

УДК 550.834

О ВЛИЯНИИ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2021 ГОДА НА СЕЙСМИЧНОСТЬ СТЫКА АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ С БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНОЙ

© 2024 г. А. Ф. Еманов^{а, *}, А. А. Еманов^{а, b}, В. В. Чечельницкий^b,
Е. В. Шевкунова^а, А. В. Фатеев^{а, с}, Е. А. Кобелева^b,
П. О. Полянский^а, М. В. Фролов^а, И. Ф. Ешкунова^а

^аАлтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба Российской академии наук”,
просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^бБайкальский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба
Российской академии наук”, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

^сИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук,
просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: Emanov@gs.nsc.ru

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 21.08.2024 г.

Рассматривается вопрос о влиянии крупного Хубсугульского землетрясения 2021 г., $M_L = 6.9$ на сейсмичность блоковой структуры района сочленения Алтае-Саянской горной области и Байкальской рифтовой зоны. Исследования выполняются с использованием данных сетей сейсмологических станций Алтае-Саянского и Байкальского филиалов Единой геофизической службы РАН, а также сейсмологических станций Монголии. Показано развитие сейсмического процесса около границ Тувино-Монгольского блока и прилегающих блоков Восточной Тувы. Установлена и изучена очаговая зона Дархадского роя землетрясений, сформировавшаяся в 2022–2023 гг. в виде нескольких серий событий, наиболее сильные из которых имели магнитуду $M_L > 5$. Одновременно с активизацией очаговой области Хубсугульского землетрясения наблюдается высокая сейсмическая активность очаговых областей крупных землетрясений прошлых лет: Бусингольского 1991 г., Тувинских 2011–2012 гг. Белин-Бий-Хемского 2008 г. Воздействие Хубсугульского землетрясения на сейсмичность пограничных блоков Алтае-Саянской и Байкальской зон отличается от воздействия Чуйского землетрясения 2003 г. на сейсмичность Алтая.

Ключевые слова: Тувино-Монгольский блок, крупные землетрясения, афтершоки, Хубсугульское землетрясение

DOI: 10.31857/S0203030624060047, EDN: HZCUUI

ВВЕДЕНИЕ

Анализ некоторых характеристик сейсмического режима Алтае-Саянской горной области по каталогам землетрясений двадцатого века [Еманов и др., 2001, 2021] показал их изменения в период крупных землетрясений и восстановление до близких к исходным параметров в течение нескольких лет, а также были установлены плавные вариации параметров во времени.

При этом не были выяснены причины и природа этих вариаций.

В данной работе рассматривается вопрос о влиянии на сейсмичность региона Хубсугульского землетрясения 2021 г., $M_L = 6.9$ [Еманов и др., 2022, 2023а, 2023б]. Оно вызвало мощный афтершоковый процесс, основными закономерностями которого являются активизация структуры разломов в начальный момент

и ее пространственно-временные изменения в 2021–2022 гг. Одновременно с протеканием афтершокового процесса наблюдается сейсмическая активизация границ блоковой структуры стыка Байкальской рифтовой зоны и Алтае-Саянской горной области [Еманов и др., 2023а, 2023б].

Воздействие этого землетрясения на земную кору изучалось не только по сейсмологическим данным [Тимошкина и др., 2022; Овсяченко и др., 2023; Davaasambuu Battogtokh и др., 2023]. В частности, по временным рядам GPS-станции IRKM (Иркутск), находящейся на расстоянии 287 км от эпицентра землетрясения, зарегистрированы аномально большие амплитуды пространственного смещения станции [Лухнев и др., 2022]. При этом сильные афтершоки первого дня не заметны на непрерывных рядах. Эти экспериментальные данные говорят о заметном влиянии Хубсугульского землетрясения на земную кору на удалениях в сотни километров.

Выявленные особенности сейсмического режима кардинально отличаются от развития сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г., $M_S = 7.3$ [Еманов и др., 2003, 2017, 2023в]. После Чуйского землетрясения на Алтае основной объем выделившейся сейсмической энергии сразу сосредоточился в его эпицент-

тральной области. Сейсмичность остального Алтая до своего прежнего уровня восстанавливалась десятилетия, при этом произошли заметные изменения в конфигурации зон сосредоточения эпицентров землетрясений относительно периода до Чуйского землетрясения. Это может свидетельствовать о значимом различии в пространственно-временных связях при развитии сейсмичности в существенно разных геодинамических режимах Алтая и юго-западного окончания Байкальской рифтовой зоны.

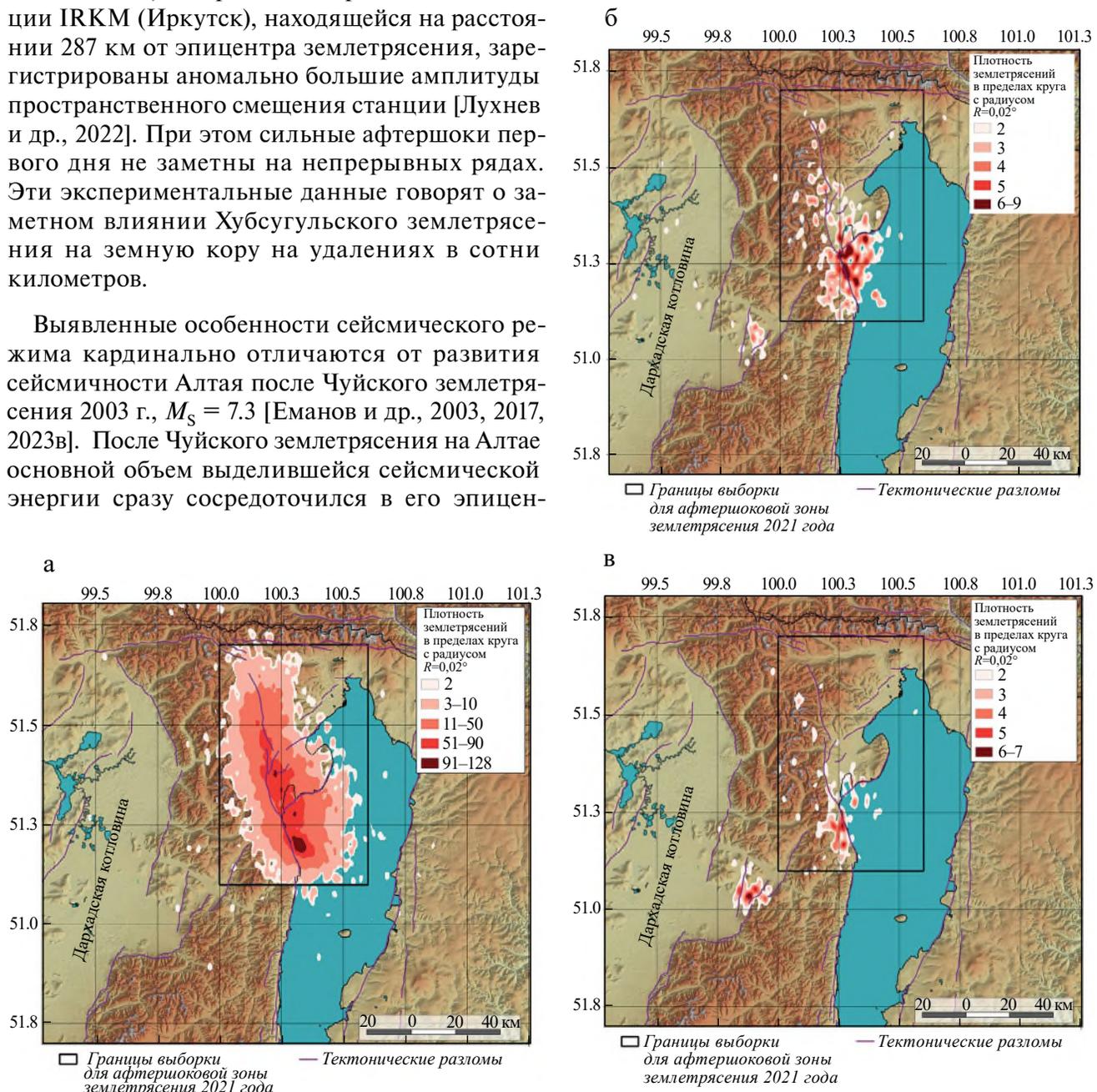


Рис. 1. Карты плотности землетрясений в эпицентральной области Хубсугульского землетрясения за 2021, 2022 и 2023 гг. (а, б и в соответственно). Не отображены площадки с одним землетрясением.

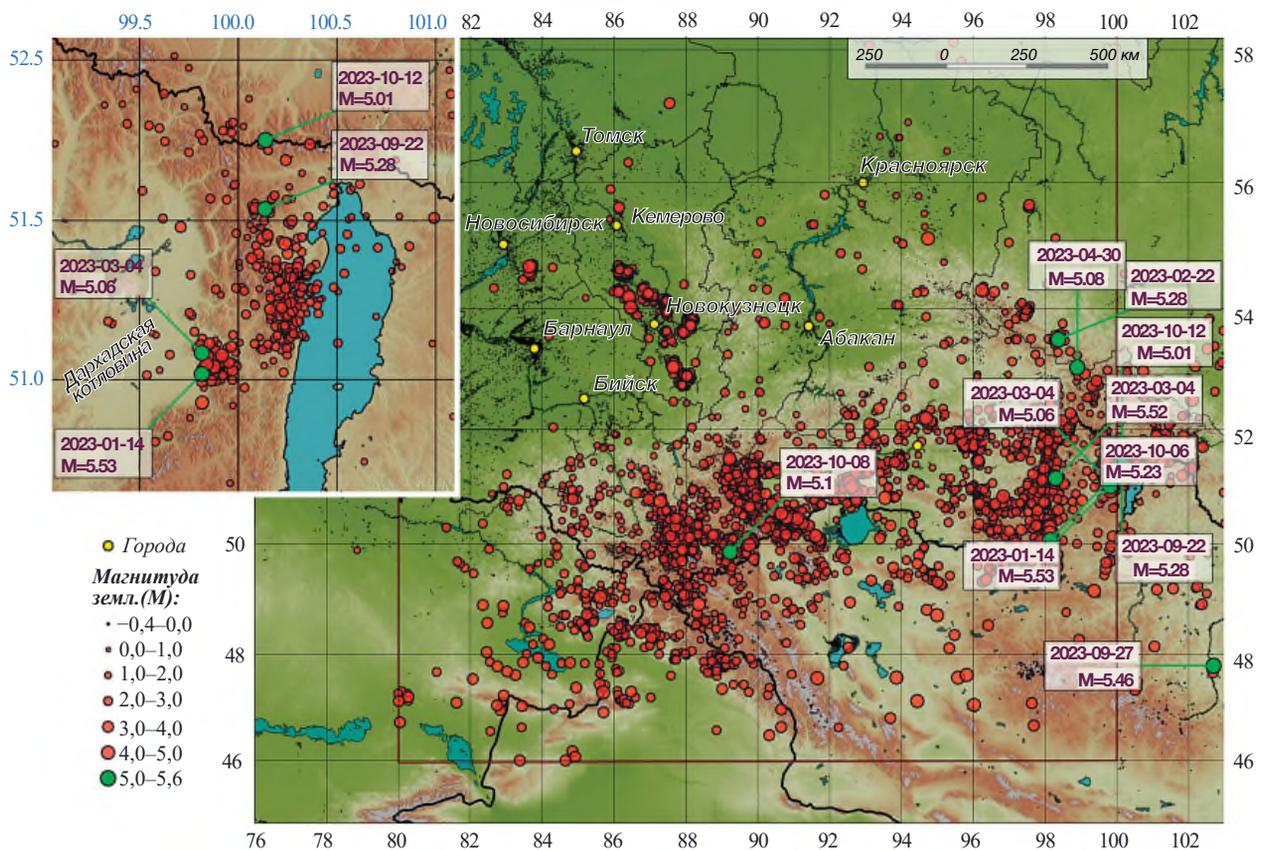


Рис. 2. Карта эпицентров Алтае-Саянской горной области в 2023 г. Врезка – район Хубсугульского землетрясения.

ХУБСУГУЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2021 г. И ДАРХАДСКИЙ РОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследование афтершокового процесса Хубсугульского землетрясения до середины 2022 г. представлено в работе [Еманов и др., 2023б], на более ранних стадиях развития – в [Еманов

и др., 2022, 2023а]. В данной работе сделана попытка обнаружить изменения в сейсмичности смежных структур. В 2021 г. (рис. 1а) наблюдается интенсивный афтершоковый процесс непосредственно в эпицентральной зоне землетрясения. В 2022 г. (см. рис. 1б) в Дархадской впадине появился рой землетрясений, заметно усилившийся в 2023 г. (см. рис. 1в).

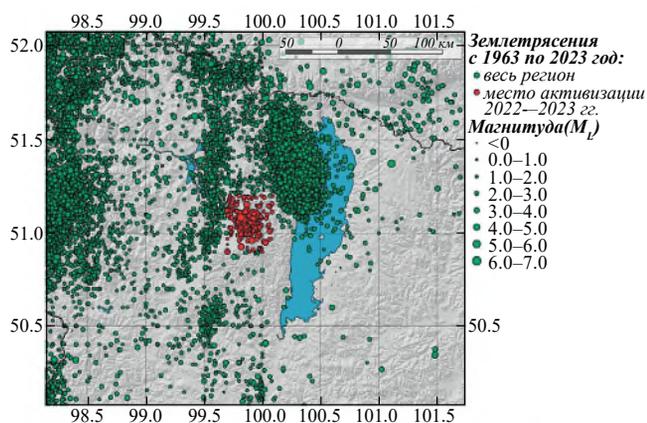


Рис. 3. Карта землетрясений западной окраины Байкальской рифтовой зоны в 1963–2023 гг. Красным цветом показан Дархадский рой землетрясений.

Самые крупные землетрясения Алтае-Саянской горной области в 2023 г. имеют локальные магнитуды в интервале 5.0–5.53, большинство из них произошли в районе эпицентральной зоны Хубсугульского землетрясения 2021 г. и смежных структурах (рис. 2). При этом в афтершоковой области Хубсугульского землетрясения зафиксировано лишь одно событие с $M_L > 5$, на ее северо-западном окончании. В Дархадском рою землетрясений таковых два, и одно из них, с $M_L = 5.53$, является сильнейшим землетрясением всей Алтае-Саянской горной области в 2023 г. Близкое по энергии землетрясение с $M_L = 5.52$ произошло в очаговой области Бусингольского землетрясения 1991 г., которая

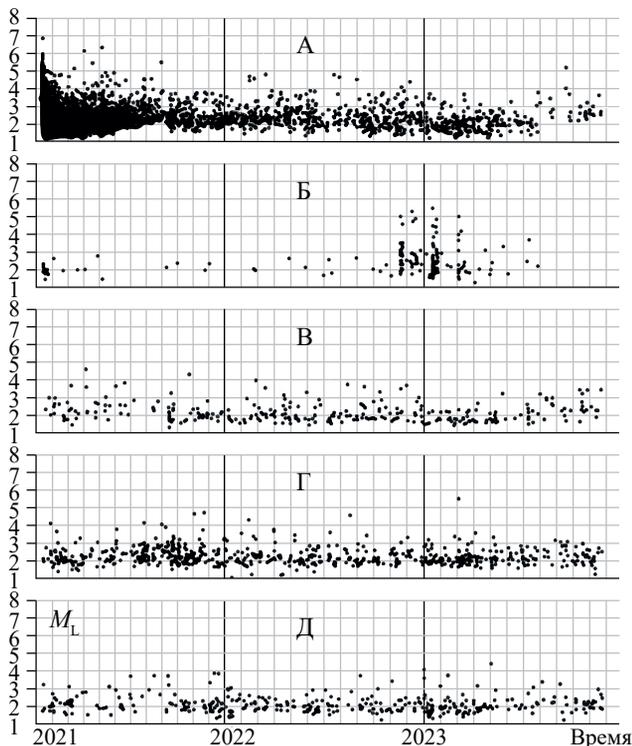


Рис. 4. Развитие сейсмического процесса в элементах блочной структуры Тувино-Монгольского блока после Хубсугульского землетрясения 2021 г. А – эпицентральная зона Хубсугульского землетрясения 2021 г.; Б – Дархадский рой землетрясений; В – эпицентральная зона Белин-Бий-Хемского землетрясения 2008 г.; Г – эпицентральная зона Бусингольского землетрясения 1991 г.; Д – эпицентральная зона Тувинских землетрясений 2011–2012 гг.

находится в 250 км от эпицентра Хубсугульского землетрясения [Еманов и др., 2023].

Дархадский рой землетрясений, в 2023 г. характеризующийся большим количеством землетрясений, в том числе с $M_L > 5$, возник на территории, в прежние годы совершенно сейсмически не активной (рис. 3). Фактически, через год после Хубсугульского землетрясения сформировалась новая сейсмически активная структура, которая по выделившейся сейсмической энергии превзошла эпицентральную область крупного землетрясения, вероятно, сыгравшего определенную роль в ее возникновении.

На рис. 4 представлено развитие во времени Дархадского роя землетрясений. Сейсмический процесс выглядит, как серии землетрясений в короткие интервалы времени, с наиболее

сильными событиями до $M_L = 5$ и интервалами пониженной активности между ними. Дархадский рой землетрясений является единственным на сегодняшний момент значимым изменением сейсмичности тектонических структур в ближней зоне Хубсугульского землетрясения.

При этом после Хубсугульского землетрясения продолжают быть сейсмически активными очаговые области других сильных землетрясений блочной структуры рассматриваемого района, что кардинально отличается от развития сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. Активизирована вся блочная структура, наиболее сейсмоактивной является эпицентральная зона Хубсугульского землетрясения (см. рис. 4).

В статье [Еманов и др., 2023а] показано, что в 2021–2022 гг. в данном регионе Хубсугульскому землетрясению сопутствовала сейсмическая активизация границ блоковой структуры Тувино-Монгольского блока и прилегающих к ней блоков Восточной Тувы (Тувинского нагорья).

На рис. 5 блочная структура стыка Байкальской рифтовой зоны и Алтае-Саянской складчатой области хорошо выражена в представлении суммарной сейсмической энергии. Активизация распространяется шире межблоковых границ, что указывает на существование сеймотектонических процессов в приграничных участках блоков. Наиболее заметны эпицентральные области Хубсугульского землетрясения 2021 г., Бусингольского землетрясения

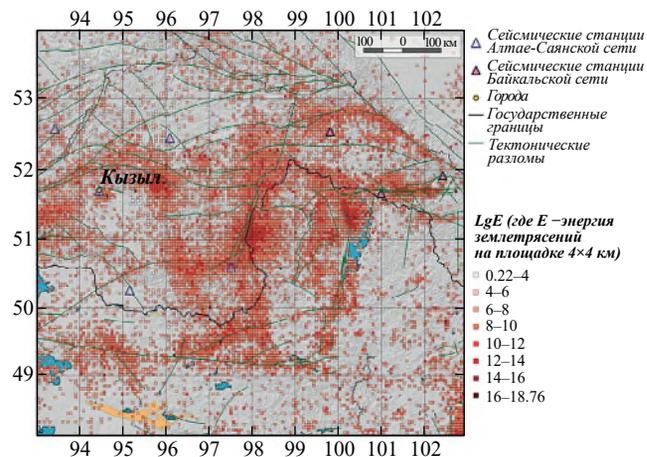


Рис. 5. Карта суммарной сейсмической энергии для блочной структуры Восточной Тувы и Западного Прибайкалья за 1905–2023 гг.

1991 г. и Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. (рис. 6). Хорошо различим и Дархадский рой землетрясений: он разместился между протянувшейся по центру Дархадской впадины полосой землетрясений и очаговой областью Хубсугульского землетрясения 2021 г. Положение роя землетрясений (см. рис. 1, 2) соответствует расширению впадины в сторону горной перемычки между Хубсугульской и Дархадской котловинами. Именно здесь сходятся под углом два горных хребта, составляющую перемычку между впадинами. Между роем землетрясений и афтершоковой областью Хубсугульского землетрясения протянулось тектоническое нарушение, отделяющее друг от друга слагающие перемычку хребты.

На рис. 6 представлена карта эпицентров землетрясений за 2023 г. Это относительно небольшой интервал времени, однако основные элементы блоковой структуры хорошо

определяются по положению эпицентров. Обращаясь к рис. 2 и 6, можно видеть наиболее активные элементы структуры, где расположены очаговые области Хубсугульского землетрясения 2021 г. с $M_L = 6.9$, Тувинских 2011 г. с $M_L = 6.7$ и 2012 г. с $M_L = 6.8$, и Бусингольского 1991 г. с $M_S = 6.5$. Выделяется субмеридиональная Белино-Бусингольская область сейсмической активности, сложенная из вытянутых в линию рифтовых впадин западного окончания Байкальской рифтовой зоны. К этой зоне сейсмической активности принадлежит Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г. с $M_W = 5.7$.

До 2021 г. в восточной части блоковой структуры заметной сейсмической активности не наблюдалось. О том, что в Хубсугульской впадине обязательно возникнет сейсмическая активизация, было высказано мнение задолго до ее появления [Кочетков и др., 1993].

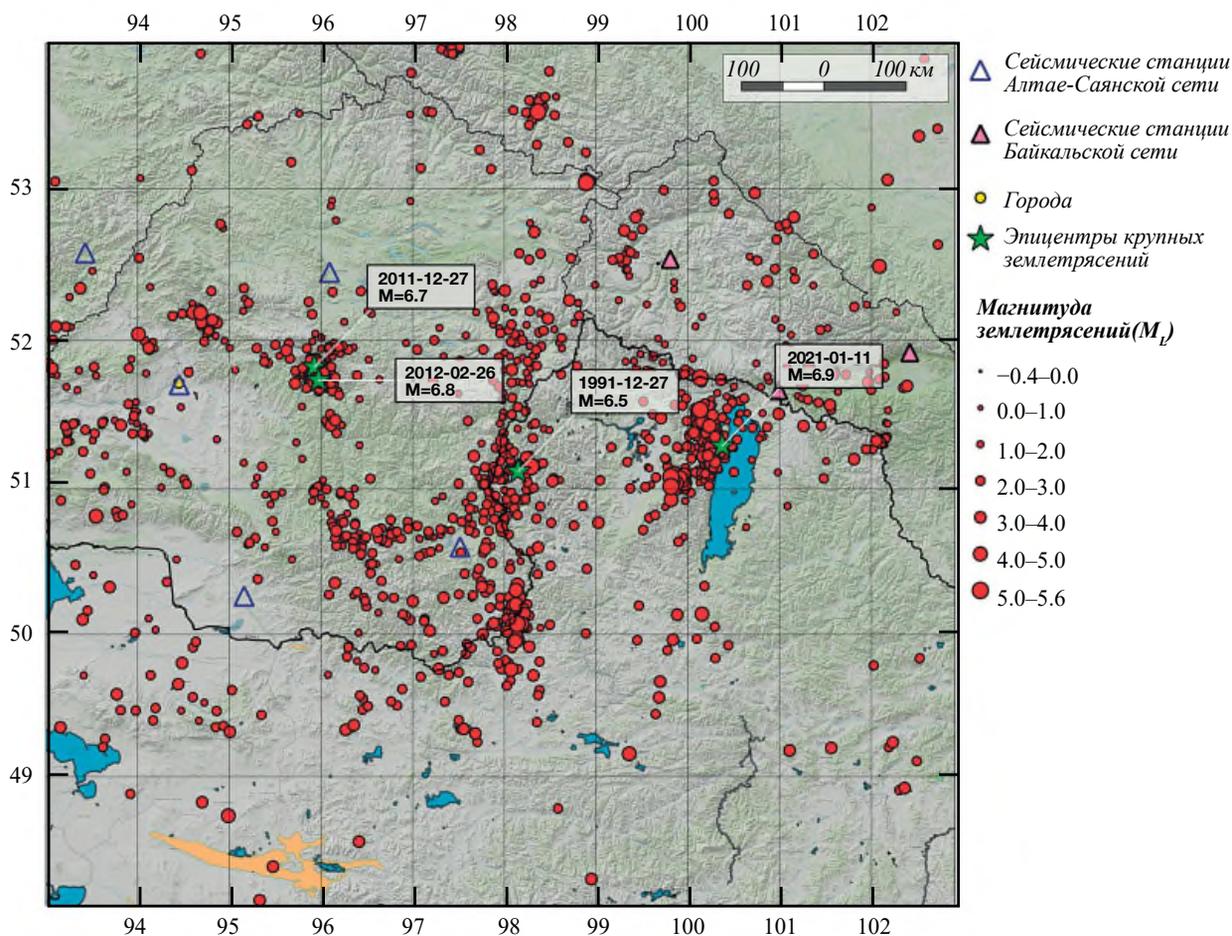


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Восточной Тувы и Западного Прибайкалья в 2023 г.

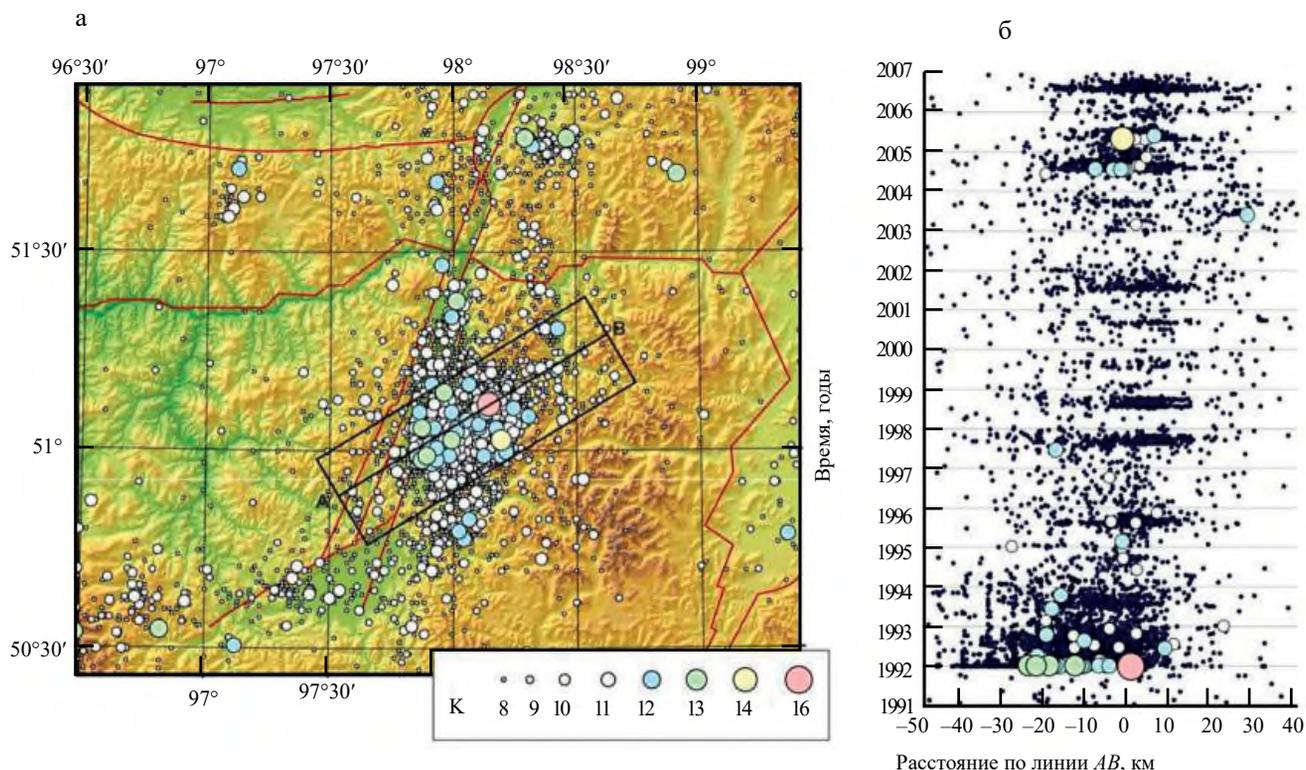


Рис. 7. Развитие сейсмического процесса в очаге Бусингольского землетрясения 1991 г.

а — карта эпицентров землетрясений района Бусингольского землетрясения; б — пространственно-временное развитие афтершокового процесса вдоль оперяющего разлома. Снос событий выполнен на центральную линию прямоугольника (см. рис. 7а) по перпендикуляру со всей площади прямоугольника.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ ТУВИНО-МОНГОЛЬСКОГО БЛОКА И СМЕЖНЫХ СТРУКТУР

В рамках данной работы мы рассмотрим сходство и различие сейсмических процессов, вызванных крупнейшими землетрясениями вышеописанной блоковой структуры.

Бусингольские землетрясения 1976 и 1991 гг.

Розовым цветом на рис. 7 обозначен эпицентр Бусингольского землетрясения 1991 г. Вдоль Бусингольской впадины проходит граница Тувино-Монгольского и Саяно-Тувинского блоков, и в другом масштабе объектов — граница Байкальской рифтовой зоны с Алтае-Саянской горной областью. По этой впадине проходит Бусингольский разлом, к которому в большинстве публикаций приурочивают сейсмичность этого района [Кочетков и др., 1993; Демьянович и др., 2008; Еманов и др., 2006]. В работе [Еманов и др., 2006] выполнен анализ пространственно-временного распределения сейсмичности со сносом вдоль

Белинской и Бусингольской впадин для интервала времени с 1963 по 2001 гг. Был выявлен пульсирующий характер афтершокового процесса после Бусингольского землетрясения 1991 г. На территории этой впадины до 1991 г. трижды происходили синхронные активизации по всей длине: две слабые активизации в шестидесятые годы и ещё одна после Бусингольского землетрясения 1976 г. [Адьяа, 1988], но даже при этом землетрясении афтершоковый процесс не имел никаких пульсаций и быстро затух. Отличие Бусингольских землетрясений 1976 и 1991 гг. (рис. 8) прежде всего в том, что первое из них произошло во впадине на главном разломе, а второе — на оперяющем разломе, уходящем от впадины в Шишихидское нагорье в северо-восточном направлении. Казалось бы, пространственно близкие друг к другу землетрясения, но в отличие от более раннего, землетрясением 1991 г. был запущен сейсмический процесс в аномальном режиме на десятилетия.

Пульсации активности делают активизацию, вызванную Бусингольским землетрясением

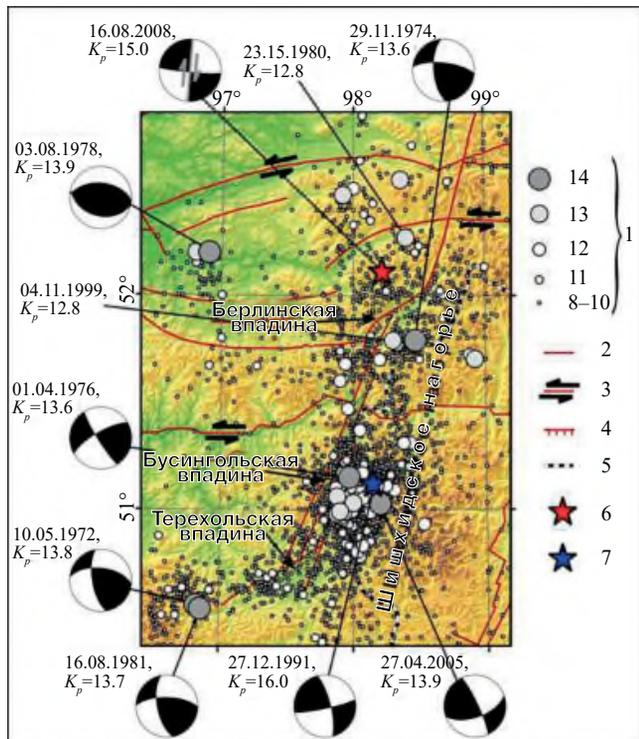


Рис. 8. Эпицентры землетрясений Белино-Бусингольской зоны с $K_p \geq 8$ за период 1963–2007 гг. и Белин-Бий-Хемского землетрясения 16.08.2008 г. 1 – энергетический класс K_p ; 2 – разлом (по ГИН РАН, под ред. Ю.Г. Леонова); 3 – сдвиги (по [Кочетков и др., 1993]); 4 – сбросы (по [Парфеев, Саньков, 2006]); 5 – государственная граница; 6 – эпицентр Белин-Бий-Хемского землетрясения 2008 г.; 7 – эпицентр Бусингольского землетрясения 1991 г.

1991 г., уникальным явлением. Наличие смещений пульсаций по разлому (см. рис. 7) позволяет делать вывод, что мы имеем дело с пространственным изменением очаговой области землетрясения. Что это такое? В изучении афтершоков выделялось такое понятие, как афтершоки развития [Шебалин, 1997; Арефьев, 2003]. В данном случае крупное землетрясение привело к активизации разломной структуры, длящейся десятилетия, что не укладывается в рамки традиционных представлений об афтершоковых последовательностях.

На рис. 9 представлено развитие сейсмического режима в очаговой области Бусингольского землетрясения 1991 г. с охватом периода афтершокового процесса Хубсугульского землетрясения 2021 г. Снос событий выполнен на линии вдоль и поперек перпендикуляров на рис. 7 в рамках прямоугольника. Следует

отметить, что примерно в 2009 г. произошло изменение режима сейсмичности очаговой области. Район по-прежнему характеризуется высокой сейсмичностью, но кратковременные пульсации активности прекратились. Повышенная активность сменяется более спокойными периодами, при этом протяженность их сопоставима.

Следует отметить, что после Хубсугульского землетрясения 2021 г. очаговая область Бусингольского землетрясения претерпела повышение сейсмической активности, и в 2023 г. в ней произошло землетрясение с $M_L = 5.52$, превышающее по энергии в 2023 г. любое землетрясение в афтершоковой области Хубсугульского землетрясения и практически равное по энергии сильнейшему землетрясению в Дархадском землетрясении. Расстояние между Хубсугульским 2021 г. и Бусингольским 1991 г. землетрясениями около 250 км, и на таком удалении вполне возможно взаимное влияние очаговых областей друг на друга. К тому же оба землетрясения приурочены к границам Тувино-Монгольского блока: Бусингольское землетрясение около западной, а Хубсугульское – около восточной его границы.

Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г.

В целом Белино-Бусингольская зона была сейсмически активной весь период инструментальных наблюдений, и анализ сейсмичности

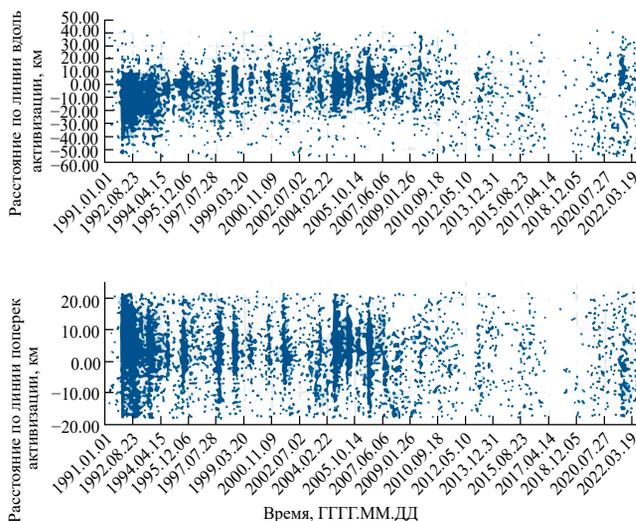


Рис. 9. Развитие сейсмического процесса в очаговой области Бусингольского землетрясения 1991 г. с 1991 по 2023 гг.

этой зоны можно найти в работах [Кочетков и др., 1993; Опарин и др., 2008]. В частности, здесь произошло Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г., $M_W = 5.7$, $K_p = 15$ [Еманов и др., 2014a], эпицентральная зона которого сейсмически активна одновременно с афтершоковым процессом Хубсугульского землетрясения.

На карту (см. рис. 8) нанесены механизмы очагов землетрясений с $K_p > 13.5$ в проекции нижней полусферы: для событий 1972–1981 гг. — по [Мострюков, Петров, 1994], для 1991 г. — по [Опарин и др., 2008], 2005 г. — определения авторов, 2008 г. — [Еманов и др., 2014a]. Для механизма очага Белин-Бий-Хемского землетрясения серым цветом выделена реализовавшаяся плоскость разрыва с подвижкой по ней (см. рис. 8).

Таким образом, Белин-Бий-Хемское землетрясение 2008 г. является крупнейшим событием в окрестности Белинской впадины за весь период инструментальных наблюдений (с 1963 г.). По величине сейсмической энергии в Белино-Бусингольской зоне оно уступает только Бусингольскому землетрясению 1991 г.

Из анализа сейсмотектоники данного района [Солоненко и др., 1993; Мельникова и др., 2009] был сделан вывод о том, что растягивающее поле напряжений, соответствующее рифтовому режиму, находится в окружении общерегионального режима сжатия, имеющего северо-восточную ориентацию. На флангах рифтовой системы наблюдается взаимопроникновение “рифтового” и “общерегионального” полей напряжений. При этом фокальные механизмы сильных землетрясений Белино-Бусингольской зоны с $K_p > 13.5$ (см. рис. 8) отражают преимущественно сдвиговую подвижку в очаге с небольшой взбросовой компонентой, что характерно для общерегионального режима сжатия.

Эпицентр Белин-Бий-Хемского землетрясения находится в горном блоке, границами которого являются с северной стороны р. Большой Енисей (Бий-Хем), текущая вдоль ограничивающего данный блок тектонического нарушения, а с юга — Белинская впадина. Афтершоковый процесс развивался поперёк главных разломов [Еманов и др., 2014a]. Северная граница имеет сдвиговую кинематику, а с юга — растяжение вдоль длинной оси впадины, что фактически должно приводить к сжатию рассматриваемого блока. Как установлено

по сейсмотектонике, для данного района характерным является строение в виде системы блоков с вращением [Парфеев, Саньков, 2006]. Все сдвиговые смещения блоков дополняются вращением [Еманов и др., 2014a]. В данном случае достаточно вытянутый к востоку блок, однородный по скорости поднятия [Зятыкова, 1977], должен иметь поперечные разрывные нарушения, обеспечивающие фиксируемые по геологическим данным вращения.

В целом Белинская впадина имеет сложную изогнутую структуру, к изгибам которой приурочены крупнейшие землетрясения с их афтершоками. На южном окончании Белинская впадина огибает блок Шишхидского нагорья, выдвинутый к западу (см. рис. 8). К этому блоку приурочены землетрясения 1974 г. ($M_S = 5.2$, $K_p = 13.6$) и 1999 г. ($M_S = 5.0$, $K_p = 12.8$), а их афтершоковые процессы развиваются вдоль оперяющего разлома, секущего выдвинутый блок [Еманов и др., 2010].

Тувинские землетрясения 2011 и 2012 гг.

Ещё одним примером проявления высокой сейсмической активности в рассматриваемом регионе являются Тувинские землетрясения (27 декабря 2011 г., $M_L = 6.7$ и 26 февраля 2012 г., $M_L = 6.8$), произошедшие с интервалом в два месяца и сформировавшие общую афтершоковую область (рис. 10).

В Восточной Туве выполнены палеосейсмологические исследования [Аржанников, Зеленков, 1995; Аржанников, 2003; Овсяченко и др., 2016, 2017; Хромовских и др., 1996]. Определен потенциал многих зон, в частности для Каахемского разлома, к которому приурочены Тувинские землетрясения 2011 и 2012 гг., он составляет $M = 7.0-7.5$. Также определена повторяемость сейсмических событий [Овсяченко и др., 2017] в эпицентральной зоне каждого из Тувинских землетрясений: для землетрясений сопоставимой с ними энергии она составляет 300÷500 лет, а для землетрясений с магнитудой 7 и более — примерно 1000 лет. Каахемский разлом имеет сложное строение: в одних своих отрезках это система прерывистых разрывов, в других — система субпараллельных разломов, между которыми сформированы горные хребты [Аржанников, 2003; Аржанникова, 2014].

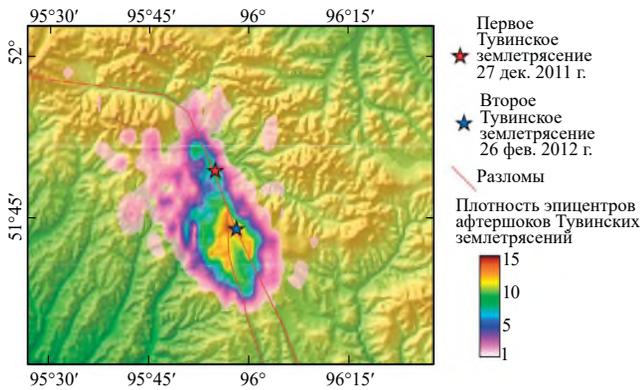


Рис. 10. Карта плотности эпицентров афтершоков Тувинских землетрясений.

Исследования афтершоков выполнены с использованием данных временной локальной сети станций [Еманов и др., 2014, 2018]. Благодаря этому получена точная информация о параметрах сейсмических событий, а также зарегистрированы и обработаны десятки тысяч афтершоков с $M_L \geq -0.8$.

Первое Тувинское землетрясение произошло на узком линейном разломе, который к северу испытывает сильное искривление и поворот. Его афтершоки укладываются в линию до поворота разлома. Второе Тувинское землетрясение соответствует раздвоению разлома, при этом наблюдается раздвоение афтершоковой области по расходящимся разломам (см. рис. 10). Механизм Первого Тувинского землетрясения – сдвиг, а Второго – взброс [Еманов и др., 2014, 2018].

Согласно интерпретации данных об афтершоках Тувинских землетрясений [Еманов и др., 2018] установлено, что ведущую роль в эпицентральной зоне Тувинских землетрясений сыграло сжатие с горизонтальным сокращением земной поверхности с сопоставимой правосдвиговой компонентой смещений в зоне Каахемского разлома, устойчивое во времени по палеосейсмологическим данным. Поворот Каахемского разлома под тупым углом является стопором для горизонтальных сдвиговых смещений, что создало напряженное состояние, которое частично разрядилось в виде сдвига (Тувинское-I землетрясение), а частично в виде взброса – Тувинское-II землетрясение [Овсяченко и др., 2016, 2017].

ВЫВОДЫ

Сейсмические активизации Восточной Тувы и ее границы с Байкальской рифтовой зоны сосредоточены у границ блоков, и этим данный

район существенно отличается от других районов Алтае-Саянской области и Байкальской рифтовой зоны. Большого понимания особенностей геодинамики этой зоны можно достичь, изучая крупные землетрясения и их афтершоки. В данном случае рассмотрены четыре землетрясения, произошедших в разных элементах блоковой структуры.

Общим свойством землетрясений с $M < 6.5$ является активизация на оперениях главных блокоразделяющих разломов. Причиной могут быть процессы, связанные с неравномерным выдвиганием блоковой структуры более низкого ранга, чем, к примеру, Тувино-Монгольский блок. Тувинские землетрясения 2011 и 2012 гг. произошли на Каахемском разломе при выдвигании к северу блока хр. Ыдык. Бусингольское землетрясение произошло на оперяющем разломе к Бусингольскому разлому (пограничному для Тувино-Монгольского блока) и связано с границей между блоками меньшего порядка в Шишхидском нагорье. Белин-Бий-Хемское землетрясение зафиксировано на оперении этого же разлома, но с западной стороны. Таким образом, крупные землетрясения данного района происходили в результате движения блоков более мелкого порядка в условиях всестороннего сжатия. Рассмотренные сейсмические активизации очаговых областей крупных землетрясений являются длительными и многоактными, или даже пульсирующими, как в случае Бусингольского землетрясения.

В то же время Хубсугульское землетрясение активизировало короткий отрезок Западно-Хубсугульского блокоразделяющего разлома. После Хубсугульского землетрясения очаговые области сильных землетрясений блочной структуры рассматриваемого района активизировались и продолжают быть сейсмически активными, что существенно отличается от эволюции сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. Активизирована вся блочная структура, наиболее сейсмоактивной является эпицентральной зона Хубсугульского землетрясения. Три серии землетрясений на этой территории сформировали новую зону сейсмической активности (Дархадский рой землетрясений) с землетрясениями, достигающими $M_L > 5$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на УНУ “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” и Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН по проекту ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адьяа М. Об афтершоках Бусийнгольского землетрясения // Исследования по поискам предвестников землетрясений в Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. С. 115–117.
- Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 375 с.
- Аржанников С.Г., Зеленков П.Я. Сильные палеоземлетрясения хребта Академика Обручева (Восточная Тува) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2–3. С. 323–330.
- Аржанников С.Г. Основные активные разломы, кинематика и сильные палеоземлетрясения восточной части Алтае-Саянской горной области // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Новосибирск: Гео, 2003. С. 241–244.
- Аржанникова А.В., Аржанников С.Г. Сеймотектонические исследования в Восточной Туве и землетрясения 27.12.2011 и 26.02.2012 гг. // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. Кызыл: ТувИКОРП СО РАН, 2014. С. 10–25.
- Демьянович В.М., Ключевский А.В., Черных Е.Н. Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность в зоне Белино-Бусийнгольского разлома (Южное Прибайкалье) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 1. С. 46–61.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 33–44.
- Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Корабельщиков Д.Г., Шатрова Н.В. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. Вып. 11. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 175–184.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. Спец. выпуск. С. 72–77.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнёв В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L = 6.7$ и 26.02.2012 г., $M_L = 6.8$ и их афтершоки // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 2. С. 223–226.
- Еманов А.Ф., Лескова Е.В., Еманов А.А., Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Артёмова А.И. Белин-Бий-Хемское землетрясение 16 августа 2008 г. с $K_p = 15$, $M_w = 5.7$, $I_0 = 7$ (Республика Тыва) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск, 2014а. С. 378–385.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В. Об изменении сейсмического режима в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая в 1963–2016 гг. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 2. № 3. С. 41–45.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Гилёва Н.А., Масальский О.К. Афтершоки Тувинского-I землетрясения 27 декабря 2011 г. с $M_L = 6.7$ и Тувинского-II — 26 февраля 2012 г. с $M_L = 6.8$ (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии, 2018. Вып. № 21. С. 302–312.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Соловьёв В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А., Корабельщиков Д.Г., Подкорытова В.Г., Янкайтис В.В., Елагин С.А., Серёжников Н.А., Дураченко А.В., Артёмова А.И. Сейсмологические исследования в Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 2. С. 20–51.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Радзиминович Я.Б., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Артёмова А.И., Подкорытова В.Г. Хубсугульское землетрясение, 12.01.2021 г. $M_w = 6.7$, $M_L = 6.9$ и афтершоки начального периода // Физика Земли. 2022. № 1. С. 67–82.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Арапов В.В., Фролов М.В. Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г., $M_L = 6.9$ в структуре сейсмичности Тувино-Монгольского блока // Физика Земли. 2023а. № 5. С. 79–95.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Подкорытова В.Г., Фролов М.В., Ешкунова И.Ф. Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г. с $M = 6.7$ и его афтершоки // Ежегодник. Землетрясения России в 2021 году. Обнинск, 2023б. С. 123–132.

- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. Эволюция сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 года // Вулканология и сейсмология. 2023в. № 6. С. 26–40.
- Зятыкова Л.К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1977. 214 с.
- Кочетков В.М., Хилько С.Д., Зорин Ю.А., Ружич В.В., Турутанов Е.Х., Арвисбаагар Н., Баясгалан., Кожевников В.М., Эрдэнбэлэг Б., Чипизубов А.В., Монхоо Д., Аниканова Г.А., Ключевский А.В., Найдич В.И., Баяр Г., Боровик Н.С., Гилёва Н.А., Адьяа М., Балжинням И., Джурик В.И., Потапов В.А., Юшкин В.И., Дугармаа Т., Цэмбэл Л. Сейсмоструктура и сейсмичность Прихубсугулья. Новосибирск: Наука, 1993. 182 с.
- Лухнёв А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Саньков А.В., Бызов Л.М. Тектонические деформации и последующие сейсмические события Юго-Западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS-измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 58–63.
- Лухнёв А.В., Лухнёва О.Ф., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. Косейсмические эффекты Хубсугульского землетрясения в Монголии 11 января 2021 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № S2. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0626.
- Мострюков А.О., Петров В.А. Каталог механизмов очагов землетрясений, 1964–1990 гг. // Материалы Мирового Центра Данных Б. М., 1994. 87 с.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Радзиминович Н.А. Об условиях генерации сильных землетрясений в Южном Байкале // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 3. С. 393–397.
- Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кузугет К.О.С., Бутанаев Ю.В. Геологические исследования Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 1. С. 5–28.
- Овсяченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кузугет К.С. О повторяемости сильных сейсмических событий в районе Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. по данным палеосейсмологических исследований // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1784–1793.
- Овсяченко А.Н., Дэмбэрэл С., Бутанаев Ю.В., Кошевой Н.Г., Батсайхан Ц, Баатар Н. Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г. с $M_w = 6.7$ в Северной Монголии: геологические эффекты и тектоническая позиция очага // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 65–70.
- Опарин Н.В., Сашурин А.Д., Кулаков Г.И., Леонтьев А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Тапсиев А.П., Хачай О.А., Хачай О.Ю., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Немирович-Данченко М.М., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Яковицкая Г.Е., Акинин А.А., Кю Н.Г., Панжин А.А., Дядьков П.Г., Кучай О.А., Кесельман С.И., Борисов В.Д. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 449 с.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой зоны / Отв. ред. К.Г. Леви. Новосибирск: Академ. Изд-во ГЕО, 2006. 151 с.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.Н., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 113–122.
- Тимошкина Е.П., Михайлов В.О., Смирнов В.Б., Волкова М.С., Хайретдинов С.А. Модель поверхности разрыва Хубсугульского землетрясения 12.01.2021 по данным спутниковой РСА интерферометрии // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89.
- Хромовских В.С., Николаев В.В., Демьянович М.Г., Чипизубов А.В., Семенов Р.М., Серебренников С.П., Аржанников С.Г., Смекалин О.П., Дельянский Е.А. Новая карта сейсмического районирования Восточной Сибири и Монголии // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. Новосибирск: Наука, 1996. С. 94–99.
- Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 542 с.
- Davaasambuу Battogtokh, Amgalan Bayasgalan, Kang Wang, Davaasuren Ganzorig, Jargalsaikhan Bayaraa. The 2021 M_w 6.7 Khankh earthquake in the Khuvsgul rift, Mongolia // Mongolian Geoscientist. 2021 V. 26(52). P. 46–61. <https://doi.org/10.5564/mgs.v26i52.1361>

On the Influence of the 2021 Khubsugul Earthquake on the Seismicity of the Joint of the Altai-Sayan Mountain Region with the Baikal Rift Zone

**A. F. Emanov^{1, *}, A. A. Emanov^{1, 3}, V. V. Chechelitsky², E. V. Shevkunova¹,
A. V. Fateev^{1, 3}, E. A. Kobeleva², P. O. Polyansky¹, M. V. Frolov¹, I. F. Eshkunova¹**

¹*Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”,
Akad. Koptuyuga ave., 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

²*Baikal Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service Russian Academy of Sciences”,
Lermontov str., 128, Irkutsk, 664033 Russia*

³*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akad. Koptuyuga ave., 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

** e-mail: Emanov@gs.nsc.ru*

The question of the influence of the large Khubsugul earthquake of 2021, $M_L = 6.9$ on the seismicity of the block structure of the junction of the Altai-Sayan Mountain region and the Baikal rift zone is considered. The research is carried out using data from networks of seismological stations of the Altai-Sayan and Baikal branches of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, as well as seismological stations of Mongolia. The development of the seismic process near the boundaries of the Tuva-Mongolian block and adjacent blocks of Eastern Tuva is shown. The focal zone of the Darkhad earthquake swarm, which formed in 2022–2023, has been established and studied. In the form of several series of events, the strongest of which had a magnitude of $M_L > 5$. Simultaneously with the activation of the focal area of the Khuvsgul earthquake, high seismic activity of the focal areas of large earthquakes of past years is observed: Busingolsky 1991, Tuva 2011–2012. Belin-Biy-Khemsy 2008. The impact of the Khubsugul earthquake on the seismicity of the boundary blocks of the Altai-Sayan and Baikal zones differs from the impact of the Chuya earthquake of 2003 on the seismicity of Altai.

Keywords: Tuvan-Mongolian block, major earthquakes, aftershocks, Khubsugul earthquake