геологического времени) субгоризонтальным растяжением, ориентированным вкрест простирания основных структурных элементов. Не стал исключением и 2020 г. – в большинстве очагов землетрясений с установленными механизмами в течение года преобладали сбросы, иногда со сдвиговой компонентой смещений. В целом 2020 г. в Прибайкалье и Забайкалье характеризовался умеренной сейсмической активностью, при этом суммарная сейсмическая энергия составила $573 \cdot 10^{12}$ Дж, что примерно в 2 раза превышает аналогичный показатель 2018–2019 гг.

В заключение отметим, что данные о сейсмичности Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г. являются неотъемлемой частью работ, связанных с мониторингом опасных геологических процессов и дальнейшим изучением геодинамики региона.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

В подготовке электронного приложения к данной статье принимали участие Н.С. Архипенко, Г.М. Бахтиярова, С.А. Барсукова, О.А. Борисова, Н.Н. Галактионова, О.А. Грачёва, Л.В. Емельянова, С.А. Ковалёва, Е.С. Комарова, Г.В. Курилко, Н.А. Лукаш, Е.В. Мазаник, Ю.А. Меньшикова, С.В. Ныrkова, А.А. Папкова, М.А. Подпругина, С.Г. Пойгина, П.А. Предеин, Д.П.-Д. Санжиева, Т.Е. Сенотрусова, А.А. Ситникова, Е.Н. Терёшина, Ц.А. Тубанов, Я.И. Федюшкина, Л.Р. Цыдыпова.

Электронное приложение App07_Baykal_2020 (<http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>): 1 – Сейсмические станции Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (BAGSR) в 2020 г.; 2 – Сейсмические станции Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН (BUGSR) в 2020 г.; 3 – Каталог землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2020 г.; 4 – Каталог землетрясений района Быстринской последовательности с землетрясением 21 сентября 2020 г. с $M_w=5.6$, $K_p=14.6$, $I_0=8$; 5 – Каталог землетрясений района Мензинской последовательности с землетрясением 5 ноября 2020 г. с $M_w=4.8$, $K_p=13.5$, $I_0=7$; 6 – Каталог землетрясений района последовательности с землетрясением 3 декабря 2020 г. с $M_w=4.6$, $K_p=12.8$, $I_0=6-7$; 7 – Каталог землетрясений района Кударинской последовательности с землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w=5.5$, $K_p=14.0$, $I_0=7-8$; 8 – Каталог землетрясений района последовательности с землетрясением 29 декабря 2020 г. с $M_w=4.8$, $K_p=12.9$, $I_0=6-7$; 9 – Механизмы очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г.; 10 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений в населенных пунктах Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г.; 11 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2020 г.; 12 – Карта максимальной наблюдаемой интенсивности сотрясений в Прибайкалье и Забайкалье в 2020 году.

Л и т е р а т у р а

1. Гилёва Н.А., Хритова М.А. Состояние и перспективы детальной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 77–99. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.06> EDN: SSNWGI
2. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Курушин Р.А., Масальский О.К., Шлаевская Н.С. Выделение условных районов для ежегодных обзоров сейсмичности региона Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: Изд-во ФООП, 2003. – С. 107–117. EDN: VBAGBP

3. Гилёва Н.А., Хритова М.А. Фактическая представительность регистрации землетрясений на территории Байкальской рифтовой зоны // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 34. EDN: HOLVWR
4. Ландер А.В. Программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 года.
5. Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 103–114. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002333714030090> EDN: SAIOJP
6. 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. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-4>. EDN: BBDWFE
7. Filippova A.I., Bukchin B.G., 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. – P. 229162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162> EDN: DQTPV
8. Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 5. – С. 629–636. EDN: TAJRNL
9. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. ($M_w=5.5$) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2021. – Т. 48, № 4. – С. 32–47. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2021.4-2> EDN: HJEMXK
10. Голенецкий С.И., Ружич В.В., Дреннова Г.Ф., Емельянова И.А. Ощутимые и сильные землетрясения района дельты Селенги и толчок 13 июля 1993 г. // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 4–5. – С. 215–223.
11. Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $K_p=14.3$, $M_w=5.3$, $I_0=7$ (Центральный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 337–345. EDN: MCGVQH
12. Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Муяканская последовательность землетрясений в 2015 г. (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.24> EDN: NCXKNJ
13. Melnikova V.I., Filippova A.I., Gileva N.A. The Muyakan Earthquake Sequence in the North Muya Region of the Baikal Rift Zone: Detailed Analysis and Possible Reasons // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – V. 179, N 9. – P. 3157–3175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03124-7>
14. Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И. Сильные землетрясения Северного Прибайкалья ($M_w=4.6–4.7$) в 2015 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 276–290. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.27> EDN: ZYHTQB
15. Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Кадетова А.В., Гилёва 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. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-3> EDN: BCLMUP
16. Radziminovich Y.B., Gileva N.A., Tubanov T.A., Likhneva 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, N 3. – P. 1297–1324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8> EDN: EVMQWQ
17. 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. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2023.3-6> EDN: QJBDVN
18. Мельникова В.И., Гилёва 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. DOI: <https://doi.org/10.7868.S0002333713040078> EDN: QBRFOB

SEISMICITY of the BAIKAL REGION and TRANSBAIKALIA in 2020**V.I. Melnikova^{1,2}, N.A. Gileva², Ya.B. Radziminovich², A.I. Filippova³, E.A. Kobeleva²**¹*Institute of the Earth's Crust of SB RAS, Irkutsk, vimel@crust.irk.ru*²*Baikal Branch of GS RAS, Irkutsk, nagileva@crust.irk.ru*³*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Moscow, Troitsk, ale@izmiran.ru*

Abstract. We consider a character of the seismic process in the Baikal region and Transbaikalia in 2020. A total number of registered earthquakes with $K_R \geq 5.6$ was 7711. Most of them (94 %) occurred in the Baikal rift zone where the South Baikal and Baikal-Muya regions were the most active (by number of earthquakes). The strongest seismic events – the September 21, 2020 Bystraya ($M_w=5.6$) and December 9, 2020 Kudara ($M_w=5.5$) earthquakes – were localized in the Hovsogol-Tunka and South Baikal regions respectively. Both events in the near-field zone ($\Delta \leq 19$ km) were felt with an intensity of 6–7. Noticeable macroseismic effects with less intensity were observed from another 34 earthquakes with $K_R \geq 8.4$. Focal mechanisms were determined for 77 earthquakes ($K_R \geq 9.1$) using two methods: from *P*-wave first-arrival polarities on regional seismic stations and during calculations of a seismic moment tensor (in a double-couple approximation) based on surface wave amplitude spectra. It has been shown that normal fault movements, which are often combined with strike-slips, are dominated in sources of regional earthquakes. In general, the region is characterized by moderate seismic activity in 2020, total seismic energy is estimated as $573 \cdot 10^{12}$ J that is two times higher than the same parameter calculated in 2018–2019.

Key words: seismicity, earthquake focal mechanism, macroseismic data, Baikal rift zone.

For citation: Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, Ya.B., Filippova, A.I., & Kobeleva, E.A. (2024). [Seismicity of the Baikal Region and Transbaikalia in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 135–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.12> EDN: GRYAKE

R e f e r e n c e s

1. Gileva, N.A., & Khritova, M.A. (2023). [Condition and prospects of detailed processing of earthquakes of the Baikal region and Transbaikalia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 77–99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.06> EDN: SSNWGI
2. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Kurushin, R.A., Masalsky, O.K., & Shlaevskaya, N.S. (2003). [Allocation of conditional areas for annual reviews of seismicity in the Baikal and Transbaikal regions]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 1997] (pp. 107–117). Obninsk, Russia: FOP Publ. (In Russ.).
3. Gileva, N.A., & Khritova, M.A. (2022). [Actual representativeness of earthquake registration on the territory of the Baikal rift zone]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: Tezisy XVI Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Proceedings of the XVI International Seismological Workshop] (p. 34). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: HOLVWR
4. Lander, A.V. (2018). [The program for calculating and graphically representing the mechanisms of earthquake sources by the signs of the first arrivals of P-waves (FA)]. Certificate of state registration of the computer program № 2018662004. (In Russ.).
5. Seredkina, A.I., & Melnikova, V.I. (2014). Seismic moment tensor of Pribaikalye earthquakes from the surface-wave amplitude spectra. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(3), 403–414. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351314030094>
6. Gileva, N.A., Kobeleva, E.A., Radziminovich, Y.B., Melnikova, V.I., & Chechelnskiy, V.V. (2021). The September 21, 2020, $M_w=5.5$, Bystraya earthquake in the Southern Baikal Region: preliminary results of instrumental and macroseismic observations. *Seismic Instruments*, 57(2), 173–186. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923921020237>
7. Filippova, A.I., Bukchin, B.G., Fomochkina, A.S., Melnikova, V.I., Radziminovich, Y.B., & Gileva, N.A. (2022). 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*, 822, 229162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162>
8. Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Radziminovich, N.A., & Deverchere, J. (2000). Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 41(5), 609–615.
9. Tubanov, Ts.A., Sanzhieva, D.D., Kobeleva, E.A., Predein, P.A., & Tsydypova, L.R. (2022). Kudara earthquake of September 12, 2020 ($M_w=5.5$) on Lake Baikal: Results of instrumental and macroseismic observations. *Seismic Instruments*, 58(1), 86–98. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923922010108>

10. Golenetskii, S.I., Ruzhich, V.V., Drennova, G.F., & Emelyanova, I.A. (1995). [Felt and strong earthquakes in the Selenga delta area and the shock of July 13, 1993]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 4–5, 215–223. (In Russ.).
11. Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Radziminovich, Ya.B., & Seredkina, A.I. (2014). [Maksimikha earthquake on May 20, 2008 with $K_R=14.3$, $M_W=5.3$, $I_0=7$ (Central Baikal)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2008 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 337–345). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
12. Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Filippova, A.I., Radziminovich, Y.B., & Kobleleva, E.A. (2021). [Muyakan earthquake sequence in 2015 (Northern Baikal Region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 245–257. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.24> EDN: NCXKNJ
13. Melnikova, V.I., Filippova, A.I., & Gileva, N.A. (2022). The Muyakan Earthquake Sequence in the North Muya Region of the Baikal Rift Zone: Detailed Analysis and Possible Reasons. *Pure and Applied Geophysics*, 179(9), 3157–3175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03124-7>
14. Radziminovich, Ya.B., Melnikova, V.I., Gileva, N.A., & Filippova, A.I. (2021). [Strong earthquakes in the north of the Lake Baikal region ($M_W=4.6-4.7$) in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 276–290. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.27>
15. Radziminovich, Y.B., Novopashina, A.V., Likhneva, O.F., Kadetova, A.V., & Gileva, N.A. (2022). Detailed macroseismic survey and rational approach to seismic intensity assessment within the territory of a large city: case study of the consequences of the September 21, 2020 Bystraya earthquake in Irkutsk. *Seismic Instruments*, 58(4), 409–423. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923922040089>
16. Radziminovich, Y.B., Gileva, N.A., Tubanov, T.A., Likhneva, O.F., Novopashina, A.V., & Tsydypova, L.R. (2022). 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*, 20(3), 1297–1324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8>
17. Likhneva, O.F., Radziminovich, Y.B., Novopashina, A.V., & Kadetova, A.V. (2023). Use of Modern Communication Technologies during Earthquakes: How to Increase the Efficiency of Macroseismic Data Collection. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 59(11), 1651–1662. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433823100067>
18. Melnikova, V.I., Seredkina, A.I., Gileva, N.A., Arefyev, S.S., & Bykova, V.V. (2013). The August 27, 2008, $M_W=6.3$ Kultuk earthquake (South Baikal): the stress-strain state of the source area from the aftershock data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(4), 563–576. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351313040071>