

УДК 55124+550.34

О РАЗРАБОТКЕ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА К СРЕДНЕСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

© 2022 г. В. В. Ружич*, Е. А. Левина

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия***E-mail: Ruzhich@crust.irk.ru*

В работе рассмотрены результаты многолетних исследований, касающиеся разработки подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны с целью более эффективного обеспечения сейсмобезопасности местного населения и инфраструктуры. Для анализа сейсмического режима на стадиях подготовки опасных землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$) применена разработанная геоинформационная система «Prediction», основанная на известном методе распознавания образов. Для лучшего понимания геологических условий подготовки очагов землетрясений проводились натурные эксперименты по типу слайдер-моделей в зоне Ангарского разлома совместно со специалистами из институтов Российской академии наук с целью выяснения геомеханических условий возникновения источников генерации сейсмических колебаний. В результате выявлен двухстадийный режим подготовки сейсмического события, что далее использовалось для совершенствования среднесрочного прогноза. При изучении эксгумированных очагов палеоземлетрясений получены важные геолого-геофизические сведения о термодинамических и геомеханических условиях подготовки очагов палеоземлетрясений в зоне краевого шва Сибирского кратона, происходивших в недрах земной коры в прошлые эпохи сеймотектонических активизаций. Собранные сведения применены при разработке способов техногенных воздействий на сейсмоопасные сегменты разломов с целью снижения их сейсмического потенциала. При анализе совокупности собранных материалов было выяснено, что для выявления мест подготовки формирующихся очагов опасных землетрясений наиболее информативными критериями являются: сегменты высокоранговых сейсмоактивных разломов или их узлов пересечений, а также сейсмические бреши в эпицентральной поле в сочетании с признаками возрастающей на их периферии сейсмической активизации, возникающей в последнее десятилетие. В качестве примера приведены данные среднесрочного прогноза за период 2019–2022 гг. Установлено, что процент попадания эпицентров произошедших землетрясений с указанной энергией в места их ожидания, обозначенные в сводке, отправленной в 2019 г. МЧС Иркутской области, составляет 76%. Авторами предпринимаются усилия по улучшению подхода к совершенствованию среднесрочного прогноза применительно к особенностям сейсмического режима в БРЗ на основании применения экспериментально обоснованной двухстадийной модели подготовки землетрясений для получения формализованных оценок двух других базовых параметров прогноза: E – энергия и T – время ожидания события. В заключении представлены выводы о возросшей значимости среднесрочного прогноза при оценках сейсмической опасности, а также о существовании способов демпфирования разрушительных последствий будущих землетрясений с применением техногенных воздействий на выявленные при прогнозе сегменты разломов с признаками подготовки опасных землетрясений в ближайшие годы.

Ключевые слова: эксгумированные очаги землетрясений, эксперименты на разломах, среднесрочный прогноз, сейсмическая безопасность.

Для цитирования: Ружич В.В., Левина Е.А. О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 17–28. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_17.

Введение

Возрастающие в мире экономический ущерб и число жертв землетрясений свидетельствуют о необходимости разработок новых более эффективных способов обеспечения сейсмической

безопасности. В сфере поисков прорывных решений, касающихся данной проблемы, одной из главных задач принято считать прогноз землетрясений. Имеющиеся сложности в этой области во многом связаны с недостатком сведений, необходимых для создания новых моделей о геологических условиях подготовки очагов землетрясений в глубинах земной коры, долгое время считавшихся недоступными для всестороннего изучения. Данное обстоятельство в определенных кругах научного сообщества породило сомнение в возможности успешного прогноза опасных землетрясений, сохраняющееся до настоящего времени. Отсюда не случайно во многих странах тактика противостояния опасным землетрясениям, в основном, ограничивается такими мерами борьбы с последствиями разрушений как ускорение разборок завалов, регистрация жертв, подсчет убытков и сокращение сроков восстановления разрушенной инфраструктуры. Возражения закоренелых скептиков по отношению к прогнозу, в основном, сводятся к тому, что в нелинейной геологической среде высокоточный прогноз землетрясений невозможен. Поэтому ложные тревоги неизбежны, а они воспринимаются как сугубо неприемлемые [Geller et al., 1997 и др.]. Тем не менее, в последние десятилетия в научном сообществе стали вполне очевидными достигнутые успехи в сфере совершенствования методов прогноза землетрясений, во многом обусловленные применением мультидисциплинарных исследований, например, представленные в работах [Kossobokov, Shebalin, 2003; Завьялов, 2006; Соболев, 2011]. Ниже предложены для обсуждения результаты, полученные авторами в рамках сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу. В нем, наряду с анализом сейсмического режима, дополнительно предложено использовать геолого-геофизические и натурные эксперименты, что позволяет с большей детальностью подходить к совершенствованию среднесрочного прогноза опасных землетрясений, длительное и многостадийное формирование очагов которых происходит в глубинных сегментах зон активных разломов.

Геологические и экспериментальные методы и результаты изучения строения очагов землетрясений

О размерах и конфигурации очагов землетрясений

В данном разделе уделено повышенное внимание анализу собранных сведений о геологическом строении очагов землетрясений в зонах разломов. Отчасти это уже сделано авторами публикаций, в которых очаги землетрясений рассматривались как активизированные сегменты зон крупномасштабных разломов, где при высокоскоростном проскальзывании крыльев эпизодически возникала генерация

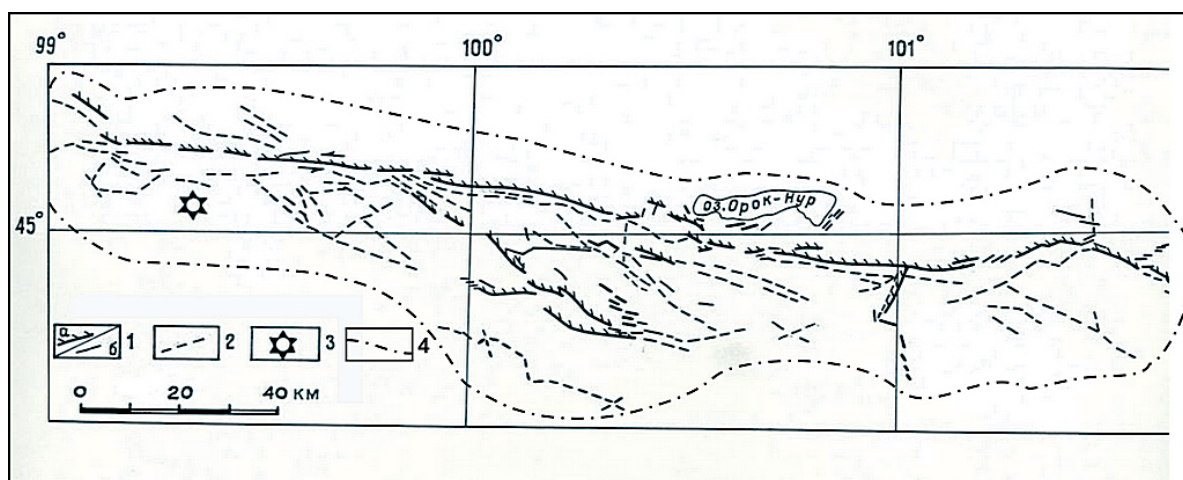


Рис. 1. Схема упрощенного строения приповерхностной части очага Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. М = 8.1, приуроченного к участку зоны Долиноозерского разлома [Солоненко, 1960].

1 – сейсмодислокации (а) сдвигового и (б) взбросо-сдвигового типов; 2 – сейсмодислокации неуставленного типа; 3 – эпицентр в пределах площади очага землетрясения; 4 – примерные границы распространения девятибалльных изосейст сейсмических сотрясений

высокоамплитудных сейсмических колебаний с характерным амплитудно-частотным диапазоном порядка 1–10 Гц [Кочарян, 2016; 2021; Ружич, Кочарян, 2017]. Представления о строении и размерах очагов землетрясений во многом основываются на сведениях, полученных в результате обследования системы сейсмодислокаций, образовавшейся при сильных землетрясениях (рис. 1).

На приведенной схеме отмечен эпицентр землетрясения, который принято рассматривать в виде проекции на земную поверхность гипоцентра, от которого начиналось вспарывание косейсмического разрыва. Поскольку линейная протяженность очагов сильных и катастрофических землетрясений исчисляется десятками-сотнями км, то на сеймопрогностических картах не целесообразно отображать их местоположение в виде эпицентров. Подобный способ обозначения приводит к ошибкам при оценках точности определения мест очагов будущих землетрясений, что имеет практическое значение в оценках сейсмической опасности. Поэтому авторами выбран физически более обоснованный вариант обозначения местоположения прогнозируемых очагов на земную поверхность в виде территории, ограниченной изосейстами пятибалльных сейсмических сотрясений от ожидаемых сейсмических колебаний. Для местных жителей подобные сейсмические сотрясения хорошо ощутимы и они могут рассчитываться, исходя из значений ожидаемой энергии прогнозируемого сейсмического события. В качестве уравнения спада балльности в данном случае использовалась формула

$$Y = Ae^{bx},$$

где A – балл в эпицентре, Y – балл в точке, находящейся на расстоянии x от эпицентра, b – задаваемый коэффициент. Расчет спада балльности производился с заданным шагом по восьми направлениям. Достоверно установлено, что в разных районах наблюдаются некоторые закономерности в распределении интенсивности сотрясений – она спадает по одним направлениям быстрее, чем по другим, что чаще всего зависит от разнообразия физико-механических свойств грунтов. Используя в качестве тестового какое-либо землетрясение, для которого известно поле распределения силы колебаний в различных местах на разных расстояниях от эпицентра, подбирались подходящие для этой местности коэффициенты b [Левина, 2016]. Авторами для оценок магнитуд готовящихся очагов землетрясений также использовались параметры линейной протяженности сегментов разломов, соизмеримых с линейными размерами сейсмических брешей. В частности для расчетов применялось соотношение M/L , взятое из работы [Leonard, 2010]:

$$M = 4.40 + 1.52 \lg(L),$$

где M – магнитуда, L – линейная протяженность очага (км).

Краткие сведения о глубинных процессах при подготовке очагов землетрясений

По ходу детального картирования и изучения протяженной зоны сейсмодислокаций катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения 4.12.1957 г. ($M = 8.1$) в Северной Монголии в этой же зоне документально зафиксированы следы более древних разновозрастных палеосейсмодислокаций, что привело к разработке палеосейсмогеологического метода, позволяющего выявлять на земной поверхности местоположение очагов сильных землетрясений прошлого периода [Солоненко, 1960]. В дальнейшем по соотношению протяженности палеосейсмодислокаций стало возможным оценивать энергетический уровень произошедших землетрясений. Однако по результатам изучения только приповерхностных сейсмодислокаций нет возможности распознавать физико-петрологические и геомеханические условия зарождения очагов землетрясений в глубинах земной коры.

В настоящее время удалось обнаружить такие возможности посредством геолого-структурного и петрофизического изучения разломов в пределах эксгумированных очагов палеоземлетрясений, например, в ряде районов Прибайкалья и Монголии, в которых по ряду признаков были обнаружены

косейсмические разрывы [Ружич, Кочарян, 2017]. В итоге палеосейсмогеологический метод дополняется новыми способами изучения условий формирования очагов землетрясений, что позволяет изучать глубинное строение палеосейсмодислокаций и эндогенные тектонофизические условия возникновения очагов современных землетрясений, исходя из их геомеханической идентичности с палеоочагами [Ружич и др., 2018a].

Полученные сведения рассматриваются как важные критерии выявления косейсмических разрывных нарушений, являющихся источниками генерации сейсмических колебаний. Механизм возникновения подобных источников обусловлен законами трения, возникающего в режиме фрикционного взаимодействия при разрушении неровностей на поверхностях скольжения. Они наглядно фиксируются в строении косейсмических разрывов, что согласуется с известной моделью «*stick-slip*» [Соболев и др., 2016; Кочарян, 2016; 2021]. Дополнительными признаками для выявления глубинных сейсмогенных разрывов являются такие петрофизические свидетельства как ультракатакластический характер переработки горных пород при трении в моменты скольжения, состав минерального заполнения трещин и покрытий на плоскостях зеркал скольжения. По продуктам проявления фрикционного разогрева вещества горных пород в виде пленочного стекловидного покрытия зеркал скольжения, при повышенных температурах и давлениях на глубинных уровнях 12–18 км в присутствии флюидов разного состава выявляются характерные минеральные новообразования.

В последние десятилетия в США, Китае, Японии, Германии и в других технически высокоразвитых странах распространилась практика проведения быстрого разбуривания сегментов разломов, в которых произошли недавние сильные землетрясения. Эти мероприятия позволили после обработки образцов поднятого керна существенным образом расширить представления о термодинамических параметрах глубинных трибологических процессов, произошедших в плоскостях косейсмического скольжения на глубинах до 1–3 км [Кочарян, 2016; Ружич, Кочарян, 2018], и дополнительно расширяет возможности изучения условий подготовки землетрясений в участках разломов на глубинах до 5 км [Кочарян, 2021]. Из рассмотренного материала в данном разделе можно представить следующие выводы. По изученному строению разломов, вещественного состава глинок трения, зеркал скольжения и псевдотахилитов есть возможность визуально изучать существующие фрикционные механизмы возникновения источников генерации сейсмических импульсов в эпизодах разрушения неровностей или прочностных барьеров, сопровождающихся эмиссией сейсмических импульсов [Соболев и др., 2015; Ружич и др., 2018b]. Фиксируемые в настоящее время условия и механизмы подготовки современных очагов землетрясений на глубинах залегания сейсмофокального горизонта можно считать идентичными тем, что выявляются при полевом изучении эксгумированных очагов палеоземлетрясений. Следовательно, в подобных геологических данных содержится информация об условиях подготовки современных землетрясений, важная для понимания тектонофизических условий возникновения их очагов и для совершенствования всех видов прогноза землетрясений.

Натурные эксперименты по моделированию условий возникновения очагов сейсмического излучения

Для получения более детальных сведений о физических механизмах и стадиях подготовки источников генерации упругих волновых колебаний авторами, совместно со специалистами Института динамики геосфер РАН, проведены натурные эксперименты на участках разломов Прибайкалья. Значительная их часть осуществлялась вдоль зон Обручевского, Ангарского и Приморского разломов на северо-западном побережье Байкальской рифтовой впадины. На полигоне в п. Листвянка для испытаний была применена сконструированная установка «Трибо» в виде армированного бетонного блока весом 0.6 тонны. Он перемещался по неровностям сместителя разлома, при разрушении которых полевыми сейсмическими станциями фиксировались возникающие источники генерации сейсмических импульсов.

На рис. 2 показан один из эпизодов применения установки «Трибо», а также график, поясняющий физический смысл двухстадийной подготовки возникновения источника эмиссии сейсмических

импульсов, возникшего в момент динамического разрушения крупной одиночной неровности на плоскости разлома скользящей плитой. Детально результаты подобных испытаний рассмотрены в работах [Ружич и др., 2014; Ostapchuk et al., 2019].

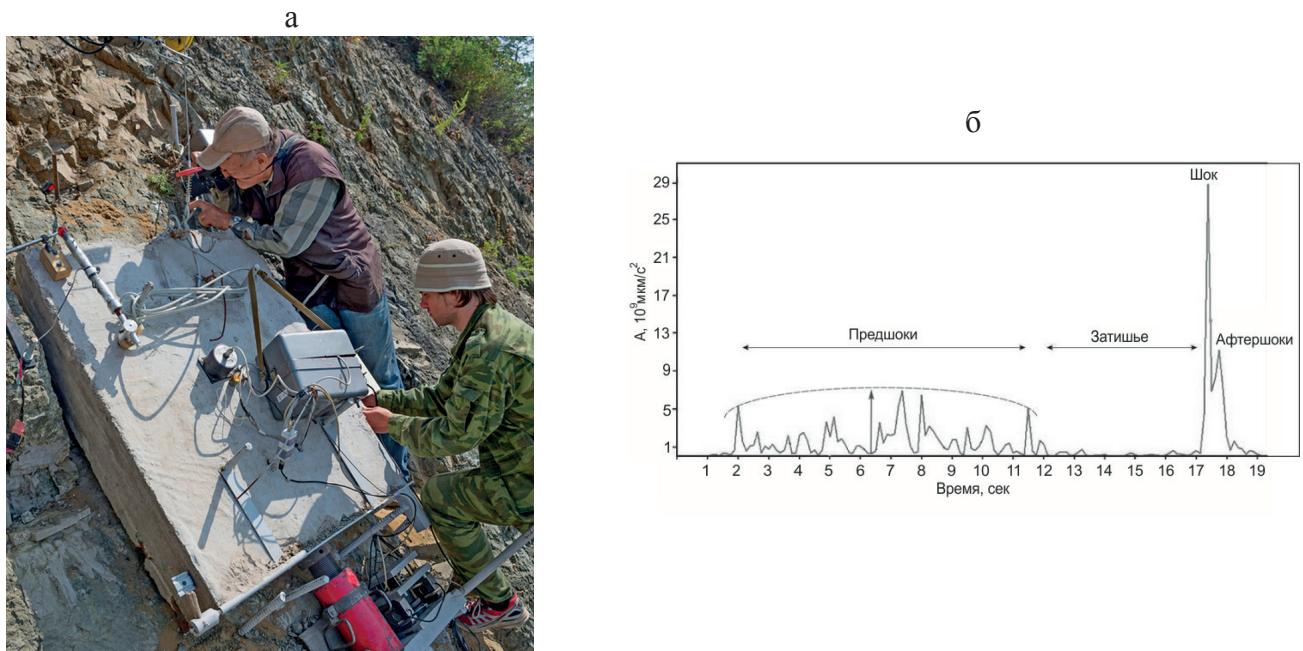


Рис. 2. а - полигон в Листвянке, где использовалась установка «Трибо» в виде плиты на плоскости сегмента Ангарского разлома с установленными полевыми сейсмостанциями, деформографом и домкратом; б – график соотношения амплитуд сейсмических ускорений в режиме излучения сейсмических импульсов при прерывистом скольжении плиты и разрушении крупной неровности. Пунктирной линией обозначена стадия предшоковой сейсмической активизации, после которой фиксируется стадия относительного сейсмического затишья, заканчивающегося максимальным сейсмическим импульсом (шоком). Вертикальная стрелка обозначает максимальную амплитуду сейсмического ускорения на предшоковой стадии.

Согласно графику на рис. 2б, при подготовке срыва неровности и возникновении максимального сейсмического импульса в момент скачкообразного смещения плиты фиксируются две стадии: «предшоковой» активизации и стадии сейсмического затишья перед шоковым событием. Приведенное название первой стадии взято авторами, чтобы отличать серию фиксируемых в эксперименте сейсмических импульсов от принадлежности к числу форшоков, поскольку они отделены от момента шока продолжительной стадией относительного сейсмического затишья. Проявленное повышенное внимание к результатам данного эксперимента объясняется тем, что в изученном нами сейсмическом режиме подготовки многих землетрясений в БРЗ, фиксировалась сходная ситуация. У нас нет оснований называть форшоками сейсмические события, происходящие за несколько лет до момента главного толчка.

К числу форшоков можно отнести толчки, происходящие в плейстосейстовой области за несколько дней или недель до главного толчка. Опыт наблюдений показывает, что в БРЗ суммарная длительность двух стадий для изученных землетрясений классом $K \geq 13$ ограничена временным интервалом $1 \div 11$ лет. Расчеты показали, что суммарная длительность подготовительных стадий возрастает с увеличением энергии последующего события, о чем будет сказано далее.

Физическая реальность выявляемого двух стадийного режима сейсмического излучения при подготовке опасного сейсмического события подтверждается и тем, что он фиксировался и при возникновении ледовых ударов, обнаруженных в ходе проведения многолетних наблюдений при изучении актов динамического разрушения ледяного покрова оз. Байкала, сопровождаемых сходным режимом сейсмического излучения [Добрецов и др., 2011].

Таким образом, рассматриваемые результаты натурных экспериментов и физического моделирования в ледовой среде позволили получить приемлемое физическое объяснение по поводу проявлений стадий сейсмической активизации и последующего затишья в сейсмическом режиме подготовки землетрясений в пределах БРЗ. Подобный режим фиксируется во многих рассмотренных сегментах временно «запертых» разломов, где фиксируются сейсмические бреши и в течение ряда лет возникают предшествующие землетрясения, которые не являются форшоками в традиционном понимании. Понятие «сейсмическое затишье» перед готовящимся землетрясением является достаточно распространенным. В пределах БРЗ такое явление проявляется на разномасштабном пространственном и временном уровнях.

В рассмотренном разделе обосновывается вывод о том, что полученные результаты натурных экспериментов, представленные в виде двухстадийной феноменологической модели, целесообразно использовать при разработке среднесрочного прогноза землетрясений.

Сейсмогеологический подход к среднесрочному прогнозу землетрясений

При оценках длительности временного интервала для среднесрочного прогноза, авторами используется интервал 1÷11 лет. Он соответствует отчетливо проявляющейся в сейсмическом режиме БРЗ длительности цикла солнечной активности, что рассмотрено в [Ружич, 1997; Ружич, Левина, 2020]. При разработке методов прогноза землетрясений принято оценивать три взаимосвязанных базовых параметра: место – M , время – T и энергию – E . В обсуждаемом подходе к сейсмогеологическому методу среднесрочного прогноза землетрясений для геодинамических условий в БРЗ, распознавание сейсмоопасных сегментов разломов базируется на анализе пространственно-временных параметров эпицентрального сейсмического поля и параметров сейсмического режима. Он осуществляется с применением разработанной ГИС «Prediction» [Ружич, 1997; Levina, 2011] на основе изучения каталога землетрясений за период инструментальных наблюдений 1950–2022 гг., представляемого Байкальским филиалом Единой геофизической службы РАН в г. Иркутске. Дополнительно использовался каталог исторических землетрясений в пределах БРЗ, начинающийся с 1725 г. [Новый каталог, 1977].

Для выявления мест подготовки землетрясений использовались сведения об изменениях сейсмического режима во времени и пространстве на трех масштабных уровнях. Изначально рассматривалась вся БРЗ, далее отдельно изучался режим на ее флангах и в центральной части. На следующем этапе с наибольшей детальностью анализу подвергались 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 их энергетического уровня в разных участках БРЗ в выбранные временные интервалы. При анализе сейсмического режима на стадии относительного сейсмического затишья перед моментом возникновения землетрясения отчетливо фиксировалось заметное уменьшение количества землетрясений, их энергетического уровня [Ружич, 1997; Пономарева и др., 2014]. Подобные изменения находят соответствующее отражение в виде уменьшения коэффициента «а» в диапазоне значений $0.30 \div 0.45$ в формуле Гутенберга-Рихтера. С позиций, проведенных нами натурных экспериментальных наблюдений, подобное явление в предшествующей стадии главного толчка вероятнее всего объясняется замедлением скорости скольжения берегов разлома и интенсивности трещинообразования в очаге перед моментом высокоскоростного косейсмического проскальзывания [Ostapchuk et al., 2019].

Привлечение рассмотренных выше результатов проведения натурных экспериментов и выяснения механизмов возникновения сейсмической генерации на разных стадиях подготовки землетрясений, позволяет улучшать возможности и результаты среднесрочного прогноза. В качестве практической реализации сведений о прогнозе, а также для контроля результатов, полученная информация регулярно отправлялась в отдел мониторинга МЧС Иркутской области в виде сейсмопрогностических сводок с указанием районов ожидаемых очагов землетрясений, ограниченных расчетными изосейстами

сейсмических сотрясений. С позиций сейсмогеологического подхода выбранная нами система обозначения выявляемых районов подготовки землетрясений пятибалльными изосейстами обосновывается тем, что подобная интенсивность сейсмических колебаний, как правило, вызывает панику среди местного населения.

В качестве примера последнего результата среднесрочного прогноза на рис. 3 представлена карта расположения мест готовящихся очагов землетрясений с энергетическим классом $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$), которая была отправлена 18 сентября 2019 г. в отдел мониторинга МЧС. Расчеты показали, что на представленной карте среднесрочного прогноза за 3-х летний временной интервал (10.2019–07.2022 гг.) в пределы районов, ограниченных пятибалльными изосейстами, вошло 76% из числа произошедших землетрясений с классом $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$). В их число включены семь сильных афтершоков Хубсугульского землетрясения, которые учитывались как опасные события, способные повреждать инженерные сооружения, снижая их сейсмостойкость, а также оказывать сильные психологические воздействия на местное население.



Рис. 3. Карта среднесрочного прогноза с указанными в виде красных изолиний местами предполагаемых очагов землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$). В центре территорий, ограниченных изосейстами от 5 баллов и выше, приведены значения прогнозируемой максимальной балльности. Кругами, показаны эпицентры землетрясений, произошедших в БРЗ за период наблюдений 18.09.2019–20.07.2022 гг., а также их названия. В левом верхнем углу приведена энергетическая шкала эпицентров землетрясений

Стоит отметить, что если в указанных районах на картах прогноза ожидаемые землетрясения не происходили в указанные сроки, то во многих случаях ошибки в нашем методе прогнозирования были связаны с неточностью определения параметра T . Поэтому не случайно повышенное внимание уделялось совершенствованию способов оценок параметров E и T для готовящихся очагов землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$). Ниже на рисунках 4 и 5 представлены графики для указанных параметров, построенные на основе двухстадийной модели.

Линия тренда на рис. 4 представлена уравнением:

$$T = 8^{-10} Lg(E)^{8.4}, R = 0.64,$$

где E – энергия ожидаемого землетрясения, T – длительность затишья в сутках, R – коэффициент корреляции.

Уравнение для линии тренда на рис. 5:

$$Kz = 0.12 Kf^2 - 2.5 Kf + 26.1, R = 0.68,$$

где Kz – энергетический класс шокowego события, Kf – энергия максимального толчка на предшоковой стадии, R – коэффициент корреляции.

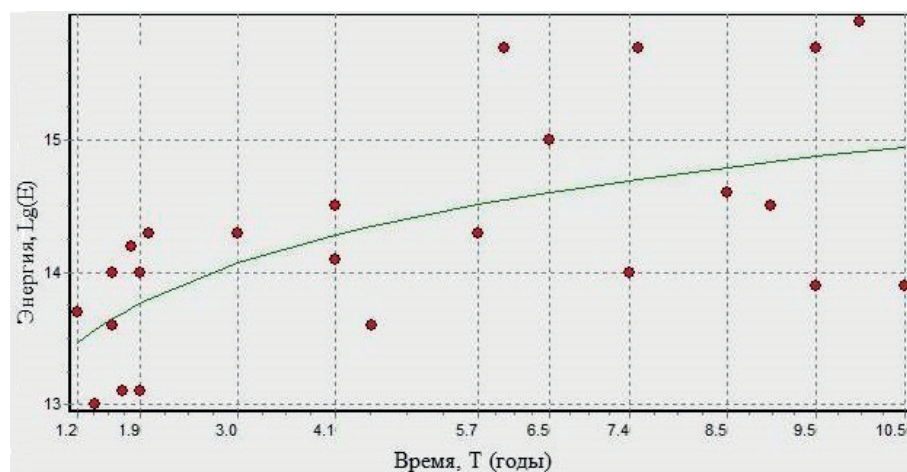
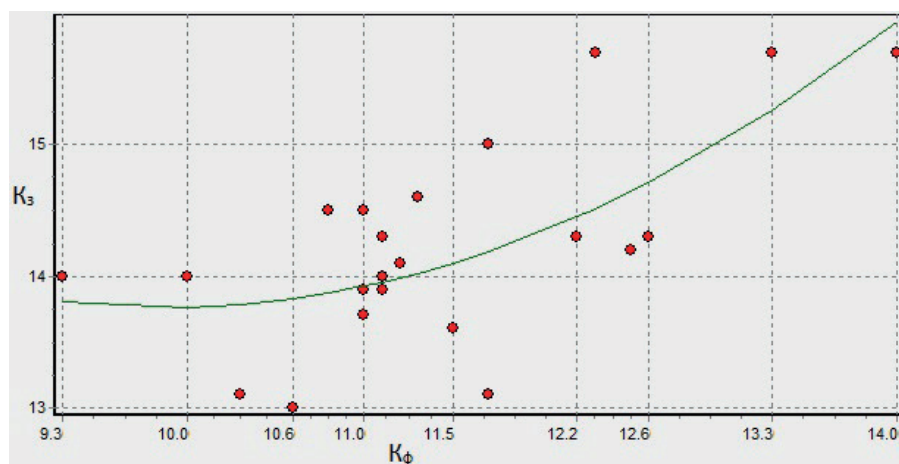


Рис. 4. Соотношение параметров энергии ожидаемого землетрясения с длительностью сейсмического затишья

Рис. 5. Соотношение энергии готовящегося землетрясения и энергии максимального события в предшоковой стадии



Полученные соотношения можно рассматривать как первое ориентировочное приближение к способам количественных оценок базовых параметров, необходимых для любого вида прогноза. Наблюдаемый на графиках значительный разброс данных объясняется природным разнообразием и сложностью геологических механизмов подготовки каждого отдельного очага землетрясения в сегментах разломов различного морфогенетического типа.

Авторами для оценок магнитуд готовящихся очагов землетрясений также использовались параметры линейной протяженности сегментов разломов, соизмеримых с линейными размерами сейсмических брешей. В частности для расчетов применялось соотношение M/L , взятое из работы [Leonard, 2010]:

$$M = 4.40 + 1.52 \lg(L),$$

где M – магнитуда, L – линейная протяженность очага (км).

В настоящее время проводятся дальнейшие исследования с целью уточнения оценок всех трех базовых параметров прогноза – M , T и E .

Обсуждение полученных результатов и выводы

Из анализа современных публикаций мирового научного сообщества сегодня уже есть достаточно оснований для признания пользы от полученных результатов исследований в сфере среднесрочного прогноза. С изложенных выше сейсмогеологических представлений неизбежно следует вывод о том, что любые виды прогноза землетрясений, возникающих в нелинейной геологической среде, всегда будут оставаться вероятностными, но, тем не менее, они весьма значимы для практических приложений.

Уже на данном этапе достигнутые результаты позволяют с большим основанием подойти к стратегии снижения сейсмического риска, что отмечается в работах [Kossobokov, 2003; Завьялов, 2006; Davis et al., 2010; Фролова и др., 2022]. Но вместе с этим также следует осознавать, что самый успешный прогноз не позволит избежать разрушительных последствий и жертв возникновения новых сейсмических катастроф. В настоящее время среднесрочный прогноз опасных землетрясений приближается к уровню, который позволяет наряду с приемлемыми оценками вероятности их возникновения выявлять места подготовки землетрясений, их энергию и время ожидания [Писаренко и др., 2022]. Следовательно, улучшается возможность точнее оценивать сейсмический риск для населенных пунктов и уязвимых промышленных центров. При налаженном сотрудничестве ученых с представителями властных структур возрастают возможности поиска приемлемого компромисса для принятия решений по избранию превентивных мер, направленных на снижение сейсмической опасности и, соответственно, сейсмического риска. В некоторых странах подобные подходы уже применяются, например, в работах [Davis et al., 2010; Фролова и др., 2022].

Но вместе с этим, в последние два десятилетия все большее внимание мировой общественности привлекают способы более эффективного обеспечения сейсмической безопасности посредством проведения техногенных воздействий на выявленные при прогнозе потенциально сейсмоопасных сегментов разломов для смягчения или предотвращения ожидаемых катастрофических последствий землетрясений. В России при сотрудничестве со многими российскими зарубежными исследователями на основании теоретических расчетов и результатов натурных экспериментов с техногенными воздействиями на небольшие участки разломов подобный подход рассматривается достаточно обоснованным и перспективным [Мирзоев и др., 2009; Ружич и др., 2020; Патент, 2020]. Отсюда для реализации подобных мер становятся весьма востребованными результаты выше рассмотренных исследований, полученные при изучении строения и условий возникновения палеоземлетрясений в эксгумированных очагах [Ружич и др., 2014; Ruzhich et al., 2019; Ружич и др., 2022].

Финансирование

Данная статья подготовлена в рамках государственного задания Института земной коры РАН по теме НИР «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (тема № FWEF-2021-0009). Исследования проводились с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

Благодарности.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам за внимательный просмотр статьи и многие важные замечания, что способствовало ее значительному улучшению.

Список литературы

Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // Физическая мезомеханика. – 2011. Т. 14. № 4. С. 69–79.

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

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

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. Геоинформационная система для прогноза землетрясений и горных ударов: разработка

и примеры применения в Байкальской рифтовой зоне и Норильском месторождении: Дис. канд. геол.-минерал. наук. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2011. 114 с.

Левина Е.А. Оперативная оценка распределения степени сейсмической опасности средствами ГИС // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 3–8.

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.

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

Патент на изобретение № 2740630. Способ снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов. Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Шилько Е.В., Иванишин В.Н., Акчурин Р.Х. Заявка 2291199008, приоритет изобретения 02.06.2020. Государственная регистрация 18.01.2021.

Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Скоркина А.А., Левина Е.А. Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли, 2022. № 3. С. 37–55. DOI: 10.31857/S000233372203005X.

Пономарёва Е.И., Ружич В.В., Левина Е.А. Оперативный среднесрочный прогноз землетрясений в Прибайкалье и его возможности // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о земле». 2014. Т. 8. С. 67–78.

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

Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. Физическое моделирование условий возникновения источников сейсмических колебаний при разрушении неровностей в зонах разломов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 3. С. 43–52.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 1021–1034. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0330.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О строении и 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.

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 // ДАН. 2018 б. Т. 481. № 4. С. 1–4. DOI.org/10.1063/1.5013865).

Ружич В.В., Левина Е.А. Особенности распределения сейсмической активности в разных регионах Земли по фазам 11-летнего солнечного цикла // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 30–35. DOI: 10.12737/szf-54201901.

Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Акчурин Р.Н., Левина Е.А. Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины // Геодинамика и тектонофизика, 2022. № 3, том 13, с. 1–21. DOI:10.5800/GT-2022-13-3-0644.

Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. Москва: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.

Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Иванова Л. А., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Исследование нанокристаллов в образце зеркала скольжения // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 1–12.

Солоненко В.П. Гоби-Алтайское землетрясение // Геология и геофизика. 1960. № 2. С. 3–27.

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>.

Davis C., P.E.; Keilis-Borok V.; Molchan G.; Shebalin P.; Lahr P., P.E., M.ASCE; and Plumb C. Earthquake Prediction and Disaster Preparedness Interactive Analysis: in Natural Hazards Review. November 2010. P. 173–183. DOI: 10.1061/_ASCE_NH.1527-6996.0000020.

Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y. Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted. Science 275. 1997. P. 1616–1619.

Kossobokov V.G., Shebalin V.P. Earthquake Prediction. In: Keilis-Borok, V.I., and A.A. Soloviev, (Editors) Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer, Heidelberg. 2003. P. 141–207.

Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. 100(5A), 1971–1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>.

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., et al., (2019). Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // Pure and Applied Geophysics. P. 163–168. [https://doi: 10.1007/s00024-019-02375-1](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1).

Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Shilko E.V., Levina E.A. Physical mesomechanics based interdisciplinary approach to the development of new methods for managing deformation process in fault zones // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2167. (<https://doi.org/10.1063/1.5132167>).

ON THE DEVELOPMENT OF A SEISMOGEOLOGICAL APPROACH TO THE MEDIUM-TERM FORECAST OF EARTHQUAKES IN THE BAIKAL RIFT ZONE

V. V. Ruzhych*, E. A. Levina

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

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

The paper considers the results of many years of research related to the development of an approach to the medium-term earthquake prediction within the Baikal Rift Zone in order to more effectively ensure the seismic safety of the local population and infrastructure. To analyze the seismic regime at the stages of preparation of dangerous earthquakes with $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$), the developed geoinformation system "Prediction" based on the well-known method of pattern recognition was used. In order to better understand the geological conditions for the preparation of earthquake sources, full-scale experiments on the type of slider models in the Angara fault zone were carried out together with specialists from the institutes of the Russian Academy of Sciences in order to determine the geomechanical conditions for the occurrence of seismic oscillation sources. As a result, a two-stage seismic event preparation regime was revealed, which was further used to improve the medium-term forecast. The study of exhumed paleo-earthquake sources yielded important geological and geophysical data on the thermodynamic and geomechanical conditions for the preparation of paleo-earthquake sources in the zone of the marginal suture of the Siberian Craton, which occurred in the bowels of the earth's crust during past epochs of seismotectonic activations. The collected information was used in the development of methods for man-made impacts on seismically hazardous fault segments in order to reduce their seismic potential. When analyzing the totality of the collected materials, it was found that the most informative criteria for identifying the places of preparation of the emerging sources of dangerous earthquakes are: segments of high-ranking seismically active faults or their intersection nodes, as well as seismic gaps in the epicentral field in combination with signs of increasing seismic activity on their periphery that occurs in the last decade. As an example, the data of the medium-term forecast for the period 2019-2022 are given. It has been established that the percentage of epicenters of occurred earthquakes with the specified energy falling into their waiting areas, indicated in the report sent in 2019 to the Ministry of Emergency Situations of the Irkutsk Region, is 76%. The authors are making efforts to improve the approach to improving the medium-term forecast in relation to the features of the seismic regime in the BRZ based on the use of an experimentally substantiated two-stage earthquake preparation model to obtain formalized estimates of the other two basic forecast parameters "E" - energy and "T" - event waiting time. In conclusion, conclusions are presented about the increased importance of the medium-term forecast in seismic hazard assessments, as well as about the existence of ways to dampen the destructive consequences of future earthquakes using man-made impacts on the fault segments identified during the forecast with signs of preparation of dangerous earthquakes in the coming years.

Keywords: exhumed earthquake sources, experiments on faults, medium-term forecast, seismic safety.