

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ ПРИ ОЦЕНКАХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

© 2024 г. В. В. Ружич*, Е. А. Левина

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В статье представлены обобщающие результаты средне- и долгосрочного прогноза землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$) в Байкальской рифтовой зоне. Они были получены за последние годы при совместном использовании геоинформационной системы “Prediction” и разработанной двухстадийной феноменологической модели для периодов предшоковой подготовки землетрясений. Данная модель создана на основе анализа сейсмологических сведений о подготовке произошедших наиболее опасных местных землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Она согласовывается с результатами, полученными при изучении сейсмических режимов подготовки ледовых ударов на ледяном покрове озера Байкала и при проведении натуральных экспериментов на участках разломов с целью выяснения физико-механических условий возникновения источников генерации волновых колебаний сейсмического диапазона.

В работе приведен пример практического использования полученных результатов прогноза землетрясений, а также способы уточнения оценок сейсмической опасности по отношению к инфраструктуре в г. Ангарске, удаленном на 100 км от сейсмоопасного Главного Саянского разлома, в зоне которого при анализе сейсмического режима выявлен “запертый” сегмент с сейсмической брешью. В соответствии с ее линейными размерами при протяженности 60 км по двум взятым уравнениям соотношений L/M были рассчитаны оценки энергетического потенциала, максимальные значения которых соответствуют значениям $M_{\max} = 7.1$ и 7.8 . Показано, что использование полученных результатов прогноза землетрясений способствует уточнению уровня сейсмической опасности на ближайшие временные интервалы ожидания землетрясений с разными значениями M_{\max} . Рассмотрен пример оценки современной сейсмической опасности с использованием среднесрочного прогноза для инфраструктурной г. Ангарска при возможных сейсмических сотрясениях со стороны юго-восточного участка зоны Главного Саянского разлома на ближайшие 10 и 50 лет. При сравнении с картой ОСР-16 показано, что проведенные расчеты указывают на относительно более низкий уровень сейсмической опасности для г. Ангарска на период ожидания 10 и 50 лет.

Ключевые слова: формализация предвестников, средне-долгосрочный прогноз, физическое моделирование, сейсмическая брешь, двухстадийная модель, оценки вероятностей, сейсмическая опасность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050138>, **EDN:** EJGTLY

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно распространено мнение некоторых ученых и представителей властных структур о непредсказуемости землетрясений согласно работе [Geller et al., 1997]. Такое мнение дорого обходится человечеству, поскольку препятствует поискам более результативных способов решения проблемы обеспечения сейсмической безопасности. Среди

всех природных катастроф землетрясения стоят на третьем месте по количеству смертных случаев: 17% от общего числа погибших. В России, на 25% ее площади, где расположены около 3000 городов и поселков, более ста крупных гидро- и теплоэлектростанций, пять АЭС, возможны сейсмические сотрясения с интенсивностью 8–10 баллов. Все произошедшие разрушительные сейсмические события оказались неожиданными или “предсказанными” весьма

неоднозначно, что проявилось при недавних двух землетрясениях в Турции [Завьялов, 2006; Ружич, Левина, 2022].

В последние два десятилетия в мировом обществе формируется осознание того, что при поисках прорывных решений кроме сведений о сейсмическом режиме целесообразно использовать результаты более углубленного изучения геологических механизмов многоэтапной и финальной подготовки очагов опасных землетрясений [Кочарян, 2016; Ружич и др., 2018a]. Несмотря на огромные объемы сейсмологических данных, имеющих в США, Японии, Китае и других технологически развитых странах, еще недостаточно сведений о глубинных механизмах возникновения кратковременной финальной стадии сейсмического события, которые нужны для построения современных моделей очагов землетрясений, адекватных реальным геологическим условиям. Следовательно, необходимо привлечение новых данных из смежных разделов наук о Земле, касающихся проявления деструктивных процессов в земной коре и других геосферах нашей планеты, в частности, таких наук как трибология, геофизика, тектонофизика, физическая мезомеханика, космогеодезия и многих других. Это способствует выявлению новых возможностей многостороннего геолого-геофизического изучения физико-механических процессов в глубинных сегментах разломов. В них при новом подходе становятся доступными для визуального обследования глубинные геоструктурные элементы очагов древних землетрясений, эксгумированные на земную поверхность в местах многокилометрового денудационного среза верхних слоев земной коры [Ружич и др., 2018a; 2018б]. Авторами данного сообщения в течение трех десятилетий используется междисциплинарный подход для разработки и улучшения среднесрочного и долгосрочного видов прогноза грядущих разрушительных землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), что необходимо для оценок сейсмической опасности [Ружич, 1997; Ружич, Левина, 2022].

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА

Первоначально следует обратиться к рассмотрению нескольких предпосылок, которые были использованы для обоснования оценок сейсмической опасности. На рассматриваемой территории авторами осуществлялся сейсмопрогностический мониторинг с применением

разработанной геоинформационной системы (ГИС) “Prediction” [Ружич, Левина, 2022]. Отметим, что акцент был сделан на улучшение возможностей среднесрочного прогноза в интервале 1–11 лет, который выбран с учетом выявленной ранее статистически значимой корреляции солнечной активности и сейсмического режима в регионе [Ружич, 1997; Левина, Ружич, 2015]. Предложенный подход основывается на анализе сейсмологических сведений, поступающих от Байкальского филиала Единой геофизической службы РАН (г. Иркутск), а также на данных Нового каталога исторических землетрясений для Прибайкалья за период 298 лет [Кондорская, Шебалин, 1977]. С целью более объективного подхода к выяснению физических механизмов возникновения источников генерации сейсмоакустической эмиссии, проводилось исследование их возникновения при явлениях динамического разрушения ледяного покрова оз. Байкал, а также при проведении геофизических натуральных экспериментов в участках разломов [Добрецов и др., 2007; Псахье и др., 2008; Ruzhich et al., 2009]. Наряду с этими работами в Прибайкалье и Монголии проводились комплексные междисциплинарные исследования, касающиеся выяснения геомеханических условий возникновения современных и доисторических сейсмодислокаций. В этих регионах осуществлялось геолого-структурное и петрофизическое изучение строения глубинных фрагментов очагов палеоземлетрясений, которые были эксгумированы на земную поверхность в результате многомиллионнолетнего эрозионного среза земной коры. Накопленный многолетний опыт такого рода исследований способствовал совершенствованию средне- и долгосрочного видов прогноза землетрясений применительно к сейсмогеодинамическим условиям БРЗ.

При разработке методологии прогноза землетрясений в БРЗ нами оценивались три взаимосвязанных базовых параметра: место – M , время – T и энергия – E . Применен многоуровневый подход, при котором вся система рифтовых впадин изначально рассматривалась как длительно развивающаяся дизъюнктивная мегаструктура в земной коре Центрально-Азиатской части Евразии [Ружич, 1997]. Далее отдельно изучался сейсмический режим на флангах и в центральной части БРЗ. На следующем этапе с большей детальностью подвергались анализу сейсмические поля в пределах сейсмических пятен, где выявлялись разномасштабные сейсмические бреши, приуроченные к сегментам

магистральных разломов и разломных узлов. Для получения оценок потенциальной энергии готовящихся очагов анализировались графики количества землетрясений и вариации их энергетического уровня в разных участках БРЗ в выбранные временные интервалы. При анализе сейсмического режима было установлено, что перед моментом возникновения землетрясения отчетливо фиксировались две предшествующие стадии: умеренной по энергетическому уровню предшоковой сейсмической активизации и относительного сейсмического затишья [Ruzhych, Levina, 2022].

Для выяснения условий возникновения источников излучения волновых колебаний сейсмоакустического диапазона в п. Лиственничное на юго-западной оконечности оз. Байкал, проводились целенаправленные натурные эксперименты в сегменте зоны Ангарского разлома с использованием бетонной армированной плиты весом 0.6 т, скользящей по шероховатой наклонной плоскости разлома. Скользящая плита использовалась как моделирующий аллохтонный элемент зоны Ангарского разлома взбросо-сдвигового типа. В моменты контактного деструктивного взаимодействия плиты с неровностями фиксировались физико-механические условия возникновения источников сейсмического излучения в виде пакетов сейсмоакустического диапазона с двумя фазами: предшоковой активизации и последующего замедления и остановки. Во второй фазе фиксируемого относительного затишья в режиме генерации сейсмических колебаний фиксировался рост напряжений на фоне накопления повреждений при столкновении с неровностями. Далее в моменты разрушения препятствия происходили срывы с возникновением высокоскоростного косейсмического проскальзывания и шокового события. При анализе наблюдений и полученных записей деформографов и сейсмических станций был выяснен механизм возникновения крупного по амплитуде сейсмического импульса (шока). Он связан с проявлением фрикционного механизма, то есть трения, возникающего при прерывистом скольжении плиты на фоне ее контактного взаимодействия с разномасштабными прочностными барьерами или неровностями в плоскости разлома (*asperities*) [Ружич и др., 2014; Ostapchuk et al., 2019; Ружич, Савельева, 2023]. Полученные сведения послужили основанием для разработки двухстадийной феноменологической модели подготовки землетрясений, которая была зафиксирована при

анализе подготовительного сейсмического режима опасных землетрясений в БРЗ.

Авторы использовали двухстадийную модель для формализации определения параметров готовящегося землетрясения с использованием метода распознавания образов. В качестве основных прогнозных признаков рассматривалось наличие: сейсмической брешы в структуре сейсмических пятен (1); предшоковой сейсмической активизации и сейсмического затишья (2); сейсмоактивного разлома или разломного узла (3). Каталог землетрясений фактически является представленной в табличной форме функцией вида $E = f(\varphi, \lambda, t)$, где E – энергия события; φ, λ – его географические координаты; t – время, когда событие произошло. Для обнаружения сейсмических брешей (признак 1) строится распределение сейсмической энергии, подсчитанное за определенный промежуток времени с помощью пространственного окна. То есть рассматриваемая функция приобретает вид $E = f(\varphi, \lambda)$ и задача сводится к поиску локальных минимумов в полученной матрице. В нашем подходе выявленные минимумы сейсмической активизации рассматриваются как потенциально опасные брешы, если в соответствующем окне есть фрагмент сейсмоактивного разлома (признак 3). Для этого необходим перечень разломов с указанием их координат и степени сейсмической активности [Ружич, Левина, 2022]. После проведенного анализа всей совокупности упомянутых данных было сформулировано положение о том, что по максимальной энергии землетрясений в предшоковой стадии и длительности последующего сейсмического затишья можно судить об энергии ожидаемого землетрясения и времени его реализации. С этой целью для определенной территории строилось распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью временного окна. В этом случае рассматриваемая функция сводилась к виду $E = f(t)$ и поиск предшоковой активизации заключается в нахождении локального максимума временного ряда. Ниже в качестве примера рассмотрено сильное Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 г. ($K = 15.7$).

Подсчет распределения выделившейся сейсмической энергии сделан за интервал времени 2010–2020 гг. с помощью пространственного окна с размерами сторон 0.5° (рис. 1). Видно, что землетрясение произошло в районе сейсмической брешы, расположенной на месте пересечения субмеридионального активного Хубсугульского разлома (рифтогенного сброса) и локального разлома северо-западного

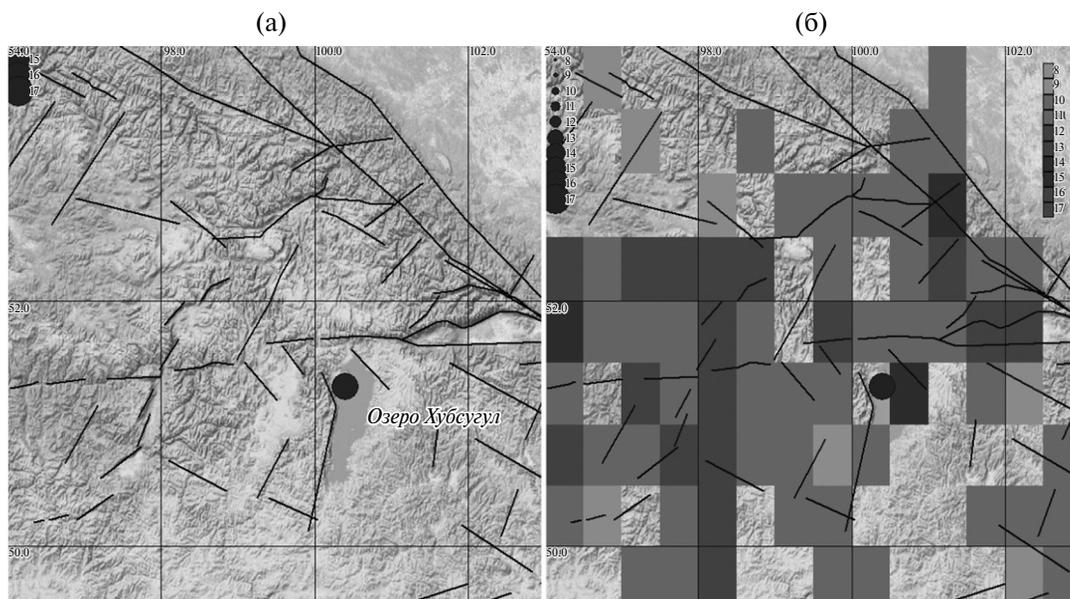


Рис. 1. (а) – Карта юго-западного фланга БРЗ (район озера Хубсугул). Черными линиями показаны разломы, кружком – эпицентр Хубсугульского землетрясения 11.01.2021 г. ($K = 15.7$); (б) – карта распределения выделившейся сейсмической энергии в том же районе БРЗ за интервал времени 2010–2020 гг., подсчитанного с помощью квадратного окна со стороной 0.5° .

направления (взбросо-сдвига). Брешь сформировалась как минимум за 11 лет до момента Хубсугульского землетрясения. Установлено, что стадия предшоковой активности с $K_{\max} = 13.9$ проявлялась за 7 лет до основного события, а разность энергии произошедшего землетрясения K_3 и энергии максимального землетрясения предшоковой стадии $K_{\text{пр}}$ составляет $K_3 - K_{\text{пр}} = 1.8$ (рис. 2). Подобные расчеты, сделанные для всех 16 событий с $K \geq 15$, произошедших в БРЗ с 1963 по 2022 гг., показали, что совокупность следующих признаков: наличие протяженного активного разлома, длительно существующей бреши, предшоковой активизации и длительного затишья, может служить весомым основанием для формализованного способа выделения мест ожидаемых землетрясений, а также для оценок энергии и времени возникновения сейсмического события. При этом средняя разность $K_3 - K_{\text{пр}} = 2.3$ (0.7), а средняя длительность затишья $T_{\text{зтиш}} = 5.7$ (3.4) лет, где в скобках указаны средние квадратичные отклонения. Видно, что разброс длительности затишья достаточно большой, поэтому для уточнения параметра “ T ” необходимо привлечь дополнительную информацию.

В предшествующих статьях по теме прогноза нами неоднократно были представлены результаты среднесрочного прогноза в БРЗ [Ружич, Левина, 2022]. Анализ прогноза, выполненного в конце 2019 г. показал, что за следующие

три года (2020–2023 гг.) произошло 33 сейсмических события с $K \geq 13$. Из них в районы ожидания попали 76% эпицентров таких землетрясений. Оценки двух других параметров – E и особенно T – оказались менее надежными.

Следует отметить, что на прогнозных картах для БРЗ, представляемых в МЧС Иркутской области, как правило, указываются 7–8 районов, где ожидается возможное возникновение опасных и разрушительных землетрясений с интенсивностью 7–10 баллов ($K \geq 13$, $M \geq 5.0$). Это не предполагает, что в каждом выделенном районе в течение 1–2 лет обязательно возникнет ожидаемое землетрясение. Практика показывает, что в ряде случаев в прогнозируемых местах землетрясения происходят с задержкой в несколько лет в последующие временные интервалы. Традиционно задержка расценивается как ошибка в прогнозе из-за параметра T , он остается наиболее трудным при прогнозе в сравнении с двумя другими параметрами, которые в значительной степени основываются на геологических сведениях.

О СПОСОБАХ УТОЧНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В 2014–2015 гг. в России был создан комплект актуализированных карт общего сейсмического районирования ОСР-2016, рассматриваемый

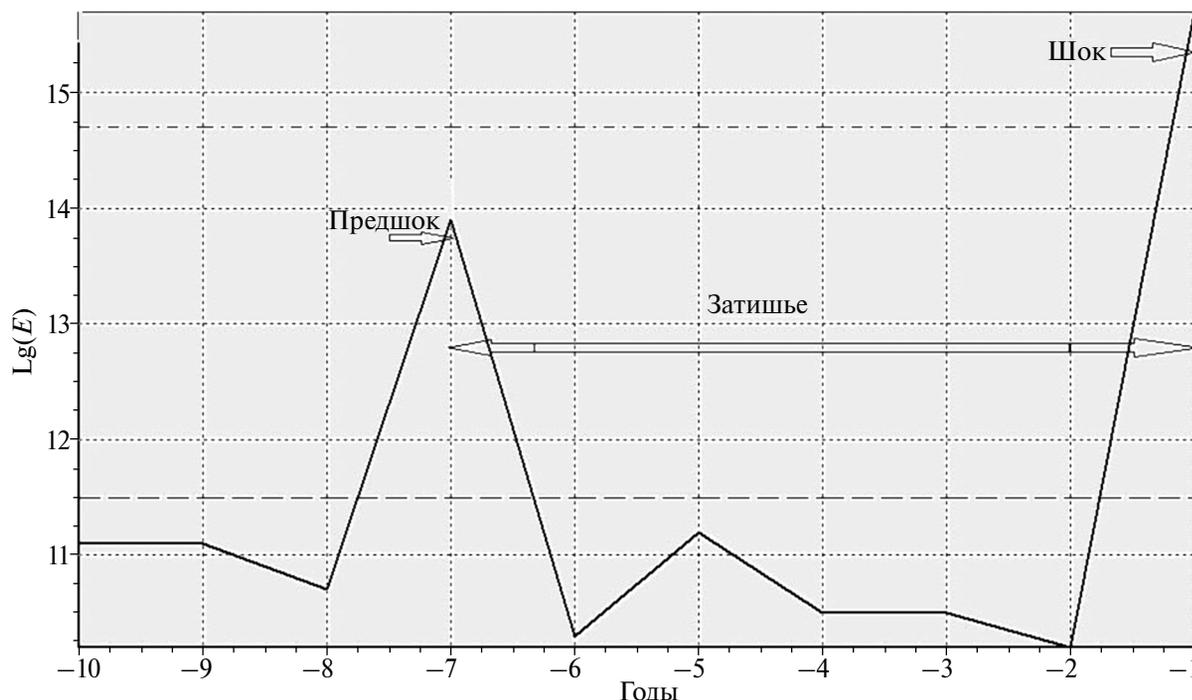


Рис. 2. График распределения выделившейся сейсмической энергии в квадратной ячейке с центром в эпицентре Хубсугульского землетрясения и со стороной 2° за 2010–2020 гг. с временным шагом 1 год.

в настоящее время в качестве нормативного документа для осуществления сейсмостойкого строительства взамен действующих с 1997 г. карт ОСР-97. Однако можно констатировать, что при современных оценках сейсмической опасности возникает необходимость совершенствования данного подхода из-за возрастающих противоречий в сопоставлении с поступающими новыми сведениями [Shebalin et al., 2023; Фролова и др., 2023].

Термин “сейсмическая опасность” по смыслу рассматривается как угроза сейсмических воздействий на население и коммуникации при проявлениях сильных землетрясений. Во многих случаях оценка сейсмической опасности до настоящего времени основывается на выявлении следов землетрясений в виде палеосейсмодислокаций, возникших в далеком прошлом и частично сохранившихся в рельефе в виде полузасыпанных разрывных нарушений с протяженностью в десятки – сотни километров. Например, для выявленных Саянских и Тункинских сейсмодислокаций, с протяженностью во многие десятки километров, их примерные абсолютные возраста исчисляются сотнями и первыми тысячами лет [Чипизубов, 1998; Ritz et al., 2018]. Однако стоит сразу отметить, что в течение сотен и тысяч лет имеет место плохая сохранность морфологических признаков

подобных структур в осадочных толщах, что весьма существенным образом влияет на обоснованность энергетических оценок и возраста. Подобные обстоятельства обуславливают субъективность оценок энергии палеоземлетрясений по многокилометровой протяженности и амплитудам смещений. Эта субъективность возникает при оценках линейных размеров плохо сохранившихся многокилометровых палеосейсмодислокаций, а также при установлении амплитуд именно одноактных землетрясений, а не суммированных с амплитудами событий другого возраста в одном и том же месте наблюдений. Поэтому даже в однозначно идентифицированных разрывных нарушениях, отнесенных к разряду палеосейсмогенных косейсмических разрывов, неточность энергетических оценок с применением палеосейсмологического метода может достигать значений 0.5–0.75 и зачастую в сторону завышения. При этом следует учитывать и значительный разброс датировок абсолютных возрастов палеоземлетрясений. Поэтому следует признать, что широко использованный в ОСР палеосейсмологический метод, который ранее правомерно считался достаточно надежным, для современных требований имеет объективные ограничения по точности. Также следует учесть, что фиксируемые знаменательные сейсмические события тысячелетней

давности могли происходить в условиях нестабильного весьма отличающегося от современного сейсмического режима. Поэтому в настоящее время в практике зарубежных палеосейсмогеологических исследований широко используется новый подход к более обоснованным оценкам абсолютных возрастов и энергии M_{\max} , а, следовательно, и оценок сейсмической опасности. Явления сеймотектонической сегментации в разломах проявляются в режиме прерывистого скольжения *stick-slip*, которое сопровождается возникновением очагов генерации сейсмической активности [Попов, 2013; Мирзоев и др., 2009; Кочарян, 2016]. В итоге при инструментальной регистрации современного сейсмического режима подготовки опасных землетрясений в зонах разломов обнаруживаются как сейсмоактивные сегменты, так и сегменты относительно сейсмически пассивные (“запертые”), или сейсмические брешы. Нами для оценок сейсмической опасности использовались данные среднесрочного прогноза, указывающие на наличие в зоне Главного Саянского разлома (ГСР) сейсмической брешы в пределах сегмента с низкой сейсмической активностью. Эта брешь, названная Еловской (по названию п. Еловка), обозначилась после Быстринского землетрясения 21.09.2021 г. ($K = 14.5$, $M = 5.5$). Его механизм очага имел отчетливо выраженный левосторонний взбросо-сдвиговый тип, характерный для ГСР [Семинский и др., 2021]. Эпицентр землетрясения располагался на минимальном удалении от г. Ангарска, около 90 км. Главная геолого-структурная особенность современной сеймотектонической обстановки по отношению к г. Ангарску обусловлена существованием сейсмоопасной зоны Главного Саянского разлома взбросо-сдвигового типа, расположенной в зоне Восточно-Саянской ветви краевого шва Сибирского кратона.

С учетом современных представлений в геомеханике, сейсмические брешы рассматриваются как “запертые” высоконапряженные участки разломов, которые появляются в местах между очагами ранее произошедших сильных землетрясений и являются потенциально сейсмоопасными в связи с неизбежной последующей активизацией. В этой связи есть возможность оценивать их энергетический потенциал по соотношению параметров L/M , где L – линейная протяженность “запертых” сегментов в пределах сейсмической брешы, M – магнитуда ожидаемого события [Leonard, 2010]. Далее рассматривается подход с целью уточнения оценок сейсмической опасности для г. Ангарска, принятых ранее в рамках ОСР-2016.

Зона Главного Саянского разлома расположена на удалении 100–120 км от г. Ангарска (рис. 3). Сейсмическая брешь имеет линейную протяженность около 60 км.

Сейсмический потенциал может быть оценен на основании используемых в мировом сообществе представлений о сеймотектонической сегментации разломов на активные и пассивные участки в современном сейсмическом режиме.

Чтобы с наибольшей достоверностью оценить уровень сейсмической угрозы для г. Ангарска, авторами предпринят мультидисциплинарный подход, основанный на оценках соотношения параметров линейной протяженности брешы и энергетического потенциала, описанный в работах [Leonard, 2010; Wells et al., 1994; Wesnousky, 2008; Iezzi et al., 2019]. Для оценок M_{\max} были использованы два варианта формул. Формула (1) – известное соотношение из работы [Ризниченко, 1976]:

$$\lg(L) = -2.266 + 0.244K, \quad (1)$$

где K – энергетический класс. Магнитуда M вычислена по формуле $K = 8 + 1.1M$, используемой БФ ФИЦ ЕГС РАН. Получено значение $M_{\max} = 7.8$. Использовалось также значение $M_{\max} = 7.1$, полученное согласно формуле, взятой из более современной работы [Leonard et al., 2010], которая основывается на большем количестве данных по всему миру:

$$M = 4.40 + 1.52 \lg(L). \quad (2)$$

На основе использования отмеченных выше формул соотношения L/M выяснено, что при максимальной протяженности с $L = 60$ км предполагаемого косейсмического разрыва, возникшего в виде одноактного сильного землетрясения, его энергетический потенциал может иметь два значения M_{\max} : 7.8 (вариант 1) и 7.1 (вариант 2). Однако не исключается и более благоприятный результат, при котором накопленная в породном массиве в районе брешы упругая энергия может высвободиться через разлом в виде генерации серии менее сильных и менее опасных землетрясений. В дальнейшем есть возможность уточнять сейсмическую угрозу посредством проведения детальных сейсмологических и деформометрических инструментальных наблюдений, что позволит контролировать режим накопления критических деформаций в рассматриваемом сегменте разлома. Поэтому мы ориентируемся на максимальные по протяженности косейсмические разрывы и, соответственно, на более опасные случаи с максимальными значениями сейсмической угрозы сильных землетрясений.

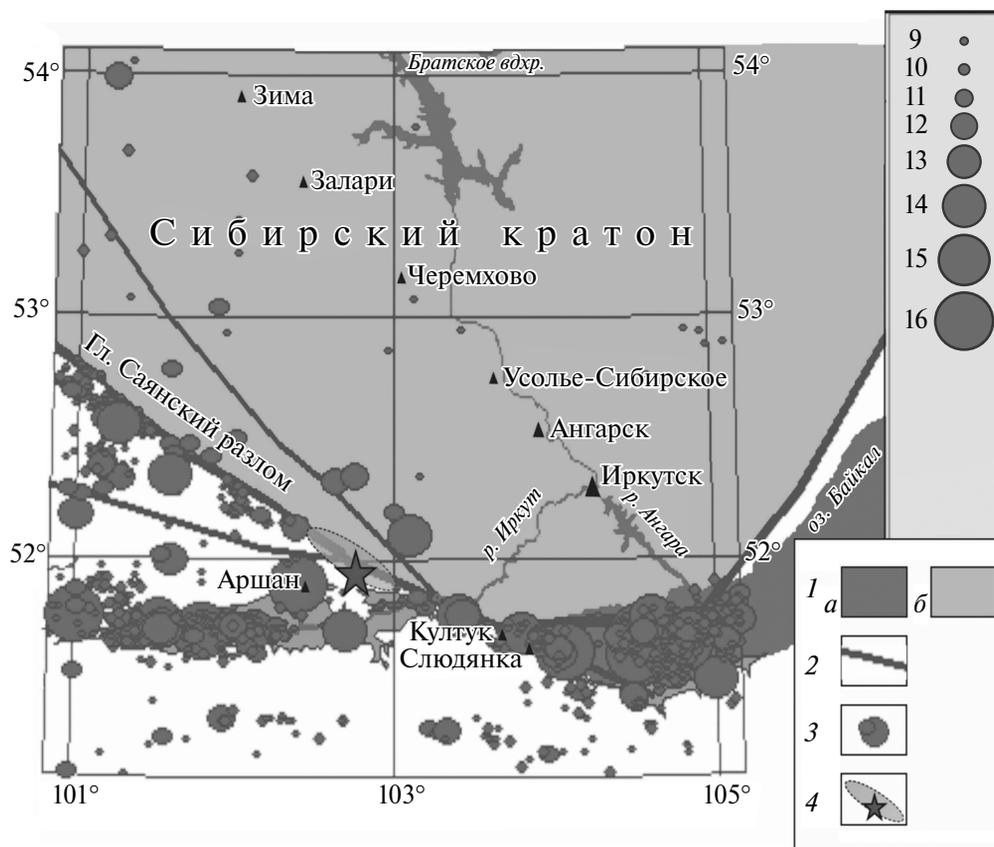


Рис. 3. Схематическая карта с указанием расположения г. Ангарска по отношению к сейсмоопасным геологоструктурным объектам. 1: а – акватория Байкала, б – Сибирский кратон; 2 – сейсмоактивные разломы; 3 – эпицентры землетрясений, произошедших за исторический и современный периоды; на шкале справа указаны обозначения их энергий в энергетических классах; 4 – предполагаемое расположение эпицентра возможного сценарного землетрясения, приуроченного к Еловскому сегменту Главного Саянского сейсмоопасного разлома и прогнозируемый район расположения сейсмической брешки.

В итоге, при предполагаемой реализации сценария прогнозируемого землетрясения в районе Еловской брешки с учетом значения $M_{\max} = 7.8$ на территории г. Ангарска интенсивность сейсмических сотрясений может достигать уровня 8 баллов по шкале MSK-64. В случае более вероятного землетрясения с $M_{\max} = 7.1$, в пределах территории г. Ангарска будут возможны сейсмические сотрясения с интенсивностью 7 баллов. Приведенные оценки сейсмических сотрясений рассчитаны для средних грунтовых условий [Фролова и др., 2022].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При прогнозных оценках показателей сейсмической опасности и сейсмического риска важное значение приобретает оценка параметра “ T ”, характеризующего длительность

ожидания момента возникновения готовящегося сильного землетрясения, находящегося в предшоковой стадии его подготовки. В районах обнаружения сейсмических брешей, выявленных при средне-долгосрочном прогнозе, для оценок упомянутого параметра необходимо длительное проведение геофизических, деформометрических и детальных сейсмологических наблюдений, что является трудно осуществимым. Нами рассмотрена возможность использовать оценки вероятностей возникновения землетрясений разного энергетического уровня исходя из длительностей периодов их повторяемости. Такой подход осуществлялся с применением распределения Пуассона, которое является моделью для описания редких явлений, в частности, для оценки вероятности появления некоторого количества сильных и очень сильных землетрясений в определенном районе в заданный

промежуток времени при известной повторяемости таких событий. Для вычисления подобной вероятности была использована формула [Epstein, Lomnitz, 1966]:

$$p(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}, \quad (3)$$

где $p(n)$ – вероятность того, что n сильных землетрясений произойдут в заданный промежуток времени; λ – среднее количество сильных землетрясений в единицу времени, т.е. параметр повторяемости землетрясений. Рассматривался район, ограниченный координатами: 51° – 53° N северной широты и 100° – 108° E восточной долготы. Результаты показаны в табл. 1, где представлены вероятности возникновения землетрясения с энергией $K = 15, 16$ и 17 за разные временные интервалы.

В первом столбце табл. 1 указаны энергетические классы событий, вероятность возникновения которых в выбранном районе требуется оценить. Во втором столбце – количество землетрясений соответствующего класса из исторического каталога землетрясений, начинающегося с 1725 г. Эта величина использовалась для вычисления периода повторяемости. В 3, 4 и 5 столбцах приведены значения вероятностей P возникновения хотя бы одного сейсмического события заданного класса в следующие 10, 50 и 98 лет соответственно. Значение P вычислялось по формуле:

$$P = p(1) + p(2) + \dots = 1 - p(0). \quad (4)$$

При таком подсчете для оценок повторяемости землетрясений с различной энергией необходимо, чтобы рассматриваемый период времени был не менее чем в три раза длиннее того, на который делается прогноз. Так как для БРЗ есть исторический каталог за 298 лет, прогноз может быть сделан только на 98 лет. Отсюда по данным в табл. 1, вероятность возникновения хотя бы одного землетрясения с $M \geq 8.0$

($K = 17$) в ближайшие 10 и 50 лет сравнительно невелика: $P = 0.03$ и 0.16 соответственно. Однако угроза от землетрясений с $K = 15$ и $K = 16$ заметно увеличивается до значений P от 0.36 до 0.89 для событий с $K = 16$, а также от 0.26 до 0.78 для $K = 15$. Этот вывод требует пояснения, поскольку значения вероятностей для землетрясений с $K = 15$ получились меньшими, чем для событий с $K = 16$, т.к. в рассматриваемый период (1725–2021 гг.) первых зафиксировано меньше: 9 с $K = 15$ против 12 с $K = 16$. Частично это может объясняться неполнотой каталога за XIX и тем более за XVIII век, особенно для северо-восточного фланга БРЗ с очень редким населением. Еще одна причина такой ситуации заключается в том, что непрерывная энергетическая шкала представляется в дискретном виде: в категорию $K = 15$ включаются землетрясения с энергией от 14.5 до 15.4, в категорию $K = 16$ – с энергией от 15.5 до 16.4 и т.д. Таким образом, разница K в 0.01 может привести к попаданию конкретного события в разные категории (событие с $K = 15.44$ попадает в категорию $K = 15$, а событие с $K = 15.45$ – в категорию $K = 16$).

Таким образом, в случае принятия во внимание значений $M_{\max} = 7.1$, в пределах территории г. Ангарска в ближайшие 50 лет с большей вероятностью можно ожидать сейсмические проявления с интенсивностью 7 баллов, а не 9- или 10-балльные, какие предполагаются по карте ОСР-2016. Приведенные для Ангарска наиболее вероятные оценки сейсмических сотрясений рассчитывались для средних грунтовых условий. Однако на обводненных и потому ослабленных грунтах нельзя исключать и 8-балльные сотрясения [Фролова и др., 2022].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существующие в нашей стране проблемы с улучшением результатов прогноза землетрясений в БРЗ во многом обусловлены недостаточностью поступления сейсмологической

Таблица 1

Класс	Количество событий за 298 лет (1725–2021 гг.)	Вероятность (P) хотя бы одного события за 10 лет	Вероятность (P) хотя бы одного события за 50 лет	Вероятность (P) хотя бы одного события за 98 лет
15	9	0.26	0.78	0.95
16	12	0.36	0.89	0.98
17	1	0.03	0.16	0.28

детальной информации. Подобные трудности возникают из-за отсутствия более плотной сети технически оснащенных сейсмических станций, а также надлежащих условий для быстрой ее передачи и обработки. Однако это не единственная трудность. Затруднения вызывает также отсутствие новых комплексных моделей очагов землетрясений, в которых не учитываются поступающие в последние десятилетия сведения о тектонофизических условиях в глубинных сегментах разломов, рассмотренных, в частности, в работах [Ружич и др., 2018б; Кочарян, 2021; Кочарян, Кишкина, 2020; Попов, 2013; Plata-Martinez et al., 2021]. Также следует признать, что любой вид прогноза землетрясений, так же как и прогноз погоды, всегда будет вероятностным из-за невозможности осуществлять технический детальный контроль деструктивных процессов в глубинных сегментах разломов. Среднесрочный и долгосрочный виды прогноза ориентированы на выявление районов очагов опасных землетрясений, готовящихся в ближайшие годы/десятилетия. Далее в этих районах необходимо проводить детальное изучение и уточнение оценок базовых параметров, что ранее планировалось в рамках детального сейсмического районирования, но практически не используется из-за высокой стоимости. В ближайшей перспективе улучшенный среднесрочный вероятностный прогноз землетрясений за периоды 1–11 лет может стать более значимым, поскольку появляются дополнительные возможности уточнять исходную сейсмическую опасность и оценивать сейсмический риск для мегаполисов и объектов уязвимой промышленной инфраструктуры. При согласованном взаимодействии и сотрудничестве ученых с представителями местных органов МЧС и властных структур необходимо находить приемлемый компромисс для принятия решений по заблаговременному выбору превентивных способов смягчения ожидаемых разрушительных последствий опасных землетрясений. Примеры применения такого подхода рассматриваются, например, в работах [Davis et al., 2010; Фролова и др., 2022; 2023].

В работах [Shebalin et al., 2023; Фролова и др., 2023], а также в нашем сообщении приведены примеры обнаружения завышенных оценок сейсмической опасности на картах ОСР-2016, в том числе для Прибайкалья. Очевидно, что подобные просчеты неизбежно ведут к увеличению ошибок “ложная тревога” и способствуют завышению оценок сейсмического риска и несоизмеримым затратам ресурсов для повышения

сейсмостойкости планируемых инфраструктурных объектов не только в г. Ангарске, но также и для всей Иркутской агломерации [Бержинская, Ружич и др., 2023]. Дальнейшая разработка более эффективных способов противостояния сейсмическим угрозам при решении задач обеспечения сейсмической безопасности может быть достигнута с получением новых сведений о механизмах современных глубинных геологических процессов в районах локализации очагов землетрясений, организации комплексного мониторинга вариаций сейсмического режима на разных глубинных уровнях. Без этого сложно ожидать прорывных решений во всех видах прогноза опасных будущих землетрясений и оценок сейсмической опасности.

Средне- и долгосрочный прогноз землетрясений является необходимым, но лишь промежуточным звеном в стратегии обеспечения сейсмической безопасности. Успешный прогноз, по большому счету не избавляет от разрушений и гибели местного населения. Однако он во многом может способствовать созданию новых подходов к проведению эффективных превентивных мероприятий по снижению потерь в разных областях жизнеобеспечения и градостроительства. В отдаленной перспективе роль среднесрочного и долгосрочного видов прогноза землетрясений будет еще более востребованной. В последние три десятилетия разрабатываются способы для высокоэффективного снижения сейсмической опасности и сейсмического риска со стороны ожидаемых разрушительных землетрясений. В опубликованных работах в нашей стране и за рубежом показана возможность безопасного замедленного высвобождения мелкими порциями огромных объемов накопленной избыточной упругой энергии недр в режиме вязкой ползучести, инициируемой в сейсмоопасных сегментах разломов путем строго контролируемых медленных закачек растворов через глубокие скважины в сочетании с вибрационными техногенными воздействиями. Эффективность предлагаемых способов подтверждается не только научными расчетами, но также результатами среднемасштабных натуральных испытаний на разломах и патентами Российской Федерации [Патент..., 2004; Psakhie et al., 2005; Мирзоев и др., 2009; Ружич и др., 2020; и др.]. Однако для дальнейшего совершенствования и применения подобной технологии требуется проведение дорогостоящих крупномасштабных испытаний на реальных разломах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами обсуждается способ среднесрочного прогноза землетрясений применительно к сейсмогеологическим условиям в БРЗ для выявления районов подготовки опасных землетрясений в местах расположения сейсмических брешей. На их дистальных окраинах в последние десятилетия возникают и увеличиваются плотности эпицентров слабых землетрясений. Показано, что сочетание признаков: сейсмической брешы, активного разлома или разломного узла и предшоковой активизации, является статистически значимым критерием, свидетельствующим о происходящей подготовке опасных землетрясений. Дальнейшее улучшение формализованного выделения трех рассмотренных признаков будет способствовать улучшению результатов среднесрочного и долгосрочного видов прогноза землетрясений. По мнению авторов работы, в виду труднопреодолимых в настоящее время сложностей оценок параметра T -время, целесообразно применение вероятностных оценок сейсмического риска возникновения местных 7–10-балльных местных землетрясений на ближайшие 10 и 50 лет. Такие сведения, в первую очередь, необходимы органам МЧС при планировании спасательных мероприятий на ближнюю, среднюю и дальнюю перспективы. Представленный пример проведенных исследований и расчетов свидетельствуют о необходимости уточнения существующих оценок сейсмической опасности согласно сведениям, представленным на карте ОСР-16 для территории БРЗ в сторону уменьшения, что может иметь значение для уточнения оценок сейсмического риска.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа подготовлена в рамках базового проекта “Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии”, № FWEF-2021-0009 и с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН по гранту № 075-15-2021-682.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бержинская Л.П., Ружич В.В., Саландаева О.И., Акбиев Р.Т. Разработка методических принципов комплексной прогностической оценки региональной

сейсмобезопасности // Природные риски и безопасность сооружений. № 2 (63). 2023. С. 26–34.

Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 5. С. 656–660.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.

Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука. 1977. 506 с.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Физическая мезомеханика очага землетрясения // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24.

Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41.

Левина Е.А., Ружич В.В. Исследование миграции сейсмичности на основе пространственно-временных диаграмм // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 2. 225–240. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0178

Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68.

Патент 2273035 РФ. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / С.Г. Псахье, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, В.В. Ружич, О.П. Смекалин, С.А. Борняков № 2004108514. Заявл. 22.03.2004. Оpubл. 27.03.2006. Бюл. № 14.

Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. 340 с.

Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Ружич В.В., Панченко А.Ю. Модельные исследования процессов возникновения и развития деформационных структур субдукционного типа в ледовом покрове озера Байкал // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 55–65.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.

Ружич В.В. Сейсмоструктурная деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: изд-во СО РАН. 1997. 144 с.

Ружич В.В., Черных Е.Н., Пономарева Е.И. Экспериментальное моделирование механизмов возникновения источников сейсмических колебаний при взаимодействии неровностей в разломах // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 563–576.

- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В.* О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018 а. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. DOI:10.5800/GT-2018-9-3-0383
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Травин А.В., Савельева В.Б., Остапчук А.А., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Юдин Д.С.* Определение РТ-условий при формировании сейсмогенных подвижек по глубинному сегменту краевого шва Сибирского кратона // Докл. РАН. 2018б. Т. 481. № С. 1–4. DOI: 10.1063/1.5013865)
- Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Левина Е.А., Сверкунов С.А., Шилько Е.В.* Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54–69.
- Ружич В.В., Левина Е.А.* О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 11–28. DOI:10.26006/22228535_2022_14_1_17
- Ружич В.В., Савельева В.Б.* Об изучении зеркал скольжения в очагах палеоземлетрясений в Прибайкалье и Монголии // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3. № 4. С. 37–50. DOI: 10.26516/2541-9641.2023.4.37
- Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М.* Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 727–743. DOI: 10.15372/GiG2021109
- Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н.* Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 86–113. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.2-58>
- Фролова Н.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Актуализация показателей сейсмического риска на примере Иркутской области и Республики Бурятия // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 1. С. 26–50. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.1.02
- Чипизубов А.В.* Выделение одноактных и одновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 3. С. 386–398.
- Davis C., Lahr P., Plumb C., Keilis-Borok V., Molchan G., Shebalin P.* Earthquake Prediction and Disaster Preparedness Interactive Analysis // Natural Hazards Review. 2010. V. 11. № 4. P. 173–183. DOI: 10.1061/_ASCE_NH.1527-6996.0000020
- Epstein B., Lomnitz C.* A Model for the Occurrence of Large Earthquakes // Nature. 1966. V. 211. P. 954–956. <https://doi.org/10.1038/211954b0>
- Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y. Y., Mulargia F.* Earthquakes cannot be predicted // Science. 1997. V. 275. № 5306. P. 1616.
- Iezzi F., Roberts G., Walker J.F., Papanikolaou I.* Occurrence of partial and total coseismic ruptures of segmented normal fault systems: Insights from the Central Apennines, Italy // Journal of Structural Geology. 2019. V. 126. P. 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.05.003>
- Leonard M.* Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2019. V. 100. № 5A. P. 1971–1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>
- Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V.* Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // Pure and Applied Geophysics. 2019. P. 163–168. DOI: 10.1007/s00024-019-02375-1
- Plata-Martinez R., Ide S., Shinohara M., et al.* Shallow slow earthquakes to decipher future catastrophic earthquakes in the Guerrero seismic gap // Nat Commun. 2021. V. 12. P. 3976. DOI: 10.1038/s41467-021-24210-9
- Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Dimaki A.V., Astafurov S.V., Lopatin V.V.* Influence of the state of interfaces on the character of local displacements in fault-block and interfacial media // Tech. Phys. Lett. 2005. V. 31. P. 712–715.
- 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. P. 1376–1392. DOI: 10.1002/2017TC004691
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Borneyakov S.A., Granin N.G.* Deformation and seismic effects in the ice cover of Lake Baikal // Russian Geology and Geophysics. 2009. V. 50. № 3. P. 214–221.
- Ruzhich V., Levina E.* On the development of a seismicogeological approach to the medium-term forecast of earthquakes in the Baikal rift zone // Dynamic Processes in Geospheres. 2022. V. 14. № 1. P. 17–28. (In Russ.) DOI: 10.26006/22228535_2022_14_1_17
- Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A., Grekov E.M., Krushelnitskiia K.V., Skorkina A.A., Selyutskaya O.V.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 515. № 1. P. 514–525. DOI: 10.1134/S1028334X23603115
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. V. 84. P. 974–1002.
- Wesnousky S.G.* Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture // Bulletin of the Seismological Society of America. 2008. V. 98. № 4. P. 1609–1632. <https://doi.org/10.1785/0120070111>

On the Use of Medium-Term Forecast Data for the Baikal Rift Zone in Seismic-Hazard Assessments

V. V. Ruzhich^{a, *} and E. A. Levina^a

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

^{*}*e-mail: ruzhich@crust.irk.ru*

Received April 19, 2024

revised April 19, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – The article presents the general results of medium- and long-term forecasting of earthquakes with $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$) in the Baikal rift zone. These results have recently been obtained through the joint use of the geoinformation system for predicting the preshock stage of earthquake preparation and its associated two-stage phenomenological model. This model was created based on the analysis of seismological data on the preparation of the most dangerous earthquakes that occurred in the Baikal rift zone. It is consistent with the results obtained in studies of seismic regimes of ice shock preparation on the Baikal ice cover and in conducting full-scale experiments on fault sections with the aim of clarifying physical and mechanical conditions for the emergence of the sources of seismic-induced oscillations. The paper provides an example of practical use of results obtained for earthquake forecasting, as well as the ways of refining seismic hazard assessments relative to the infrastructure in the city of Angarsk 100 km away from the seismically hazardous Main Sayan Fault (MSF), whose zone reveals a “locked” segment with a seismic gap during the seismic regime analysis. In accordance with its linear dimensioning which represents a length of 60 km, two L/M equations served as a basis for potential energy calculations whose maximum values correspond to M_{\max} 7.1 and 7.8. It is shown that the use of the obtained earthquake-forecast results assists in refining the level of seismic hazard for the nearest time intervals of expected earthquakes with different M_{\max} values. Consideration is being given to the example of assessing the current seismic hazard using a medium-term forecast for the infrastructure of the city of Angarsk for the probability of seismic shaking from the southeastern section of the MSF zone for the next 10 and 50 years. The comparison with the OSR-16 map showed that the calculations carried out indicate a relatively lower level of seismic hazard for the city of Angarsk for 10- and 50-year expectation periods.

Keywords: formalization of precursors, medium–long-term forecast, physical modeling, seismic gap, two-stage model, probability assessments, seismic hazard