

**ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ
В ПЛИОЦЕН-ЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ
(на примере Байкальской рифтовой зоны)**

О.В. Лунина

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

Разработан новый формализованный подход к оценке степени активности разломов, базирующийся на комплексном анализе разнородных данных. Последние систематизируются в каталоге, включающем два основных раздела: общие сведения и важнейшие параметры плиоцен-четвертичных разломов; различные признаки их активности (геоморфологические, структурно-геологические, палеосейсмологические, сейсмологические, геофизические, геодезические, инженерно-геологические, гидрологические, метеорологические), за которые в зависимости от значимости признака присваиваются экспертные оценки. Степень активности рассчитывается суммированием полученных значений и записывается как общий балл активности разлома по имеющимся данным. Реализация принципов подобного подхода для района Баргузинской и Тункинской впадин, а также северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны позволила классифицировать разломы по степени активности на пять групп (слабую, среднюю, повышенную, высокую и аномально высокую), а результаты расчетов представить в виде соответствующих карт. Уточнено существующее определение опасного разлома. К таковым рекомендуется относить разрывные нарушения с повышенной, высокой или аномально высокой степенью активности. В пределах изученных площадей к опасным разломам относятся не более 4–8 %. При привлечении большего количества данных этот процент может повыситься, но незначительно, так как все известные на сегодняшний день сейсмологические, палеосейсмологические и структурно-геологические признаки, вносящие основной вклад в расчет степени активности разломов, учтены. Предложенный подход может быть использован для решения прикладных задач, связанных с оценкой сейсмической опасности и выбором участков, перспективных для проведения геофизического мониторинга сейсмичности.

Разломы, степень активности, оценка, база данных, сейсмическая опасность.

**ACTIVITY RATING OF PLIOCENE–QUATERNARY FAULTS: A FORMALIZED APPROACH
(example of the Baikal Rift system)**

O.V. Lunina

It is suggested to estimate the Pliocene–Quaternary fault activity in a formalized way from synthesis of different data. The respective database consists of two main sections: general information and basic fault parameters and geomorphic, structural, paleoseismic, seismological, geophysical, geodetic, engineering-geological, hydrological, and meteorological data. The fault characteristics are scored according to their significance, and the cumulative score measures the fault activity. With this approach, the faults in the Barguzin and Tunka rift basins and in the northeastern flank of the Baikal Rift system have been divided into five activity classes (low, medium, relatively high, high, and very high activity) and mapped correspondingly. It has been recommended that the concept of a hazardous fault, as updated with regard to the activity rating, refer to faults of relatively high, high, and very high activity. Thus identified hazardous faults within the study area are quite few (4–8 %), though this percent may increase slightly as more input data become available. The underestimation cannot be dramatic because all known seismological and structural characteristics of faults essential for the activity rating have been already taken into account. The new approach may be useful in seismic risk assessment and in choice of sites for instrumental monitoring of seismicity.

Faults, activity rating, database, seismic hazard

ВВЕДЕНИЕ

О разломах и их активности написано большое количество работ, и тем не менее эта тема не становится менее актуальной, так как тесно связана с проблемами сейсmobезопасности территорий. Интенсивно развивающиеся в последние годы строительство трубопроводов и протяженных мостов, а также мно-

голетние исследования автора активных тектонических нарушений и в целом разломно-блокового строения земной коры для плиоцен-четвертичного времени привели к мысли о необходимости создания простого формализованного подхода к оценке степени активности разломов, откартированных в пределах какой-либо площади.

То, что активные разломы надо систематизировать по степени активности обсуждалось и ранее. Так, А.В. Чипизубов [1991] предложил выделять активные разломы пяти классов, заложив в основу своего способа возраст активизации. При этом многие прямые и косвенные признаки активности дизъюнктивов не нашли отражения в его работе. С.И. Шерман, В.А. Савитский [2004, 2005] ввели количественный и энергетический индексы сейсмичности, позволяющие классифицировать разломы по двум показателям современной сейсмической активности. Несмотря на очевидные достоинства метода, его сложно применять на платформенных практически асейсмичных территориях, в пределах которых также существуют опасные разломы, и могут развиваться деформации, способные приводить к аварийным ситуациям с тяжелыми экологическими и социально-экономическими последствиями [Кузьмин, Жуков, 2004]. Кроме того, он не учитывает возможность криповых смещений и в его основе используются только инструментальные записи о сейсмичности, что для прогноза сильных землетрясений явно недостаточно. В работах [Рогожин, Овсяченко, 2001; Овсяченко, 2006] излагается схожий по сути с представляемым здесь подход, основанный на экспертных оценках активности разломов и использованный при строительстве нефтепровода на Северо-Западном Кавказе, но он ограничивается набором только геолого-геоморфологических параметров. Попытки найти аналогичные разработки в зарубежной литературе не увенчались успехом.

По мнению автора, целесообразно учитывать все имеющиеся сведения о разломах, в связи с чем цель настоящей статьи — представить для обсуждения новый формализованный подход к количественной оценке степени активности разломов на основе комплекса данных для выделения среди них потенциально опасных.

ПОНЯТИЯ О РАЗЛОМАХ, ИХ АКТИВНОСТИ И ОПАСНОСТИ

Согласно современным тектонофизическим представлениям, под разломом понимается поверхность механического нарушения сплошности протяженностью более 100 м, образующаяся в деформируемом теле под действием приложенных к нему внешних сил [Семинский и др., 2005]. Более мелкие разрывные нарушения классифицируются как трещины. Разлом имеет определенную зону, включающую в себя не только тектониты разломного сместителя, но и существенно большие по размерам объемы горных пород, в которых имеют место генетически связанные с его формированием пластические и разрывные деформации. Главными критериями для выделения разломов традиционно служат морфотектонические линейменты, выявляемые при дешифрировании гидрографической сети и рельефа, и зоны разрывных нарушений, документируемые при структурно-геологическом картировании. В основе представляемых в данной работе карт плиоцен-четвертичных разломов лежит большой объем фактических материалов, собранных и обработанных по единой методике [Лунина, Гладков, 2004, 2007, 2008].

Существует несколько довольно четких определений активного разлома, основанных на временной продолжительности активизации и/или направленности и величине смещений. В ряде работ под активными разломами понимаются древние, омоложенные в новейшее время, а также новообразованные разломы, по которым по комплексу признаков констатируются движения в позднем плейстоцене и голоцене, т.е. в последние 100—130 тыс. лет [Трифонов и др., 1993; Лукина, 1996]. Близкое определение этого термина дается А.А. Никоновым [1995]. С.А. Несмеянов с соавторами [1992] предлагает считать активными современные разрывные нарушения, смещения по которым происходят в настоящее время и зафиксированы инструментально методами геодезии или геофизики либо документально при сопоставлении разновременных карт, исторических материалов и т.п. В работе [Vita-Finzi, 1986] указывается, что оценка возраста активизации в разных странах варьирует от 5 до 500 тыс. лет, хотя многие специалисты из России, США, Китая и Японии под активностью разломов понимают «повторное оживление» в течение последних 1—2 млн лет или просто активизацию за этот же интервал времени [Кузьмин, Жуков, 2004], т.е. за позднеплиоцен-четвертичный период, согласно новой международной стратиграфической шкале [International..., 2005]. Автор настоящей работы придерживается последнего определения термина «активный разлом», так как именно оно используется при регламентировании геодинамической безопасности различных объектов недропользования. Следует отметить, что строительные нормы и правила для сейсмических районов (СНиП II-7-81) требуют учета тектонического разлома при проектировании объекта независимо от возраста его активизации.

Для решения прикладных задач, связанных с инженерными изысканиями под строительство, среди всех активных разрывных нарушений целесообразно выделять опасные [Несмеянов и др., 1992; Несмеянов, 2004]. Термин «опасный разлом» введен Ю.О. Кузьминым, В.С. Жуковым [2004] для определения

активного разлома, в зоне которого произошли какие-либо современные короткопериодические (первые месяцы и годы), пульсационные и/или знакопеременные деформации. По ряду причин (повторяемость сильных землетрясений с $M \geq 6$ один раз в сотни—тысячи лет; невозможность измерений деформаций на каждом разломе при их большом количестве на площади; существование трещиноватой разломной зоны без видимых современных смещений, но способной спровоцировать оползень или обвал при других неблагоприятных условиях и др.) предлагается расширить это понятие и под «опасным разломом» подразумевать тот активный разлом, где существует большая вероятность проявления тектонических, сейсмических и инженерно-геологических процессов, способных принести вред здоровью людей, а также материальный и экологический ущерб экономике страны.

Прежде чем выявлять опасные тектонические нарушения, необходимо проводить картирование всей сети плейстоцен-четвертичных разломов, что соответствует современным представлениям о блоковом строении геофизических сред [Садовский и др., 1987; Садовский, Писаренко, 1991]. Подобные работы были проведены ранее для территорий Тункинской и Баргузинской впадин и их горного обрамления, а также северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [Лунина, Гладков, 2004, 2007, 2008]. Следующим этапом исследований должно стать выделение на базе карты разломно-блокового строения активных разломов, представляющих реальную опасность при эксплуатации инженерно-технических сооружений даже в пределах слабосейсмичных территорий. Для этого на основе имеющихся представлений, собственного опыта и общеизвестных для тектонистов знаний о признаках активности разломов и методах их изучения, на примере указанных выше районов БРЗ был разработан комплексный подход к количественной оценке степени активности разрывных нарушений, основанный на составлении базы данных и экспертных баллах (оценках), обычно применяемых для оценки геодинамической или сейсмической опасности территорий [Шерман и др., 2003].

МЕТОДИКА И ОБОСНОВАНИЕ БАЛЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ

Методика оценки степени активности разломов, их отдельных сегментов или систем основана на базе данных, состоящей из двух главных разделов и заполняющейся в табличной форме в любой подходящей компьютерной программе (например, Microsoft Office Excel). Первый раздел включает общие сведения о разрывных нарушениях и их важнейших параметрах (табл. 1), второй — девять групп прямых и косвенных признаков, характеризующих активность разлома (табл. 2). Все группы признаков, за исключением метеорологической [Морозова, 2005], традиционно используются в практике исследований активной тектоники [Трифонов и др., 1993; Рогожин, Овсяченко, 2001; Лунина, Гладков, 2004, 2007, 2008; Семинский и др., 2005; Рогожин и др., 2005; Кузьмин, Жуков, 2004; Овсяченко, 2006], поэтому не требуют детального обоснования их важности для оценки степени активности разрывных нарушений.

За каждый признак, установленный в зоне разлома, статистически равной 10 % от его длины [Ружич, 1977; Шерман и др., 1985; Шерман, Савитский, 2005], в зависимости от значимости насчитываются баллы, выведенные эмпирическим путем при изучении эталонной площади, представляющей собой Баргузинскую впадину и ее горное обрамление (рис. 1). Данный объект являлся достаточно подходящим для подобной разработки, так как территория Прибаргузинья — сейсмически-активная часть БРЗ, но согласно сейсмологическому каталогу Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН [Интернет-сайт...], за инструментальный период там отсутствовали землетрясения с магнитудой более 5.5. Значимость признака и соответственно балл за него определялся индивидуально в сопоставлении с другими характеристиками разломов и изменялся от 1 до 7 (см. табл. 2). При этом балл за косвенный признак активности не мог быть выше 3. Далее обоснуем принятые нами баллы на основе существующих в природе связей и закономерностей.

1 балл присваивается за прямые и косвенные признаки, которые в принципе могут допускать только слабую активность разрывного нарушения в позднелицен-четвертичное время, заведомо не представляющего никакой опасности для жизнедеятельности человека, или даже быть ошибочными. К тако-

Таблица 1. Форма построения структуры первого раздела базы данных для формализованной оценки степени активности разлома

Общие сведения о разломе, его отдельном сегменте или разломной системе							
Номер разлома, соответствующий номеру на карте разломно-блокового строения земной коры участка исследований	Название, если имеется из литературных или других данных	Простирание	Азимут падения, °	Угол падения, °	Длина, км	Минимальная ширина зоны активного динамического влияния разлома (далее «зоны разлома», равна 10 % от длины [Ружич, 1977; Шерман и др., 1985; Шерман, Савитский, 2005])	Кинематический тип

Признак активности разлома, его отдельного сегмента или разломной системы								
косвенный			прямой					
геоморфологический	геофизический	инженерно-геологический	гидрологический	метеорологический	структурно-геологический	палеосейсмологический	сейсмологический	геолого-геодезический
а) проявление разлома на топографических картах, космоснимках или 3-мерных моделях рельефа (дистанционное диагностирование) — 1 балл б) проявление разлома на местности (наземное диагностирование) — 2 балла	а) повышенное содержание радона в воде и/или почве — 2 балла б) любая другая геофизическая аномалия — 1 балл (за каждую геофизическую аномалию в зоне разлома)	а) крупный оползень или обвал объемом не менее 15 500 м ³ , приуроченный к зоне разлома — 3 балла	а) наличие восходящих термальных источников — 2 балла б) неклиматические изменения уровня воды в скважинах или дебета источников — 2 балла в) вариации химического состава в источниках — 2 балла	а) периодические возникающие линейно-облачные аномалии над разломом — 2 балла	Указываются литология и возраст плиоцен-четвертичных деформированных пород в зоне разлома, баллы присваиваются за типы деформационных структур. а) трещины в средне-, мелко- и тонкозернистых отложениях и в отдельных обломках — 1 балл б) трещины, раскалывающие несколько галек и валунов в одном направлении, следы скопления и соударения на их поверхностях — 3 балла в) сейсмичность, зоны трещиноватости, расщепления или дробления, кластерные дайки сейсмогенного происхождения, смещения 5 и более см (все структуры в плиоцен-четвертичных отложениях) — 5 баллов	Указываются название палеосейсмодислокации, ее возраст, длина (км), максимальная амплитуда смещения (М), тип смещения по сейсмогенному разрыву, предполагаемая магнитуда и максимальная интенсивность по литературным данным а) палеосейсмодислокация длиной до 10 км — 3 балла б) палеосейсмодислокация длиной 11—50 км — 5 баллов в) палеосейсмодислокация длиной более 50 км — 7 баллов	Указываются максимальный класс (К), магнитуда (М), а также количество землетрясений с $M \geq 3.3$ ($K \geq 10$) в зоне разлома а) 1—3 землетрясения с $M \geq 3.3$ — 3 балла б) 4—5 землетрясений с $M \geq 3.3$ — 5 баллов в) более 5 землетрясений с $M \geq 3.3$ — 7 баллов г) землетрясения в зоне разлома с $M \leq 4.5$ — 3 балла д) землетрясения в зоне разлома с $M = 4.6$ —6.5 — 5 баллов е) землетрясения в зоне разлома с $M > 6.5$ — 7 баллов	а) скорость смещения по разлому до 1 мм/год — 1 балл б) скорость смещения по разлому 2—5 мм/год — 3 балла в) скорость смещения по разлому более 5 мм/год — 5 баллов

вым относятся: проявление разломов на топографических картах, космоснимках и 3-мерных моделях рельефа в виде линейаментов (геоморфологический признак); наличие трещин в средне-, мелко- и тонкозернистых отложениях и в отдельных обломках плиоцен-четвертичного возраста (структурно-геологический признак); наличие любой геофизической аномалии, кроме радоновой (геофизический); скорость смещения по разлому до 1 мм/год, устанавливаемая любыми возможными геологическими и инструментальными методами и подходами (геолого-геодезический). Так, позднемезозойско-раннекайнозойские разломы, не испытывающие в настоящее время активности, могут быть отражены на космоснимках (например, район Западного Забайкалья, который наиболее активно за последние 140 млн лет развивался в нижнем мелу). Геоэлектрическая аномалия может быть вызвана обводненностью или графитизацией пород в зоне разлома. Наличие отдельных трещин в молодых осадках и скорость смещения по разлому до 1 мм/год свидетельствуют об относительно низком уровне тектонических напряжений, реализующихся в зоне разлома.

2 балла дается за косвенные признаки, однозначно свидетельствующие об активности разрывного нарушения, причем в большинстве случаев в современное время, и предполагающие повышенный сейсмический потенциал разлома. Исключение по точному времени активизации составляют две характеристики, к которым относятся проявление разлома в рельефе на местности в виде расщелин, висячих долин, уступов, т.е. при наземном полевом диагностировании (геоморфологический признак) и наличие восходящих термальных источников (гидрологический). Остальные признаки — повышенное содержание радона в воде и/или почве (геофизический), неклиматические изменения уровня воды в скважинах или дебета источников, вариации химического состава в источниках (гидрологи-

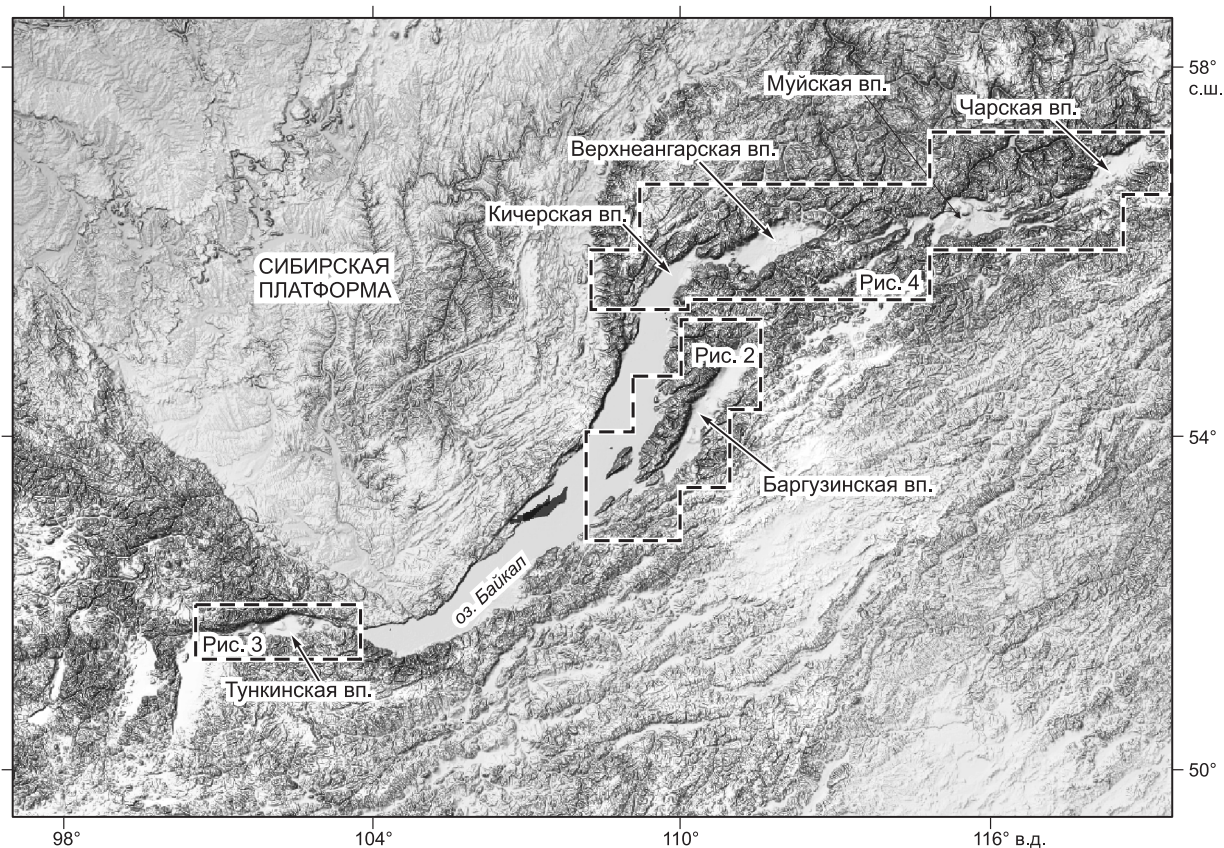


Рис. 1. Местоположение районов Байкальской рифтовой зоны (показаны штриховой линией), в пределах которых были закартированы плиоцен-четвертичные разломы [Лунина, Гладков, 2004, 2007, 2008] и рассчитана степень их активности.

ческий) и периодически возникающие линейно-облачные аномалии над разломом (метеорологический) — зачастую используются при сейсмическом мониторинге.

3 балла присваивается за прямые признаки, которые с учетом определения разного времени активизации по разлому (плиоцен-четвертичного или современного) и магнитуды возможного землетрясения сопоставимы между собой. К таковым относятся: трещины, раскалывающие несколько галек и валунов (обломков) в одном направлении, штрихи и борозды на их плоскостях, следы скольжения и соударения на их поверхностях, образующиеся при быстрых импульсных смещениях (структурно-геологический признак); наличие приуроченной к зоне разлома палеосейсмодислокации длиной (L) до 10 км, показывающей вероятность возникновения землетрясения с $M \leq 6.5$, согласно корреляционным зависимостям $M(L)$ [Лунина, 2002] (палеосейсмогеологический); наличие 1—3 землетрясений с $M \geq 3.3$ в зоне разлома; встречаемость землетрясения в зоне разлома с $M \leq 4.5$ (сейсмологический); скорость смещения по разлому 2—5 мм/год (геолого-геодезический), указывающая на вероятность возникновения землетрясения с $M \leq 6$ каждые 200 лет [Brady, 2002]. Таким образом, сейсмологические признаки точно указывают на современную активность дизъюнктива, остальные — на позднекайнозойскую с вероятной активностью в настоящее время. В связи с этим при балле 3 в одном случае предельно допустимая $M = 4.5$, в другом — $M = 6.0—6.5$. 3 балла считается также за косвенный инженерно-геологический признак, свидетельствующий о наличии крупных оползней и обвалов объемом не менее 15500 м³, приуроченных к зоне разлома. Это единственный из косвенных признаков, за который дается экспертная оценка 3, так как само по себе возникновение подобного явления на урбанизированных территориях может привести к ощутимому ущербу для людей.

5 баллов присваивается только за прямые признаки, они по сравнению с предыдущими указывают на вероятность возникновения более сильного землетрясения в зоне изучаемого разлома. К ним относятся: наличие в плиоцен-четвертичных отложениях сейсмитоидов (сейсмогенных конволюций), зон трещиноватости, расщепления или дробления, кластических даек сейсмогенного происхождения, смещений с амплитудой 5 и более сантиметров (структурно-геологический признак); наличие приуроченной к зоне

разлома палеосейсмодислокации протяженностью 11—50 км, указывающей на вероятность возникновения землетрясения с $M = 6.5—7.4$ согласно корреляционным зависимостям $M(L)$ [Лунина, 2002] (палеосейсмогеологический); наличие 4—5 землетрясений с $M \geq 3.3$ в зоне разлома; встречаемость землетрясения в зоне разлома с $M = 4.6—6.5$ (сейсмологический); скорость смещения по разлому более 5 мм/год (геолого-геодезический). Как и в предыдущем случае, признаки, за которые присваивается 5 баллов, сопоставимы между собой.

7 баллов присваивается за три прямых признака, указывающих на вероятность генерирования разломом катастрофического землетрясения. Это наличие приуроченной к зоне разлома палеосейсмодислокации протяженностью более 50 км, которая могла сформироваться при сейсмическом событии с $M > 7.4$, согласно корреляционным зависимостям $M(L)$ [Лунина, 2002] (палеосейсмогеологический признак); наличие более 5 землетрясений с $M \geq 3.3$ в зоне разлома; встречаемость землетрясения с $M > 6.5$ в зоне разлома (сейсмологический).

После заполнения базы данных степень активности для каждого разрывного нарушения рассчитывается простым суммированием и записывается как общий балл активности разлома по имеющимся данным. В конце каталога (в отдельной колонке для каждого разлома) обязательно приводится источник получения информации.

Наполнение базы данных основывается как на собственных материалах, так и на литературных источниках. Естественно, чем больше необходимой информации будет заложено в каталог, тем достовернее будет оценка степени активности разломов. Следует подчеркнуть, что степень изученности дизъюнктивов здесь не учитывается, поскольку, работая в региональном масштабе, ее просто учесть невозможно, однако у составителя базы данных всегда есть возможность пополнять ее новыми материалами и, соответственно, уточнять оценки. Напротив, при детальном изучении на локальных участках можно получить равноценные сведения по всем или избранным (с учетом геодинамических особенностей района исследований) характеристикам. Таким образом, предложенная методика выгодно отличается от подобных тем, что учитывает большее количество признаков и имеет более гибкую экспертную шкалу баллов.

АПРОБИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Помимо территории Прибаргузинья количественная оценка степени активности была проведена для разрывных нарушений, расположенных в пределах юго-западного и северо-восточного флангов Байкальской рифтовой зоны (см. рис. 1). Для этих районов также имеются карты разломно-блокового строения земной коры [Лунина, Гладков, 2004, 2008], которые и послужили основой для комплексного анализа. Следует отметить, что при апробировании описанной методики для указанных территорий не рассматривались инженерно-геологические и метеорологические признаки активности разломов и не в полном объеме (из-за недостатка опубликованных данных) геолого-геодезические, гидрологические и геофизические, так как все же главной целью было показать работоспособность подхода. Кроме того, его преимущество как раз в том и состоит, что для общей первоначальной оценки можно использовать легкодоступные опубликованные результаты, а для конкретных задач степень активности дизъюнктивов может уточняться путем привлечения большего количества данных из различных источников.

При заполнении баз данных об активности разломов для территорий, представленных в настоящей статье, использовались собственные геолого-структурные данные, частично опубликованные [Лунина, Гладков, 2004, 2007, 2008], каталог землетрясений Байкальского филиала ГС СО РАН [Интернет-сайт...]; данные об известных термальных источниках [Минеральные воды..., 1961, 1962; Пиннекер и др., 1968, 1984], палеосейсмогеологические материалы [Сейсмогеология..., 1981; Солоненко и др., 1985; Хромовских и др., 1993; McCalpin, Khromovskikh, 1995; Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов и др., 2000; Чипизубов, 2003], данные о геоэлектрических аномалиях, предоставленные сотрудниками лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН Н.Н. Неведровой и А.М. Санчаа, и частично опубликованные в работах [Санчаа и др., 2004; Эпов и др., 2007], а также некоторые другие сведения о скорости смещений по разломам [McCalpin, Khromovskikh, 1995] и геофизических аномалиях, связанных с ними [Сейсмогеология..., 1981].

На основании полученных экспертных оценок для разных районов Байкальской рифтовой зоны было выделено пять степеней активности разломов: слабая (1—5 баллов), средняя (6—10), повышенная (11—20), высокая (21—30), аномально высокая (более 31). Разные интервалы деления групп определяются исходя из следующих соображений. Как правило, 11 и более баллов набирается у разломов с прямыми признаками активности, указывающими на возможность сейсмогенного или довольно быстрого крипового смещения (более 5 мм/год) вдоль сместителя. В ином случае дизъюнктивы, характеризующиеся повышенной и высокой степенью активностью, должны обладать большим количеством косвенных признаков активности, которые в комплексе также нельзя игнорировать. Таким образом, именно разломы

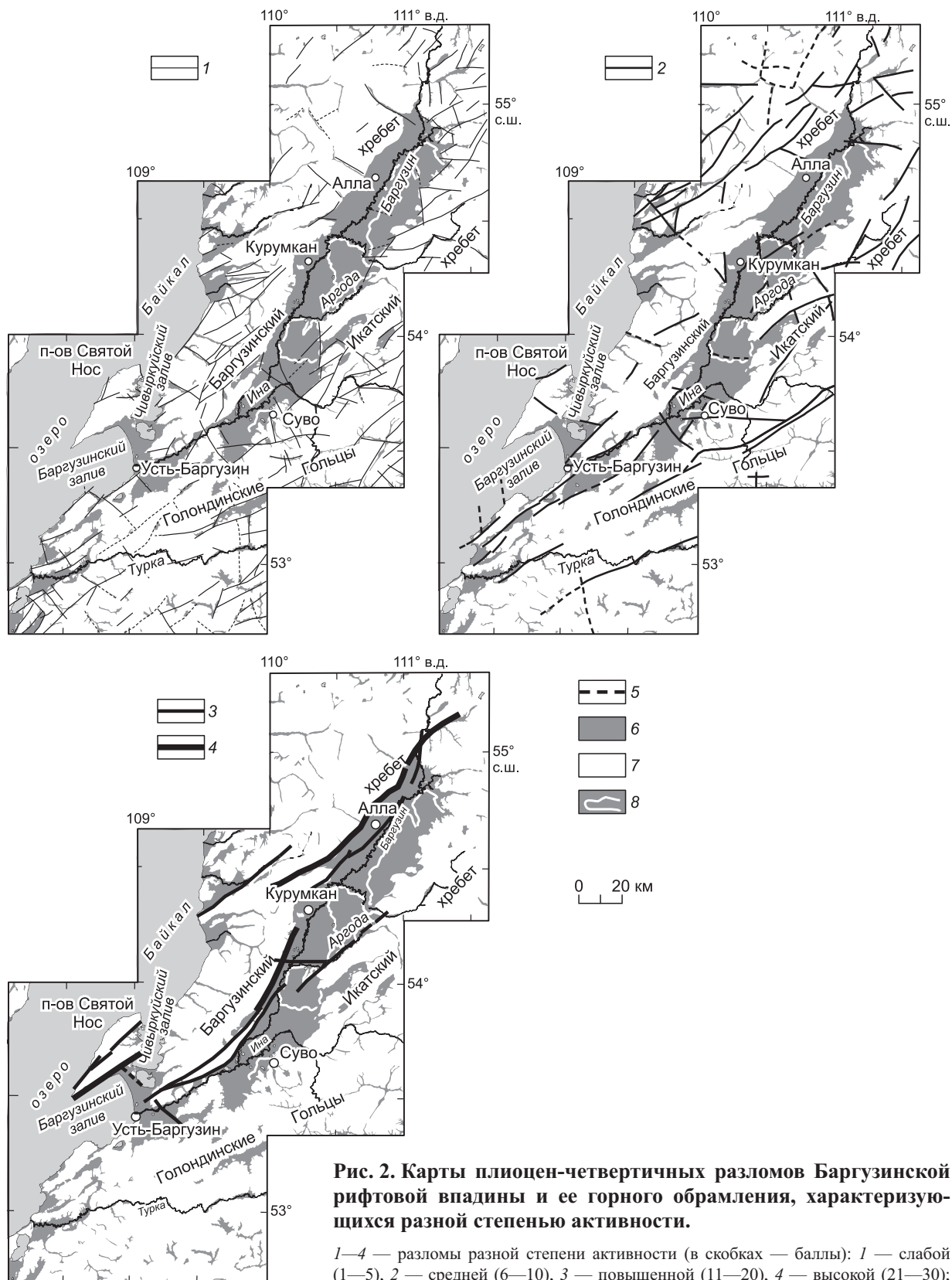
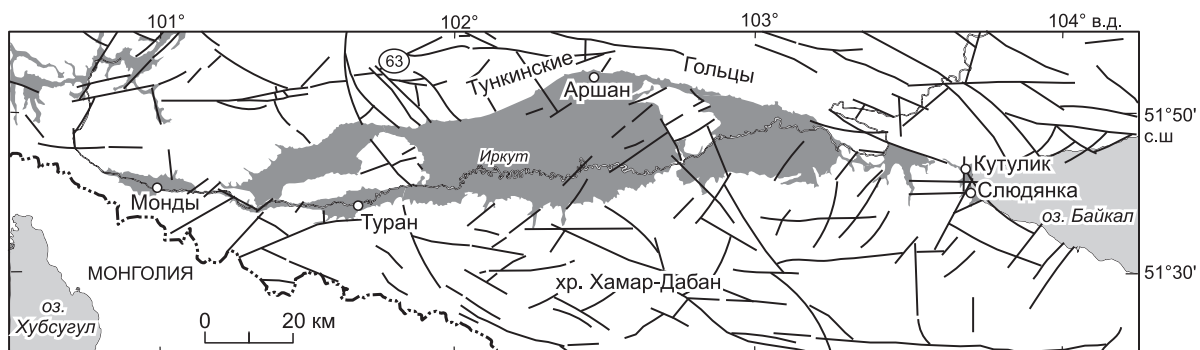


Рис. 2. Карты плиоцен-четвертичных разломов Баргузинской рифтовой впадины и ее горного обрамления, характеризующихся разной степенью активности.

1—4 — разломы разной степени активности (в скобках — баллы): 1 — слабой (1—5), 2 — средней (6—10), 3 — повышенной (11—20), 4 — высокой (21—30); 5 — предполагаемые разломы; 6 — впадины, заполненные кайнозойскими осадками, 7 — выходы кристаллического фундамента, 8 — границы куйтунов.



131) 1

Рис. 3. Карты плиоцен-четвертичных разломов Тункинской рифтовой впадины и ее горного обрамления, характеризующихся разной степенью активности.

1 — номера разломов, см. в тексте, табл. 4. Ост. усл. обозн. см. на рис. 2.

с активностью 11 и более баллов необходимо считать опасными или сейсмоопасными (если установлено, что с ними ассоциируются землетрясения или в зоне разлома зафиксированы сейсмогенные деформации). Разделение неопасных разломов на первый взгляд маловажно, но если проектируемый объект попадает в зону влияния разлома со средней степенью активности, то следует обратить внимание, не приближается ли его количественная оценка к группе с повышенной степенью активности, и далее в зависимости от значения будущего инженерно-технического сооружения и признаков, характеризующих разлом, обосновывать его учет при строительстве. В остальном же роль неопасных разломов, но в той или иной степени активных в позднем кайнозое (а значит незалеченных), состоит в том, что в зависимости от их расположения по отношению к очагу землетрясения, они (как и другие активные разрывные нарушения) будут служить либо экраном, либо проводником для распространения сейсмических волн при землетрясении, таким образом, усиливая или уменьшая их воздействие на геологическую среду и, следовательно, на имеющиеся сооружения. Возможно, что движения по таким разрывам могут генерировать слабые землетрясения, но они не будут представлять угрозы для населения.

Результаты расчетов для Баргузинской и Тункинской впадин и их горного обрамления, а также для северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны графически представлены на рис. 2—4. Для всех

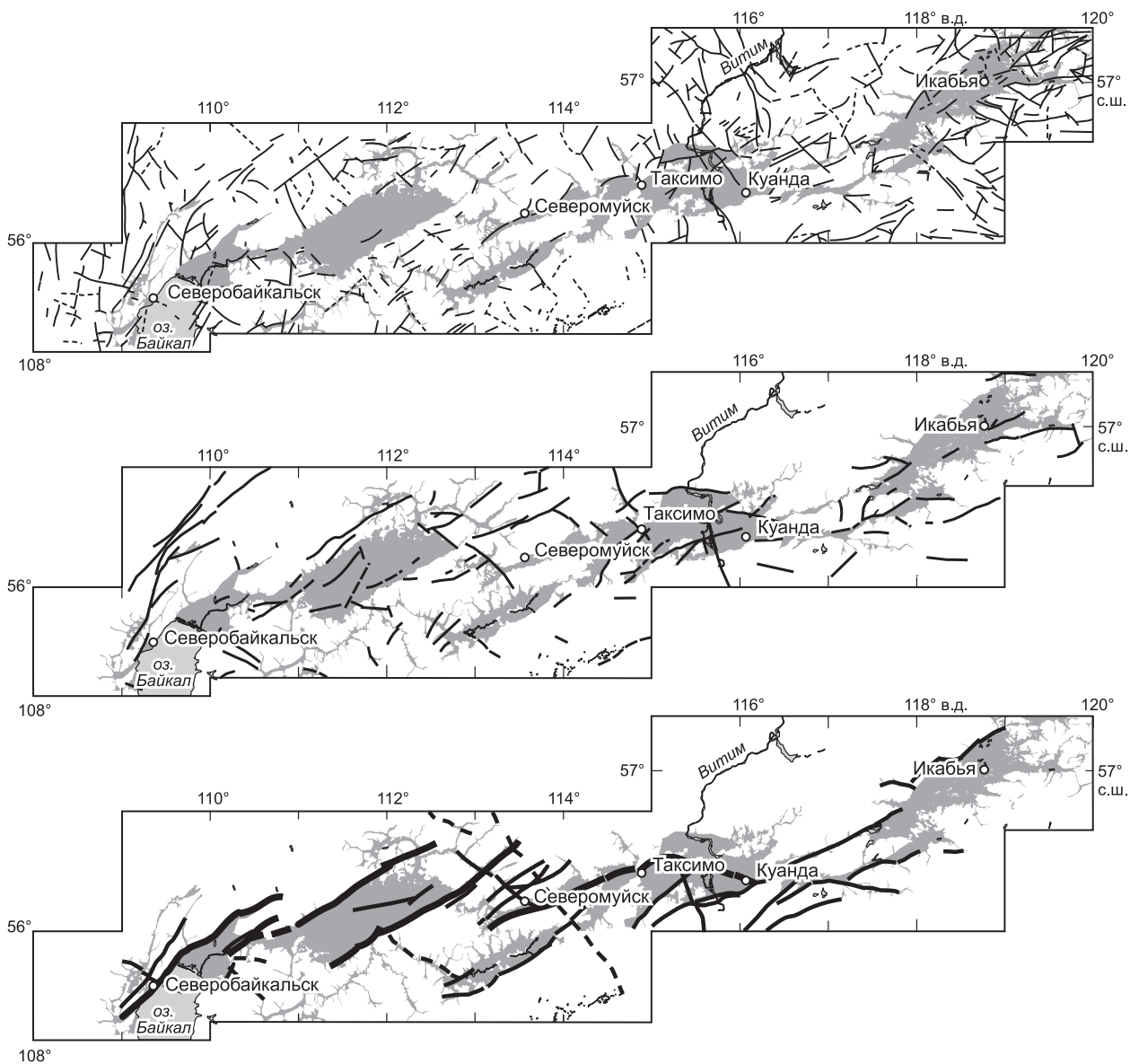


Рис. 4. Карты плиоцен-четвертичных разломов северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны, характеризующихся разной степенью активности.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

трех изученных площадей минимальное значение степени активности разлома равно 1 (табл. 3). К таким разрывным нарушениям относятся те, активность которых определяется только геоморфологическим признаком и выявляется дистанционным диагностированием. Примечательно, что среднее значение степени активности разломов для исследованных районов примерно одинаково и равно 3. Максимальные значения относятся к группе высокой активности дизъюнктивов и наибольшие на флангах Байкальской рифтовой зоны (27—28).

Распределение разломов по степени активности (в процентах) для изученных территорий находится в примерно одинаковом соотношении (см. табл. 1). Только 1 % от всех закартированных дизъюнктивов характеризуется высокой степенью активности и от 3 до 7 % — повышенной. Таким образом, всего 4—8 % разломов могут представлять реальную сейсмическую опасность. При привлечении большего количества данных для характеристики активности разломов в пределах изученных площадей этот процент может повыситься, но незначительно, так как все известные на сегодняшний день сейсмологические, палеосейсмогеологические и структурно-геологические признаки, вносящие основной вклад в расчет степени активности разрывных нарушений, учтены.

Таблица 3. Результаты расчетов степени активности разломов для некоторых районов Байкальской рифтовой зоны

Полученные данные об активности разломов для разных районов БРЗ	Активные разломы		
	Баргузинской рифтовой впадины и ее горного обрамления	северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны	Тункинской рифтовой впадины и ее горного обрамления
Общее количество разломов	279	557	228
Минимальное значение степени активности разлома	1	1	1
Среднее значение степени активности разлома	3.35	3.09	2.89
Максимальное значение степени активности разлома	23	27	28
Слабая активность (1—5 баллов), %	72	76	79
Средняя активность (6—10 баллов), %	24	18	13
Повышенная активность (11—20 баллов), %	3	5	7
Высокая активность (21—30 баллов), %	1	1	1
Аномально высокая активность (31 и более баллов), %	0	0	0

При анализе пространственного распределения разломов разной степени активности выявляется, что подавляющее большинство дизъюнктивов, характеризующихся повышенной и высокой степенью активности, ограничивает борта рифтовых впадин или находится внутри них (см. рис. 2—4). Как правило, к ним относятся протяженные разломы или их сегменты, составляющие целые системы (например, Баргузинская, Тункинская, Южно-Тункинская и др. разломные системы). Разрывные нарушения со слабой степенью активности расположены преимущественно в горном обрамлении.

Сопоставление длин разломов и степени их активности показывает, что при общей тенденции (чем больше протяженность дизъюнктива, тем больше активность) вероятность того, что разлом длиной 10—30 км может быть опасным, существует и, наоборот, разлом длиной более 60 и даже свыше 100 км может обладать слабой степенью активности (рис. 5).

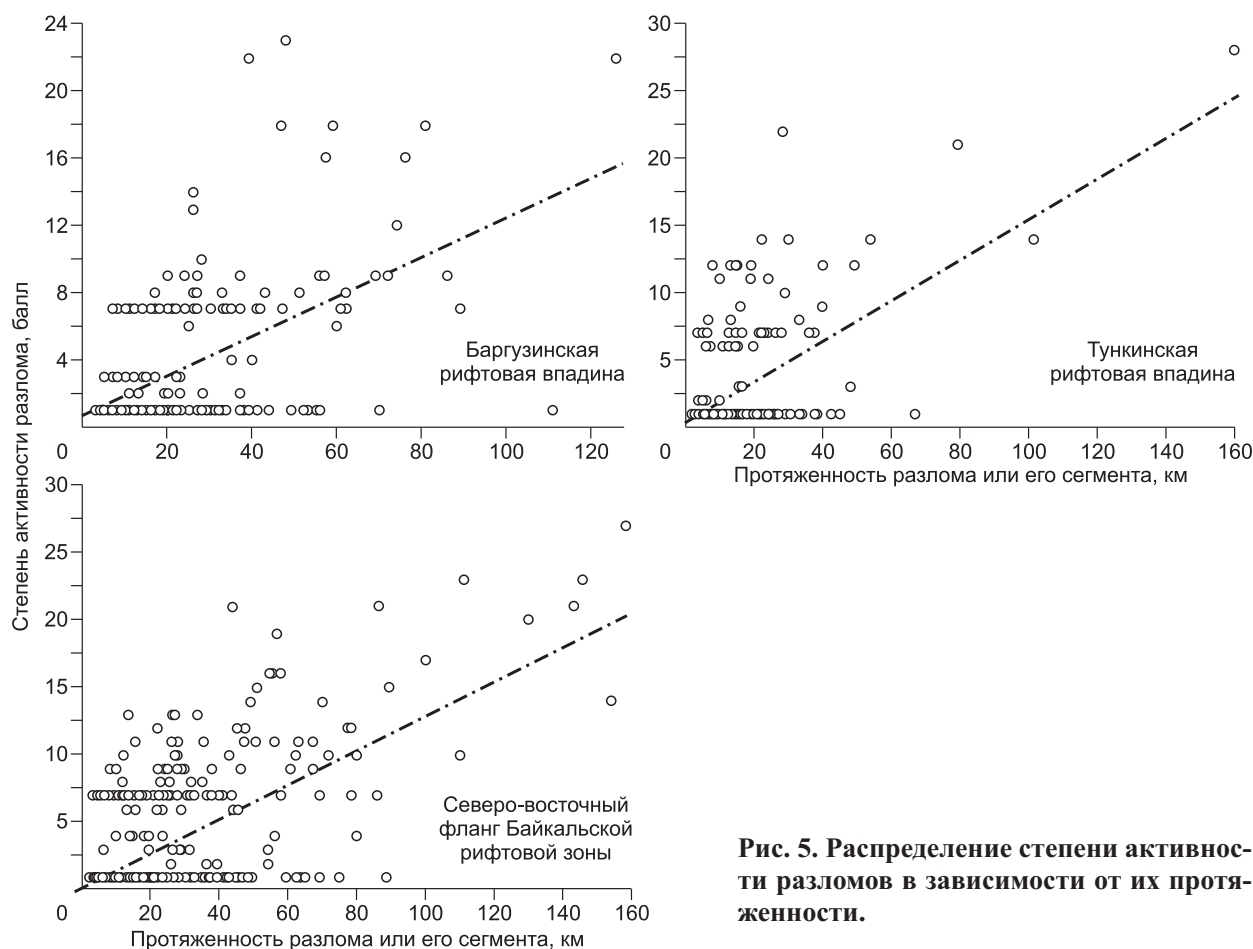


Рис. 5. Распределение степени активности разломов в зависимости от их протяженности.

Таблица 4. Признак активности для некоторых разломов Тункинской рифтовой впадины и ее горного обрамления

Геоморфологический	Геофизический	Гидрологический	Структурно-геологический	Палеосейсмогеологический	Сейсмологический	Геолого-геодезический
а) линеймент на то- поосновах — 1 балл б) уступ на местно- сти — 2 балла	—	а) восходящий источник Тунка-2 с температурой 37° — 2 балла	Тункинский разлом, 41, L = 160 км, W = 16 км, общая оценка активности — 28 в) зоны трещиноватости, много- численные смещения более 5 см в разнообразных отложениях (конт- ломератах, галечниках, суглинках, песках) плиоценового, плейсто- ценового и голоценового возраста — 5 баллов	в) палеосейсмодислокации: Ар- шанская-I, Торская-I, Торская-II, Аршанская-II, Аршанская- III + Торская-III, Аршанская- IV + Торская-IV протяженнос- тью от 10 до 70 км [Чипизубов, 2003] — 7 баллов	в) 27 землетрясений в зоне разлома с $M \geq 3.3$ — 7 баллов г) $K = 12$, $M = 4.4$ — 3 балла	а) скорость смеще- ния по разлому, по разным данным, от 0.07 до 0.44 мм/год [McCalpin, Khro- movskikh, 1995] — 1 балл
»	—	б) трещины, раскальвающие не- сколько галек в одном направлении в конгломератах позднего плиоце- на — 3 балла	в) палеосейсмодислокации про- тяженностью от 40 до 60 (95) км [Чипизубов, Смекалин, 1999] — 7 баллов	б) 4 землетрясения в зоне раз- лома с $M \geq 3.3$ — 5 баллов г) $K = 11.4$, $M = 4.1$ — 3 балла	—	—
а) линеймент на то- поосновах — 1 балл	а) повы- шенное содержа- ние радо- на в воде — 2 балла	а) восходящий источник Нилова Пустынь с тем- пературой 41° — 2 балла	Хойтогольский разлом, 42, L = 28 км, W = 2.8 км, общая оценка активности — 22 в) зоны трещиноватости, смещения более 5 см, сейсмичты в супесях, песках, галечниках голоценового возраста — 5 баллов.	—	в) 10 землетрясений в зоне разлома с $M \geq 3.3$ — 7 баллов д) $K = 12.5$, $M = 4.7$ — 5 бал- лов	—
»	—	—	Первый сегмент Южно-Тункинского разлома, 47, L = 49 км, W = 4.9 км, общая оценка активности — 12 в) трещины, смещения углистых прожилков, зеркала скольжения (в базальтах) в породах (галечниках, базальтах, суглинках, песках и др.) плейстоцена и голоцена — 5 бал- лов	—	а) 2 землетрясения в зоне раз- лома с $M \geq 3.3$ — 3 балла г) $K = 10$, $M = 3.3$ — 3 балла	—
а) линеймент на то- поосновах — 1 балл	—	—	Второй сегмент Южно-Тункинского разлома, 131, L = 22 км, W = 2.2 км, общая оценка активности — 14 в) зоны трещиноватости в песках, суглинках, базальтах позднего плейстоцена и голоцена — 5 бал- лов	—	а) 1 землетрясения в зоне раз- лома с $M \geq 3.3$ — 3 балла д) $K = 14$, $M = 5.6$ — 5 баллов	—

Геоморфологический	Геофизический	Гидрологический	Структурно-геологический	Палеосейсмогеологический	Сейсмологический	Геолого-геодезический
Третий сегмент Южно-Тункинского разлома, переходящий в Обручевский сброс в Байкале, $W = 10.2$ км, общая оценка активности — 14						
а) линеймент на топоосновах — 1 балл	—	—	в) зоны трещиноватости в конгломератах позднего плиоцена, в супесях, песчано-гравийных, валунно-песчано-галечных отложениях плейстоцена и голоцена — 5 баллов	—	б) 4 землетрясения в зоне разлома с $M \geq 3.3$ — 5 баллов г) $K = 11.2$, $M = 4$ — 3 балла	—
»	—	—	Разлом 159, $L = 33$ км, $W = 3.3$ км, общая оценка активности — 8 а) трещины в песках и гравийных осадках позднего кайнозоя — 1 балл	—	а) 2 землетрясения в зоне разлома с $M \geq 3.3$ — 3 балла г) $K = 11.4$, $M = 4.1$ — 3 балла	—
»	—	а) восходящие источники Шумакские с температурой 39° — 2 балла	Разлом 63, $L = 16$ км, $W = 1.6$ км, общая оценка активности — 3	—	—	—

Примечание. В таблице в качестве примера приводится минимальная информация для каждого разлома, достаточная для демонстрации признаков, по которым проводилась оценка; сведения по геоморфологическим и структурно-геологическим признакам приведены по данным автора, по гидрогеологическим — из работы [Шиннекер и др., 1968]. L — длина на карте, W — ширина зоны динамического влияния.

Закономерным является тот факт, что простираение большинства разрывных нарушений с повышенной и высокой активностью (в Баргузинской — северо-северо-восточное и северо-восточное, в Тункинской — субширотное, во впадинах северо-восточного фланга — северо-восточное и восток-северо-восточное) согласуется с генеральным направлением рифтовых впадин в разных частях Байкальской рифтовой зоны (см. рис. 2—4). При этом некоторые разломы иной ориентировки также могут представлять опасность. Как правило, они образуют узлы пересечения с основными активными структурами.

Полученные с помощью нового подхода результаты оценок степени активности разломов для некоторых частей Байкальской рифтовой зоны не противоречат имеющимся знаниям о сейсмоактивных структурах, а только уточняют их. Например, чтобы продемонстрировать, по каким признакам была оценена активность некоторых опасных разломов и сопоставить наши результаты с чисто палеосейсмогеологическими и сейсмологическими методами, обратимся к наиболее изученной Тункинской впадине и сопредельной к ней территории (см. рис. 3). В ее пределах по методике, представленной в настоящей работе, к опасным разломам, характеризующимся повышенной и высокой степенью активности, относится более десятка. Среди них, согласно палеосейсмогеологическим исследованиям, сейсмогенерирующими являются только Тункинский и Главный Саянский разломы [Хромовских и др., 1993; Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов, 2003], относимые нами к структурам высокой степени активности. Основанием для этого служат данные, приведенные в табл. 4. К дизъюнктивам высокой степени активности относится и Хойтогорский разлом (см. табл. 4), ранее не выделяемый как потенциально опасный дизъюнктив. Для сравнения (см. табл. 4) приводятся данные для двух разломов со слабой и средней степенью активности, а также для хорошо известного региональным геологам Южно-Тункинского разлома, состоящего из трех основных сегментов (см. рис. 3). Согласно примененной методике, этот дизъюнктив характеризуется повышенной степенью активности и

может представлять потенциальную опасность, что подтверждается результатами расчетов количественного индекса сейсмичности [Шерман, Савитский, 2004], свидетельствующими о наиболее высокой современной активности Тункинского, Главного Саянского и Южно-Тункинского разломов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработан формализованный подход к оценке активности разломов, основанный на экспертных баллах, последние присваиваются за различные характеризующие их признаки. Учет разнородных данных (геоморфологических, структурно-геологических, палеосейсмологических, сейсмологических, геофизических, геодезических, инженерно-геологических, гидрологических, метеорологических) дает возможность применять его не только в сейсмоактивных областях, но и в пределах относительно слабоактивных платформенных территорий. Для расчета активности разрывных нарушений можно использовать только те признаки, данные по которым легко доступны или известны на момент проведения исследования. При необходимости, если это оправдано целью исследования, можно провести дополнительные изыскания. Предложенную методику можно применять для карт и схем дизъюнктивной тектоники любых масштабов. При этом в зависимости от масштаба исследований можно выбирать те признаки, которые будут адекватно описывать активность разрывного нарушения. Кроме того, сами по себе базы данных, на которых основываются расчеты, являются уникальным систематизированным материалом, разносторонне характеризующим разломы какой-либо территории.

Предложенный подход вместе с ранее разработанными и используемыми методами [Ружич, 1997; Уломов, Шумилина, 1999; Рогожин и др., 2005], на разных этапах работ может успешно применяться: при выделении зон возникновения очагов землетрясений и сейсмическом районировании; для выявления опасных разломов, развитие которых под воздействием природных и антропогенных факторов во время эксплуатации инженерных сооружений (трубопроводов, электростанций, крупных мостов и тоннелей) может привести к существенному экологическому и экономическому ущербу; для обоснования выбора участков, перспективных для проведения геофизического мониторинга сейсмичности в целях средне- и краткосрочного прогноза землетрясений.

Автор искренне благодарна сотруднику лаборатории гидрогеологии ИЗК СО РАН А.И. Оргильянову за помощь в систематизации данных по термальным источникам, а также сотрудникам лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН Н.Н. Неведровой и А.М. Санчаа за предоставление результатов интерпретации геоэлектрических аномалий по Баргузинской и Тункинской впадинам.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проект ОНЗ-7.7), Совета по грантам Президента РФ (грант МК-59.2009.5) и РФФИ (грант 09-05-92421-КЭ-EINSTEIN Consortium).

ЛИТЕРАТУРА

Голенецкий С.И., Кочетков В.М., Солоненко А.В., Мишарина Л.А., Боровик Н.С., Солоненко Н.В., Гилева Н.А., Козьмин Б.М., Аниканова Г.В., Мельникова В.И., Штейман Е.А., Ларионов А.Г. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность. Новосибирск, Наука, 1985, 192 с.

Интернет-сайт Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН. <http://seismo.crust.irk.ru>.

Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М., Изд-во Моск. горного ун-та, 2004, 262 с.

Лукина Н.В. Активные разломы и сейсмичность Алтая // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (11), с. 71—74.

Лунина О.В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношение параметров и внутреннюю структуру сейсмоактивных разломов: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2002, 16 с.

Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура Тункинского рифта — отражение процесса косого растяжения // Докл. РАН, 2004, т. 398, № 4, с. 516—518.

Лунина О.В., Гладков А.С. Разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта в позднем кайнозое (Байкальский регион) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 775—790.

Лунина О.В., Гладков А.С. Активные разломы и напряженное состояние земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (2), с. 146—160.

Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народно-хозяйственное значение / Под ред. В.Г. Ткачук, Н.И. Толстихина. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1961, 342 с.

Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 2. Минеральные источники, скважины, вскрывающие минеральные воды, и минеральные озера (каталоги) / Под ред. Н.А. Власова, В.Г. Ткачук, Н.И. Толстихина. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1962, 197 с.

Морозова Л.И. К вопросу об активности разломов, выявляемой в поле облачности на спутниковых снимках Земли // Исследование Земли из космоса, 2005, № 2, с. 1—4.

Несмеянов С.А. Введение в инженерную геотектонику. М, Научный мир, 2004, 216 с.

Несмеянов С.А., Ларина Т.А., Латынина Л.А., Миндель И.Г., Серебрякова Л.И., Соколов В.С., Хайме Н.М. Выявление и прогноз опасных разрывных тектонических смещений при инженерных изысканиях для строительства // Инженерная геология, 1992, № 2, с. 17—32.

Никонов А.А. Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геозкология, 1995, № 4, с. 16—27.

Овсученко Н.И. Изучение современной активности тектонических нарушений в сейсмоопасных районах // Геопрофи, 2006, № 1, с. 51—55.

Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Калдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. М., Наука, 1968, 170 с.

Пиннекер Е.В., Шабынин Л.Л., Ясько В.Г. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология. Новосибирск, Наука, 1984, 168 с.

Рогожин Е. А., Овсученко Н.И. Соотношение геологической и сейсмической составляющих современных тектонических движений на Северном Кавказе // Тектоника неогена: общие и региональные аспекты. Т. 2 (Материалы XXXIV тектонического совещания). М., ГЕОС, 2001, с. 145—148.

Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Мараханов А.В., Овсученко А.Н. Методы детальной количественной оценки сейсмической опасности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2005, № 5, с. 37—41.

Ружич В.В. Зависимость между параметрами разрывных нарушений и их практическое применение // Механизмы формирования тектонических структур Восточной Сибири. Новосибирск, Наука, 1977, с. 41—48.

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

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М., Наука, 1991, 96 с.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987, 104 с.

Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Яковлев А.В. Особенности геоэлектрического строения Баргузинской и Тункинской впадин Байкальской рифтовой зоны // Сборник докладов Международной научной конференции «Сейсмические исследования земной коры». Новосибирск, ИГФ СО РАН, 2004, с. 465—470.

Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1981, 168 с.

Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005, 293 с.

Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромовских В.С., Чипизубов А.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. Новосибирск, Наука, 1985, 192 с.

Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В. Изучение и картирование активных разломов // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, 1993, вып. 1, с. 196—205.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Сейсмогеодинамика и вероятностное сейсмическое районирование Северной Евразии // Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М., Изд-во ОИФЗ РАН, 1999, с. 216—252.

Хромовских В.С., Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Курушин Р.А., Дельянский Е.А. Новые данные о палеосейсмодислокациях Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, 1993, вып. 1, с. 256—264.

Чипизубов А.В. Классификация активных разломов по степени активности, возрасту активизации и достоверности // Тезисы докладов XXV Всесоюзного тектонического совещания «Тектоника океанов и палеоокеанов». М., Наука, 1991, с. 25—27.

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

Чипизубов А.В., Семенов Р.М., Аржанников С.Г., Смекалин О.П. Новые данные о палеосейсмодислокациях в зоне Баргузинского разлома // Докл. РАН, 2000, т. 372, № 3, с. 393—396.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения в зоне Тункинского разлома (Юго-Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (6), с. 587—602.

Шерман С.И., Савитский В.А. Индексы сейсмичности разломов деструктивных зон литосферы и проблема прогноза землетрясений // Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах (Материалы IV Международного совещания). Петропавловск-Камчатский, ИВ и С ДВО РАН, 2004, с. 217—222.

Шерман С.И., Савитский В.А. Активные разломы литосферы и их потенциальная природная опасность: опыт ранжирования по количественному индексу сейсмичности // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 3 (Материалы совещания «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии: фундаментальный и прикладные аспекты»). Иркутск, ИЗК СО РАН, 2005, с. 16—27.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Рекомендации по оценке ширины зон приразломных структурных изменений (по результатам физического моделирования). Иркутск, ИЗК СО РАН, 1985, 42 с.

Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Аптикаев Ф.Ф. Региональные шкалы сейсмической интенсивности. Опыт создания шкалы для Прибайкалья. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 189 с.

Эпов М.И., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Геоэлектрическая модель Баргузинской впадины Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 811—829.

Brady R.J. Very high slip rates on continental extensional faults; new evidence from (U-Th)/He thermochronometry of the Buckskin Mountains, Arizona // Earth Planet. Sci. Lett., 2002, v. 197, p. 95—104.

International stratigraphic chart // International commission on stratigraphy, 2005, <http://www.stratigraphy.org/chus.pdf>.

McCalpin J.P., Khromovskikh V.S. Holocene paleoseismicity of the Tunka fault, Baikal rift, Russia // Tectonics, 1995, v. 14, № 3, p. 594—605.

Vita-Finzi C. Recent Earth movements. London, Toronto, Acad. Press, 1986, 226 с.

*Рекомендована к печати 26 июня 2009 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
11 января 2009 г.*