

На правах рукописи



ЛУНИНА Оксана Викторовна

**РАЗРЫВНАЯ ТЕКТОНИКА ПРИБАЙКАЛЯ
НА ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

25.00.03 – геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

- Научный консультант:** доктор геолого-минералогических наук, профессор Шерман Семен Иойнович
- Официальные оппоненты:**
- Гончаров Михаил Адрианович, доктор геолого-минералогических наук, геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, заведующий лабораторией
- Рогожин Евгений Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, заместитель директора по науке, заведующий лабораторией
- Ружич Валерий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, главный научный сотрудник
- Ведущая организация:** ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Защита состоится 31 января 2013 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу: 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



О.В. Пилипенко

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования в диссертации является разрывная тектоника, которая представляет собой совокупность разрывных нарушений, определяющих структуру земной коры и условия ее развития. Разрыв является обобщающим термином по отношению к разломам и трещинам, которые рассматриваются как результат разрушения различных по масштабу объемов верхней части литосферы.

Актуальность исследований. Согласно современным представлениям, геолого-геофизическая среда верхней оболочки Земли является открытой неоднородной динамической системой, которая характеризуется блочно-иерархическим строением и обладает различными структурными свойствами [Садовский, 1979; Садовский, Писаренко, 1991]. Без учета этих свойств, а именно особенностей строения разрывной сети, трудно решать проблемы, касающиеся деструкции твердой Земли и сопутствующего ей сейсмического процесса, а также выявлять факторы нестабильности природных геосистем и объектов. Более детальные и достоверные знания о разломах и напряженном состоянии земной коры способствуют развитию геодинамических концепций механизмов формирования и эволюции различных структурных элементов подвижных поясов, а в прикладном аспекте – усовершенствованию методологических приемов для оценки опасностей, связанных с наличием тектонических нарушений в земной коре.

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в изучении разрывной тектоники Прибайкалья, что послужило фундаментом для проведения настоящего исследования. Для данной территории охарактеризована внутренняя структура и параметры крупнейших разломных зон [Булнаев и др., 1975; Шерман, 1977; Ружич, 1977; 1980; Шерман и др., 1973; 1980; 1984; 1992; Булгаков и др., 1978; Сейсмогеология., 1981; Лобацкая, 1987; San'kov et al., 2000; Семинский, 2003; Семинский и др., 2005; Лунина, 2002; Лунина, Гладков, 2002а; Лунина и др., 2002], составлены различные карты дизъюнктивной тектоники [Ружич, 1972; Замараев и др., 1979; Карта разломов., 1982; Лукина, 1989; Леви и др., 1995; 1996; 2002; Levi et al., 1997; Лунина, Гладков, 2004а; 2004б; 2007; 2008а; 2009а] и схемы напряженного состояния земной коры [Шерман, Днепровский, 1989; Sherman, 1992; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; Шерман, Лунина, 2001; Парфеев и др., 2002; Лунина, Гладков, 2004а; Парфеев, Саньков, 2006; Мельникова, 2008; Лунина и др., 2009б], получены общие и частные закономерности в распределении разломов и сейсмичности [Саньков и др., 1991; Ружич, 1997; Шерман, Гладков, 1998; Sherman, Gladkov, 1999; Рундквист и др., 1999; Лунина, Гладков, 2004а; Лунина и др., 2009б; Злогодухова, 2008; Sherman et al., 2004; Шерман, 2009]. Тем не менее, остаются нерешенными проблемы, связанные с изучением тектонических деформаций и картированием разломов в рыхлых (валунно-галечных, песчаных, супесчаных, суглинистых и т.п.) отложениях мезозойско-кайнозойских впадин, которые занимают значительную часть Прибайкалья. Тектонофизические исследования в этом направлении представляются чрезвычайно перспективными. По-прежнему

дискуссионными являются вопросы, касающиеся особенностей напряженного состояния земной коры региона. Наконец, накопленные за многие годы сведения о позднекайнозойских разломах должны быть критически пересмотрены и обобщены на современном уровне с использованием геоинформационных систем и программирования в реляционной базе данных (РБД), которая открывает большие возможности для использования знаний о разрывных нарушениях в геологических науках.

Основная площадь исследований охватывает территорию Прибайкалья в рамках координат 100° – 114° в.д. и 50° – 57° с.ш. В ее пределах расположены Сибирская платформа, Байкальская (БРЗ) кайнозойская и Западно-Забайкальская (ЗЗРЗ) позднемезозойская рифтовые зоны.

Цель работы – методами тектонофизики и структурной геологии изучить разломы и сопутствующие им тектонические деформации в разновозрастных породах Прибайкалья и на базе новых знаний создать концепцию и схему реляционной базы данных для прогноза опасных природных процессов, связанных с деструкцией земной коры.

Задачи исследования

1. Изучить тектонические деформации во впадинах и горных поднятиях Прибайкалья и разработать требования к картированию разломов на территориях, перекрытых чехлом рыхлых и слабосцементированных осадочных отложений.

2. Составить электронную карту активных разломов Прибайкалья на основе 1:200 000 масштаба.

3. Реконструировать поля тектонических напряжений по данным трещиноватости, провести их сопоставление с механизмами очагов землетрясений и установить специфику напряженного состояния земной коры в зонах разнонаправленных разломов Прибайкалья.

4. Разработать методику и провести экспертную оценку степени активности разломов Прибайкалья и их сегментов.

5. Сформировать концепцию и схему РБД, ориентированной на прогноз опасных природных процессов, связанных с деструкцией земной коры.

6. Создать первый модуль РБД и на основе синтезированных в нем данных провести комплексный анализ геолого-геофизической информации по активным разломам Прибайкалья.

Фактический материал и методы исследований. Основу диссертации составляет материал, собранный автором при проведении экспедиционных исследований в Прибайкалье в 1995–2010 гг. Кроме того, в работу привлечены полевые данные по Горному Алтаю, рифтам Мертвого моря и Оуэнс-Валли (Запад США), Центральной Греции и Западной Турции. При участии коллег изучено более 980 точек геолого-структурных наблюдений, в т.ч. с массовыми замерами трещиноватости, получены радиоуглеродные датировки для 30 образцов. Также использованы: результаты геоэлектрических исследований впадин Прибайкалья, предоставленные сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН; топографические карты масштаба 1:200 000; цифровые модели рельефа SRTM-90; электронная батиметрическая карта озера Бай-

кал; литературные и картографические материалы по разломной тектонике, глубинному строению и гидрогеологии; региональный каталог землетрясений БФ ГС СО РАН и опубликованные в открытой печати данные о механизмах очагов землетрясений.

Для решения задач применен комплекс методов, включающий: картирование разломно-блокового строения земной коры на основе анализа полевых наблюдений в разновозрастных горных породах и результатов дешифрирования тектонических линеаментов на топографических и батиметрической основах; методы изучения напряженного состояния земной коры и кинематики разрывов путем анализа трещиноватости и прямых наблюдений; авторский подход к оценке степени активности разломов; геоинформационные технологии и программирование для создания РБД. Радиоуглеродные определения выполнены Л.А. Орловой в ИГМ СО РАН.

Теоретические положения, выдвигаемые для защиты

1. Движения по разломам Прибайкалья фиксируются в рыхлых отложениях плейстоцена–голоцена по набору закономерно ориентированных тектонических деформаций, которые позволяют проводить геолого-структурное картирование разрывных нарушений на слабо обнаженных территориях.

2. С позднего плиоцена развитие разрывных систем в регионе происходило в условиях преобладающего СЗ–ЮВ растяжения при значительной роли сдвиговых полей напряжений, которые распространены не только на флангах Байкальской рифтовой зоны, но и в других районах Прибайкалья.

3. В Прибайкалье около 10 % сегментов разломов, согласно экспертной оценке, характеризуются повышенной, высокой и аномально высокой степенью активности, проявленной в позднем плиоцене–голоцене. Большинство из них локализуется вдоль южной окраины Сибирской платформы и в кайнозойских впадинах Байкальской рифтовой зоны.

4. Разработаны концепция и схема реляционной базы данных, которые могут быть основой создания в России нового поколения высокоинформативных карт активной тектоники. С использованием реализованного модуля базы данных показано, что в Прибайкалье сбросы северо-восточного простирания и субширотные структуры с левосторонней компонентой горизонтального смещения являются главными источниками землетрясений с магнитудой 5,5 и выше.

Научная новизна

- Впервые с единых методических позиций на территории Прибайкалья проведено массовое изучение тектонических деформаций в разновозрастных скальных, слабосцементированных и рыхлых горных породах. Предложена классификация проявления деформационных структур в кайнозойских отложениях, и сформулированы основные требования к полевому изучению и картированию разломов в чехле молодых осадков. С учетом этих требований на новом уровне детально охарактеризована разломно-блоковая структура и напряженное состояние земной коры различных районов Прибайкалья.

- С использованием информационных технологий на базе новых и ранее полученных знаний для территории, ограниченной координатами 100°–114° в.д.

и 50°–57° с.ш., создана электронная карта активных в плиоцен-четвертичное время разломов и соответствующая ей база данных с клиентским приложением, которое выгодно отличает ее от других мировых аналогов.

- Разработан новый метод экспертной оценки степени активности разломов, применение которого позволило классифицировать разломы Прибайкалья по степени активности на пять групп (слабую, среднюю, повышенную, высокую и аномально высокую) и выделить среди них наиболее опасные в геодинамическом отношении.

- Сформирована концепция и схема РБД по разрывной тектонике, ориентированной на создание сейсмотектонических проектов и прогноз опасных природных процессов, связанных с деструкцией земной коры. Для активных разломов в среде MapInfo реализован модуль, представляющий собой клиентское приложение информационной системы “ActiveTectonics” для ввода данных, их вывода на HTML страницах и расчета зависимых параметров.

- Впервые для понимания особенностей строения и активизации разрывной тектоники Прибайкалья, выявленных при комплексном анализе РБД, предложено рассматривать три совместно действующих фактора: 1) геометрию и пространственное положение краевого шва Сибирской платформы; 2) рифтовые процессы в БРЗ, происходящие в условиях регионального СЗ–ЮВ растяжения по усредненному азимуту 310–330°; и 3) дифференцированное вращение Земли вокруг своей оси. Привлечение планетарного источника объясняет широкое распространение субширотных левых сдвигов в регионе и их интенсивную активизацию наряду с СВ–ЮЗ разломами, выражающуюся в генерировании сильных землетрясений.

Практическая ценность

- Методические приемы по выявлению деформационных структур в рыхлых и слабосцементированных осадках необходимы для картирования и изучения разломных зон в пределах территорий, перекрытых чехлом неоген-четвертичных отложений. Их использование оправдало себя при изысканиях под строительство нового моста через р. Ангару в г. Иркутске и трубопровода «Ковыкта–Иркутск», а также при выполнении работ по обоснованию площадки для захоронения жидких промышленных отходов в выработанных соленосных камерах комбината Сибсоль.

- Экспертная оценка степени активности разломов важна для выявления разрывных нарушений, развитие которых под воздействием природных и антропогенных факторов во время эксплуатации крупных инженерных сооружений может привести к существенному экологическому и экономическому ущербу, а также для обоснования выбора участков, перспективных для проведения геофизического мониторинга сейсмичности.

- Новая электронная карта и база данных активных разломов Прибайкалья может быть использована как тектоническая основа для обобщения геофизических и геодезических данных в целях прогнозирования сейсмического риска в регионе.

- Программное приложение для РБД, работающее в среде MapInfo и синтезирующее знания об активных разломах, является унифицированным инструментом для хранения, обработки и визуализации информации. Его внедрение на территории России повысит уровень представления результатов исследований активной разрывной тектоники.

Личный вклад. Автором проведена научная организация исследований; самостоятельно выполнены все этапы работ от постановки задач и полевых наблюдений до обработки данных и их анализа с последующей интерпретацией; составлены электронная карта и база данных активных разломов Прибайкалья, созданы концепция и схема РБД, определяющие структуру ее файловой системы и содержание. Результаты отмечены премиями: имени акад. Н.А. Логачева (2005 г.), Фонда содействия отечественной науке (2007 г.), Л'ОРЕАЛЬ – ЮНЕСКО для молодых российских женщин-ученых (2009 г.), имени акад. В.А. Обручева (2011 г.).

Публикации. По теме диссертации автором и с его участием опубликовано 135 научных работ, в том числе 2 монографии и 35 статей в ведущих рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России.

Связь работы с научными проектами. Работа проводилась согласно бюджетным проектам НИР в Институте земной коры СО РАН. Выполненные исследования поддержаны грантами Президента РФ (№№ МК-1645.2005.5, МК-1323.2007.5, МК-59.2009.5), грантом Лаврентьевского конкурса СО РАН, индивидуальным грантом INTAS (№ 05-109-4383), грантами РФФИ (№№ 09-05-92421-КЭ, 10-05-00072а) и госконтрактом Минобрнауки России (№ 2012-1.2.2-12-000-1007-001).

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования лично докладывались на Всероссийских научных конференциях, в том числе в Иркутске (1999, 2000, 2001, 2003; 2005, 2006; 2007, 2008, 2009, 2010), Томске (2000), Москве (2000, 2004, 2005, 2008, 2009, 2011), Новосибирске (2001, 2004, 2007), Черноруде (2000, 2001), Екатеринбурге (2002), Южно-Сахалинске (2005, 2007, 2008), Хабаровске (2010); на международных симпозиумах в Салониках (Греция, 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology 2004), Вене (Австрия, EGU General Assembly, 2006), Москве (ESC, 33-rd General Assembly, 2012). За рубежом доклады представлялись на семинарах в Калифорнийском государственном университете (Бейкерфилд, США, 2003), университете Аристотеля (Салоники, Греция, 2006, 2007), университете Феррары (Феррара, Италия, 2009), в Институте геологии при Сейсмологическом бюро Китая (Пекин, Китай, 2010, 2012).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и 4 приложений, включает компакт-диск с базой данных плиоцен-четвертичных разломов Прибайкалья. Объем основного содержания работы составляет 341 страницы, в т.ч. 179 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 396 наименований. Общий объем диссертации – 376 страниц.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность доктору геол.-мин. наук, профессору С.И. Шерману за инициализацию и многолетнюю поддержку исследований разрывной тектоники Прибайкалья, за доброжелатель-

ность и внимание к творческим работам диссертанта; академику РАН Ф.А. Летникову и члену-корреспонденту РАН Е.В. Склярову – за моральную поддержку и ценные советы; докторам геол.-мин. наук К.Ж. Семинскому, М.Г. Леонову, доктору физ.-мат. наук П.П. Шерстянкину, профессорам зарубежных университетов С.Б. Павлидесу (Университет имени Аристотеля, Греция), И. Марту (Университет г. Хайфы, Израиль), Р. Бради (Университет г. Калгари, Канада), Р. Капуто (Университет г. Феррара, Италия), кандидату геол.-мин. наук Я.Б. Радзиминович – за содержательные дискуссии и плодотворное сотрудничество; докторам геол.-мин. наук К.Г. Леви, А.М. Мазукабзову, В.И. Мельниковой, В.С. Имаеву, Н.О. Кожевникову, Г.Ф. Уфимцеву, Л.А. Сим, доктору физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкому, кандидату геол.-мин. наук В.А. Санькову – за полезные рекомендации и благожелательную критику отдельных положений исследований.

Автор искренне признательна кандидатам геол.-мин. наук А.С. Гладкову, А.В. Черемных, С.А. Борнякову, А.А. Боброву, И.А. Потехиной за помощь в сборе полевого материала, обсуждение результатов и разделение радостей и трудностей экспедиционных дорог; кандидатам геол.-мин. наук Н.Н. Неведровой и А.М. Санчаа – за предоставление геофизических материалов по впадинам Прибайкалья и совместные исследования; А.А. Гладкову за помощь при разработке программного обеспечения для реляционной базы данных. За внимательное отношение к своей научной деятельности и отзывчивость огромное спасибо ученому секретарю ИЗК СО РАН, кандидату геол.-мин. наук Р.П. Дорофеевой.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. История изучения и проблемы разрывной тектоники Прибайкалья

В главе 1 приводится краткий обзор 200-летней истории геологических исследований в Прибайкалье, а также очерчивается круг проблем, решение которых актуально для современного развития науки геотектоники.

Основы геологии, тектоники и геоморфологии рассматриваемой территории заложены в трудах И.Д. Черского, А.Л. Чекановского, П.А. Кропоткина, В.А. Обручева во второй половине XIX – начале XX века. Позднее под руководством Н.А. Флоренсова и В.П. Солоненко начались первые сейсмогеологические исследования, в результате которых была показана высокая потенциальная сейсмическая активность региона [Сеймотектоника..., 1968].

Многие труды 70-х и 80-х годов XX века стали фундаментом для будущих тектонических и геодинамических построений [Зорин, 1971; Ружич, 1972; Ружич и др., 1972; Шерман и др., 1973; Логачев и др., 1974; Булнаев и др., 1975; Molnar, Tarponier, 1975; Павлов и др., 1976; Замараев и др., 1976; 1979; Грачев, 1977; Зорин и др., 1977; Роль рифтогенеза..., 1977; Шерман, 1977; Булгатов и др., 1978; Рязанов, 1978; Шерман, Леви, 1978; Рогожина, Кожевников, 1979; Геология и сейсмичность зоны БАМ..., 1984–1985; Шерман, Днепровский, 1989; и др.]. Было показано, что разломы Прибайкалья представляют собой докайнозойские структуры с ярко выраженной кайнозойской активизацией [Шерман,

1977]. Установлено, что на флангах БРЗ преобладает обстановка растяжения со сдвигом, в центральной части – обстановка растяжения [Шерман, Днепровский, 1989].

В конце XX века возросло количество публикаций по проблемам разломной тектоники, напряженного состояния и сейсмичности БРЗ [Саньков и др., 1991; Леви, 1991; Logatchev, Zorin, 1992; Солоненко и др., 1993; Sherman, 1992; Шерман и др., 1992; Уфимцев, 1992; Hutchinson et al., 1992; McCalpin, Khromovskikh, 1995; Кузьмин, 1995; 1998; Рассказов, Иванов, 1996; Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века., 1996; Голенецкий и др., 1996; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; Ружич, 1997; Голенецкий, 1998; Мельникова, Радзиминович, 1998; Sherman, Gladkov, 1999; Рундквист и др., 1999]. В 1995 г. опубликована карта главных активных тектонических элементов Байкальской котловины [Леви и др., 1995], а в 1996 г. – карта активных разломов Восточной Сибири и Монголии [Леви и др., 1996].

Первое десятилетие XXI века ознаменовалось прорывом в изучении Западного Забайкалья [Булнаев, 2006; Воронцов и др., 2006; Мазукабзов и др., 2006; Ярмолук, Иванов, 2000, Ярмолук, Коваленко, 2003; Цеховский, Леонов, 2007; Цеховский и др., 2005; Леонов и др., 2007, 2008], а исследования в БРЗ расширились. Значительный вклад в накопление региональных данных по активной тектонике внесли В.А. Саньков, А.В. Парфеевец, К.Ж. Семинский, О.В. Лунина, А.С. Гладков, В.И. Мельникова, Н.А. Радзиминович, А.В. Аржанникова, С.А. Аржанников, А.В. Чипизубов, О.П. Смекалин и другие, в том числе иностранные специалисты. Компьютерные технологии привели к возможности оценки современной активности разломов [Шерман, Савитский, 2004; 2005].

Среди работ последнего десятилетия необходимо отметить статью Н.А. Логачева [2003], в которой обосновывается позднемеловой возраст начала формирования Южно-Байкальской впадины и наличие кратковременной фазы сжатия на рубеже 5–7 млн. лет, разделяющей стадии медленного и быстрого рифтинга в БРЗ. Одновременно Ю.А. Зорин провел с коллегами новые расчеты и показал, что именно существование и развитие астеносферного выступа обеспечивает возникновение в литосфере напряжений растяжения, достаточных для развития нормальных сбросов с образованием рифтов [Zorin et al., 2003; Зорин, Турутанов, 2005]. В то же время он подчеркивает, что образование БРЗ обусловлено как существованием разогретого мантийного вещества, так и наличием древних структур, которые благоприятно ориентированы к сжатию литосферы, возникшему в результате Индо-Евразийской коллизии. Некоторые авторы считают ее главной причиной рифтогенеза в Прибайкалье [Polyansky, 2002; Мац и др., 2001; и др.]. Между тем корреляция основных геологических и тектонических событий региона [Лунина, 2009; Лунина и др., 2009] и результаты трекового датирования [Jolivet et al., 2009] свидетельствуют о том, что раскрытие Байкала началось независимо от столкновения Индостана и Евразии.

Исторический обзор показывает, что в изучении Прибайкалья разрывная тектоника занимала одно из ведущих мест. Тем не менее, существуют открытые вопросы, обозначенные во Введении. Необходимость решения каждого из них подробно обосновывается во втором разделе главы.

Глава 2. Краткий обзор геологического строения Прибайкалья

В главе 2 описываются этапы становления и общие черты геологического строения исследованной территории. В ее современной структуре выделяются два крупнейших структурных элемента – Сибирская платформа и Центрально-Азиатский подвижный пояс, включающий области каледонской и байкальской складчатости, на которые в позднем мезозое, а затем в кайнозое наложились ЗЗРЗ и БРЗ. Контрастная тектоника и длительное развитие земной коры Прибайкалья определило его сложное геологическое строение. В нем участвуют докембрийские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские образования [Геологическая карта., 1999], сформированные в различных геодинамических обстановках [Ярмолюк, Иванов, 2000; Хаин, 2001; Розен, 2003; Ярмолюк, Коваленко, 2003; Логачев, 2003; Гордиенко, 2006; Зорин и др., 2007; Гладкочуб и др., 2007; Лунина и др., 2009; Иванов, Демонтерова, 2010; Ашурков и др., 2011].

В разделах главы излагаются особенности геологии кайнозойских и мезозойских впадин и их горных поднятий, а также юга Сибирской платформы. Дана характеристика рифтовым бассейнам, в пределах которых проводились детальные исследования диссертанта. Подчеркивается, что южная часть древнего Сибирского кратона активизирована на современном этапе тектогенеза вследствие деструкции литосферы в Саяно-Байкальском сегменте Центрально-Азиатского подвижного пояса [Семинский и др., 2008]. В связи с этим изучение разрывной тектоники Прибайкалья для позднекайнозойского этапа развития земной коры приобретает особое значение. Под позднекайнозойским этапом понимается неоген-четвертичное время, в течение которого интенсивно происходило горообразование, отражающее динамику тектонических процессов. В Прибайкалье орогенез наиболее ярко проявился в плиоцен-четвертичный период, когда БРЗ вступила во вторую стадию развития быстрого рифтинга. Многие выводы работы относятся именно к этому временному интервалу.

Глава 3. Методология исследований разрывной тектоники и напряженного состояния земной коры Прибайкалья

В главе 3 даны определения основным терминам, описаны особенности изучения и картирования разломов, кратко изложены методы реконструкции напряженного состояния. Понятие блока приведено по [Черемных, 1998], разлома и трещины по [Семинский и др., 2005]. В Прибайкалье выделяются генеральные (> 80 км), региональные (35–80 км) и локальные (<35 км) дизъюнктивы [Шерман, 1977]. Под активным разломом понимается разрывное нарушение, вдоль которого по комплексу признаков устанавливаются однонаправленные и/или знакопеременные тектонические смещения в течение последних 1–2 млн лет.

С исследованиями разрывной тектоники связано изучение напряженного состояния земной коры на основе анализа трещиноватости. Понятия о тектонических напряжениях исходят из работ [Гзовский, 1975; Шерман, Днепровский, 1989]. Тип поля напряжений определяется по соотношению углов наклона главных осей напряжений относительно горизонта: растяжение – $\sigma_1 = 61\text{--}90^\circ$,

$\sigma_2 = 0-30^\circ$, $\sigma_3 = 0-30^\circ$; растяжение со сдвигом – $\sigma_1 = 31-60^\circ$, $\sigma_2 = 31-60^\circ$, $\sigma_3 = 0-30^\circ$; сдвиг – $\sigma_1 = 0-30^\circ$, $\sigma_2 = 61-90^\circ$, $\sigma_3 = 0-30^\circ$; сжатие со сдвигом – $\sigma_1 = 0-30^\circ$, $\sigma_2 = 31-60^\circ$, $\sigma_3 = 31-60^\circ$; сжатие – $\sigma_1 = 0-30^\circ$, $\sigma_2 = 0-30^\circ$, $\sigma_3 = 61-90^\circ$; неопределенный – $\sigma_1 = 31-60^\circ$, $\sigma_2 = 0-30^\circ$, $\sigma_3 = 31-60^\circ$, где σ_1 – ось сжатия, σ_3 – ось растяжения, σ_2 – промежуточная ось обозначаются в европейской индексации.

Картирование и изучение разломно-блокового строения земной коры проведено на базе единого методологического подхода, включающего морфотектонический анализ наземного и подводного рельефа, полевые исследования, рассмотрение существующих карт и схем. При полевом изучении создавалась сеть точек наблюдений (далее т.н.) (рис. 1), в каждой из которых проводился

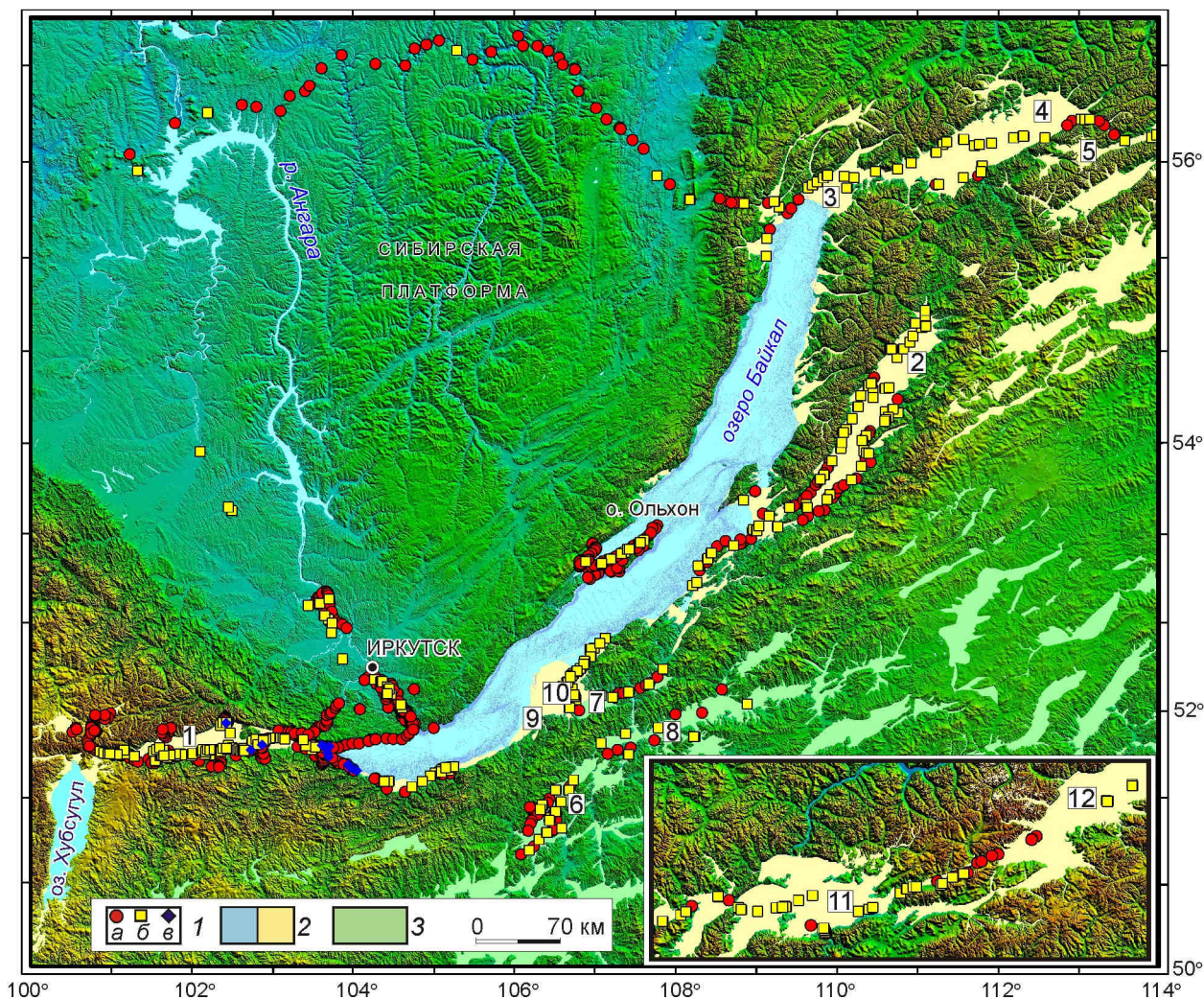


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения, изученных в пределах Прибайкалья. 1 – точки наблюдения в коренных докайнозойских породах (а), в позднекайнозойских отложениях (б), в которых изучены косейсмические эффекты Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (в); 2 – кайнозойские впадины БРЗ; 3 – мезозойские впадины ЗЗРЗ. Подписаны Тункинская (1), Баргузинская (2), Кичерская (3), Верхнеангарская (4), Муяканская (5), Гусиноозерская (6), Селенгино-Итанцинская (7), Иволгино-Удинская (8), Усть-Селенгинская (9), Селенгинская (10). На врезке справа внизу Муйская (11) и Чарская (12) впадины, расположенные за рамками основной схемы.

комплекс геолого-структурных работ, сопровождавшийся измерением объемной плотности трещин на 1 м^3 (n) и их количества на 1 м^2 (N), фотосъемкой стенок выхода и массовыми замерами трещин с характеристикой их генетического типа (скол, отрыв, неясный) и размера (мелкие $< 0,5$ м, средние $0,51-2,0$, крупные > 2 м).

При изучении активных разломов ключевую роль играла характеристика тектонических деформаций кайнозойских отложений. В связи с этим т.н. создавались в коренных, слабосцементированных и рыхлых породах, что является существенным отличием от всех предыдущих подходов, касающихся картирования разломно-блокового строения земной коры. Наиболее распространены в кайнозойских отложениях трещины, что позволяет использовать их для реконструкции поля тектонических напряжений [Лунина, Гладков, 2004; 2007; 2008; Сим, Михайлова, 2008; Белоусов, 2009]. Трещины развиты повсеместно, но с разной степенью интенсивности. Наибольшая их плотность наблюдается вблизи разломов, где они образуют участки сгущения, схожие с зонами повышенной трещиноватости и дробления. Следы скольжения и соударения на поверхностях галек, а также кластические дайки распространены локально и тяготеют к разломным сместителям. Различные формы конволюций – сейсмиды, образующиеся в результате разжижения грунтов при землетрясениях, а также складки проявляются вдоль зон разломов в полосе шириной до десятков км. Опыт их изучения в различных регионах мира позволил сформулировать основные требования, которых необходимо придерживаться при полевом картировании разломов в кайнозойских осадках: 1) площадное или профильное структурно-геологическое изучение разрезов слабосцементированных и рыхлых осадков, предусматривающее создание по возможности равномерной сети точек наблюдений; 2) документация всех наблюдаемых деформационных структур в разрезе с учетом критериев, указывающих на их тектонический генезис; 3) учет особенностей проявления деформационных структур различного типа в зависимости от степени литификации пород и мест их локализации (характера распространения) по отношению к главному сместителю разлома (линейный), зоне его динамического влияния (линейно-пошадной), блокам и разломам (площадной); 4) тектонофизический анализ линейно-ориентированных деформационных структур и элементов залегания разрывов и их обязательная корреляция с геолого-структурными данными, полученными для коренных пород.

Для реконструкции напряженного состояния земной коры использованы разработки П.Н. Николаева [1977] и М.В. Гзовского [1975]. Для некоторых точек наблюдения применены альтернативные методы [Расцветаев, 1982, 1987; Caputo, Caputo, 1988; Caputo, 1991; Yamaji, 2000; Ребецкий, 2004]. Для определения линии смещения по разрыву и в качестве дополнительного критерия сопряженности систем трещин использовались метод поясов В.Н. Даниловича [1961] и его модернизированный вариант [Шерман, Днепровский, 1989], а также анализ троек-систем трещин [Семинский, 2003].

При массовых замерах трещиноватости в древних кристаллических породах измерялись только “свежие” на вид разрывы, не залеченные минеральным веществом, нередко несущие следы подвижек в виде зеркал скольжения, а так-

же смещений маркеров. В рыхлых отложениях во внимание принимались только те трещины, чье тектоническое происхождение не вызывало сомнений. Таким образом, при полевых исследованиях собиралась информация о наиболее молодых разрывах, связанных с позднекайнозойским этапом развития земной коры.

Изложенная методология, основанная на постулатах тектонофизики и механики разрушения твердых тел, формировалась в течение многих лет проведения представленных в работе исследований по разрывной тектонике.

Глава 4. Разломы и сопутствующие тектонические деформации во впадинах и горных поднятиях Прибайкалья

В главе 4 представлены результаты исследований тектонических деформаций и картирования разрывов в пределах детально изученных районов Прибайкалья. На новом уровне охарактеризованы дизъюнктивы, получены радиоуглеродные возрасты деформированных осадков, составлены карты разломно-блокового строения площадей и сводная электронная карта активных разломов для территории, ограниченной координатами 100° – 114° в.д. и 50° – 57° с.ш.

Район Тункинской впадины

В Тункинской впадине и на сопредельной территории задокументировано 350 т.н. (рис. 1). 80 из них – в неоген-четвертичных отложениях, 270 – в докайнозойских породах. В результате показано, что разломно-блоковое строение данного района определяется разрывными нарушениями четырех направлений: субширотного 80 – 100° , СВ–ЮЗ 30 – 70° , СЗ–ЮВ 290 – 330° и субмеридионального 350 – 10° . Среди них последние наименее распространены. Внутри рифтового бассейна главную роль играют СВ–ЮЗ и субширотные разрывные нарушения, несущие следы голоценовых подвижек, что подтверждается радиоуглеродными датировками деформированных осадков. За пределами Тункинской впадины СЗ–ЮВ разломы приобретают основное значение, распространение субширотных неизменно, а СВ–ЮЗ прослеживаются только в хребте Хамар-Дабан и вблизи озера Байкал.

Установленные закономерности в разломно-блоковом строении земной коры отчетливо указывают на наложенность Тункинской впадины на более древнюю структуру, определяющими звеньями которой являются субширотный Тункинско-Хамардабанский и северо-западный Саянский сегменты Центрально-Азиатского складчатого пояса. Следовательно, в Юго-Западном Прибайкалье в позднем кайнозое образовывались, главным образом, СВ–ЮЗ дизъюнктивы, интенсивно активизировались субширотные и в меньшей степени СЗ–ЮВ. Наибольшая плотность разломов отмечается в межвпадинных перемычках Тункинской впадины, где сохранилась предшествующая разрывная структура, и возникли новые тектонические нарушения.

В зонах субширотных и СВ–ЮЗ разломов Тункинской впадины, а также в узлах их пересечения с разломами других направлений, в приповерхностных условиях наряду с разрывами широко проявлены сейсмичности. На тектоническую природу этих структур указывают критерии их обнаружения [Sims, 1975; Кор-

женков и др., 2007], наличие следов вертикально направленных к земной поверхности гидравлических сил [Obermeier, 1996], сопутствующие им сколы со смещениями [Гладков, Лунина, 2010], пространственное положение линейно-ориентированных структурных элементов, горизонтальная поверхность местности в районе изученных разрезов и корреляция полученных возрастов деформированных слоев с датировками сейсмодеформаций [Чипизубов и др., 2003; Чипизубов, 2007]. На инъекционные структуры сейсмогенной природы часто накладываются криогенные деформации, о чем свидетельствуют фрагменты песчаных даек, разбитых и растащенных в процессе последующих криотурбаций, а также наложение на них мерзлотных клиньев. Таким образом, узлы активных разломов представляют собой ослабленные участки, благоприятные для развития в рыхлых отложениях структур различного генетического типа.

Совместный анализ геолого-структурных и геоэлектрических данных показал, что разрывные нарушения, картируемые на земной поверхности по тектоническим деформациям в отложениях впадин, хорошо коррелируются с изменениями в глубинном строении осадочных слоев и поверхности кристаллического фундамента, проявляясь изгибами их кровли и подошвы, а также зонами более низких значений удельного электрического сопротивления [Лунина и др., 2009].

Район Баргузинской впадины

В пределах Баргузинской впадины и на сопредельной территории создана сеть т.н. на площади от р. Турка на юго-западе до места выхода р. Баргузин из гор на северо-востоке. Всего задокументировано 111 т.н. (рис. 1), из которых 59 – в четвертичных отложениях, 52 – в докайнозойских породах. Результаты исследований показали, что в разломной сети данного района главную роль повсеместно играют дизъюнктивы СВ–ЮЗ “байкальского” направления. Заметное влияние на структурное оформление собственно депрессии оказал крупный субмеридиональный разлом протяженностью более 400 км, начинающийся у границ Монголии. На карте разломов юга Восточной Сибири [1982] он заканчивается, не достигая 80–90 км Баргузинской впадины. Согласно полученным данным, разлом продолжается далее в осадочном наполнении бассейна в виде зоны разобщенных разломных сегментов и в кристаллическом фундаменте, что подтверждается интерпретацией глубинных геоэлектрических исследований [Лунина и др., 2009]. Некоторые из них наряду с СВ–ЮЗ разломами отделяют Баргузинскую впадину от обрамляющих хребтов. В рельефе субмеридиональный тектонический линеамент прослеживается до северной границы оз. Байкал, совпадая с осевой частью трансконтинентальной зоны Вебирс [Трансазиатская., 1978]. Немаловажную роль играют субширотные и СЗ–ЮВ разломы, разделяющие сбросовые пластины и облегчающие перемещение по ним. Таким образом, разломно-блоковое строение Баргузинского рифта в позднем кайнозое закономерно и предопределено ранее существовавшими тектоническими неоднородностями, что свидетельствует об унаследовании им древнего структурного плана.

Согласно результатам тектонофизического анализа трещиноватости и прямым геолого-структурным наблюдениям, разломы СВ–ЮЗ простирания имеют преимущественно сбросовый характер смещений, но местами, чаще на окончаниях дизъюнктивов, отмечается правосторонняя сдвиговая составляющая.

Деформационные структуры сейсмогенного генезиса присутствуют в зонах разрывных нарушений всех основных направлений, но особенно широко проявлены вблизи СВ–ЮЗ и субширотных разломов. Кроме того, в ассоциации с сейсмитами обнаружены недеформированные слои погребенных почв, опускание которых связывается с движениями относительно крупных блоков земной коры, не сопровождающихся интенсивными внутренними деформациями.

Район впадин Северо-Восточного Прибайкалья

Полевые исследования в данном районе были проведены вдоль северо-западного борта оз. Байкал, в Кичерской, Верхнеангарской, Муяканской, Улан-Макитской, Муйской и Чарской впадинах, а также в межвпадинных перемычках между ними (рис. 1). В 105 т.н. между г. Северобайкальск и пос. Икабья изучены тектонические и сейсмогравитационные деформации различного типа. 69 т.н. задокументировано в неоген-четвертичных отложениях, 36 – в докайнозойских породах. Проведенные исследования показали, что в Северо-Восточном Прибайкалье в позднем кайнозое формировались и активизировались разломы различных направлений, среди которых преобладают СВ–ЮЗ и ВСВ–ЗЮЗ. В горном обрамлении наблюдается более широкое распространение СЗ–ЮВ дизъюнктивов. Активность нарушений доказывается наличием в четвертичных осадках разрывов, образующих структурные парагенезы в виде поясов трещиноватости. По сравнению с сейсмитами они распространены значительно шире, что обусловлено преимущественно псефитовым составом отложений, в которых изучались деформации и, вероятно, мерзлотными и гидрогеологическими условиями территории Северо-Восточного Прибайкалья, которые не способствуют интенсивному разжижению грунта во время землетрясений.

В результате сопоставления разломно-блоковой структуры и данных геоэлектрических исследований установлено, что практически все выявленные с поверхности разломы в Муйской впадине проявляются на глубине, маркируя границы между блоками с разным удельным электрическим сопротивлением.

В ходе исследований разрывной тектоники Северо-Восточного Прибайкалья продемонстрировано влияние разломов на проявление сейсмогравитационных явлений при умеренных землетрясениях. Этот факт подчеркивает необходимость знаний о разломно-блоковом строении земной коры при оценке геологических опасностей, так как в зонах тектонических нарушений при определенном положении очага землетрясения усиливаются природные макросейсмические эффекты.

Район Гусиноозерской впадины

В Гусиноозерской впадине и ее горном обрамлении создана сеть из 35 т.н. (рис. 1), из которых 5 задокументированы в палеозойских, 17 – в мезозойских и 13 – в кайнозойских породах. Собранные данные и анализ различных картогра-

фических материалов позволили составить карту разломно-блокового строения земной коры для мезозойско-кайнозойского этапа развития этой территории, а также установить здесь превалирование разрывных нарушений СВ–ЮЗ направления. Показано, что осадочный чехол и фундамент депрессии имеют четко выраженное разломно-блоковое строение. Хамбинский разлом и пересекающие его разрывные нарушения на глубине коррелируются с пониженными значениями удельного электрического сопротивления и областями резкого изменения простираения геоэлектрических горизонтов в вертикальном разрезе, что связано с интенсивной раздробленностью пород в разломных зонах и их обводнением.

Установлено, что региональные Хамбинский и Моностойский разломы СВ–ЮЗ простираения, ограничивающие борта позднемезозойской депрессии, имеют преимущественно сбросовую кинематику с незначительным правым сдвигом. Оперяющие их локальные разрывы часто обладают большей сдвиговой составляющей, как право-, так и левостороннего характера. Деформации сжатия, местами наблюдаемые на границе впадины и хребта, имеют гравитационную природу и сформировались в области действия напряжений сдвигового типа. Последние необходимо относить к напряженному состоянию второго порядка (по отношению к растяжению), вызываемому неоднородностями строения земной коры, в том числе и для обеспечения трансформации блоков пород по сбросам.

Разломно-блоковая структура Гусиноозерской депрессии и прилегающей территории была достаточно активной в неоген-четвертичное время, о чем свидетельствуют зоны разрывных нарушений и сопутствующие им деформации типа “сейсмитов” в позднекайнозойских отложениях, локализованные в зонах разломов СВ–ЮЗ простираения. Голоценовая активность Хамбинского разлома также подтверждается приуроченностью палеосейсмодислокации, протяженность которой достигает 10 км.

Район Селенгино-Итанцинской впадины и дельты р. Селенги

В районе Селенгино-Итанцинской впадины и дельты р. Селенги задокументировано 46 т.н., из которых 7 – в палеозойских и протерозойских породах, 2 – в мезозойских и 37 – в четвертичных (рис. 1). По результатам геолого-структурного изучения и анализа материалов предшественников составлена карта разломно-блокового строения земной коры. На заключительном этапе ее построения положение некоторых разломов уточнено на основании данных геоэлектрических исследований [Неведрова и др., 2004; Лунина и др., 2009].

Показано, что Селенгино-Итанцинская депрессия в структурном отношении обладает всеми рифтовыми чертами, характерными как для мезозойских, так и для кайнозойских впадин Прибайкалья. В строении изученного района преобладают СВ–ЮЗ и СЗ–ЮВ разломы. Первые маркируют границы осадочных бассейнов и их горного обрамления, вторые – играют для них роль вспомогательных структур. В меньшей степени развиты субширотные и субмеридиональные дизъюнктивы, но часть из них довольно протяженные.

По разломам СВ–ЮЗ и ВСВ–ЗЮЗ направления установлены левосторонние сдвиго-сбросовые смещения; по разломам меридионального и ССЗ–ЮЮВ простирания – правые сдвиги. Для субширотных дизъюнктивов соотношение вертикальной и горизонтальной компонент неясно. Разрывные нарушения СЗ–ЮВ ориентировки внутри Селенгино-Итанцинской впадины проявлены слабо. Не удалось определить ни одной точной кинематической характеристики для них. Замеры штрихов скольжения по таким плоскостям имеют субгоризонтальный или наклонный (до 48°) угол склонения. Основная часть разломов СЗ–ЮВ простирания выделена в результате морфотектонического анализа рельефа в горном обрамлении.

По особенностям проявления трещиноватости в четвертичных отложениях в Селенгино-Итанцинской впадине предполагается слабая голоценовая активность разломов. Типичных сейсмогенных деформаций там не обнаружено. В то же время сопредельные Усть-Селенгинская и Селенгинская депрессии, как известно, высоко сейсмичны. В зоне Дельтового разлома, с которым связывается Цаганское катастрофическое землетрясение 1862 г., выявлены структурные формы сейсмогенного генезиса, среди которых в условиях развития криогенных процессов наиболее достоверными индикаторами прошлых землетрясений являются кластические дайки [Лунина и др., 2012]. Их формирование происходит в тесной взаимосвязи с разрывными нарушениями различных иерархических уровней.

Новая электронная карта активных разломов Прибайкалья для позднекайнозойского этапа развития земной коры

Представленные в диссертации результаты исследований разрывной тектоники, а также данные полевых наблюдений, собранные в пределах Сибирской платформы, в Иволгино-Удинской впадине и на побережьях озера Байкал (рис. 1), послужили геолого-структурной основой для создания новой обобщающей карты разломов Прибайкалья для позднекайнозойского этапа развития земной коры (рис. 2). Кроме того, для ее составления использованы цифровые модели рельефа SRTM 90 м, батиметрическая карта оз. Байкал [De Batist et al., 2002; Шерстянкин и др., 2006], топоосновы 1:200000 масштаба, литературный и картографический материал по активной тектонике и землетрясениям в Прибайкалье [Леви и др., 1995; 1996; Чипизубов, 2007; Трифонов и др., 2002; и мн.др.]. Все данные были послойно сведены в единой системе координат в программе “MapInfo” и критически проанализированы.

Электронная карта включает 1334 разлома, состоящих из 1801 сегментов. Из них 797 являются достоверными, 1004 – предполагаемыми. Критерием для выделения разлома служила его отчетливая выраженность в рельефе уступом или линейным отрезком гидросети. Достоверный класс присваивался структурам, которые подтверждались как минимум одним из ниже перечисленных прямых признаков: зонами разрывных нарушений и/или хорошо выраженными системами трещин определенного направления в породах любого типа и возраста; сейсмогенными деформациями; линейным выстраиванием вдоль разлома группы эпицентров землетрясений с $K_p \geq 10$; разломными сместителями,

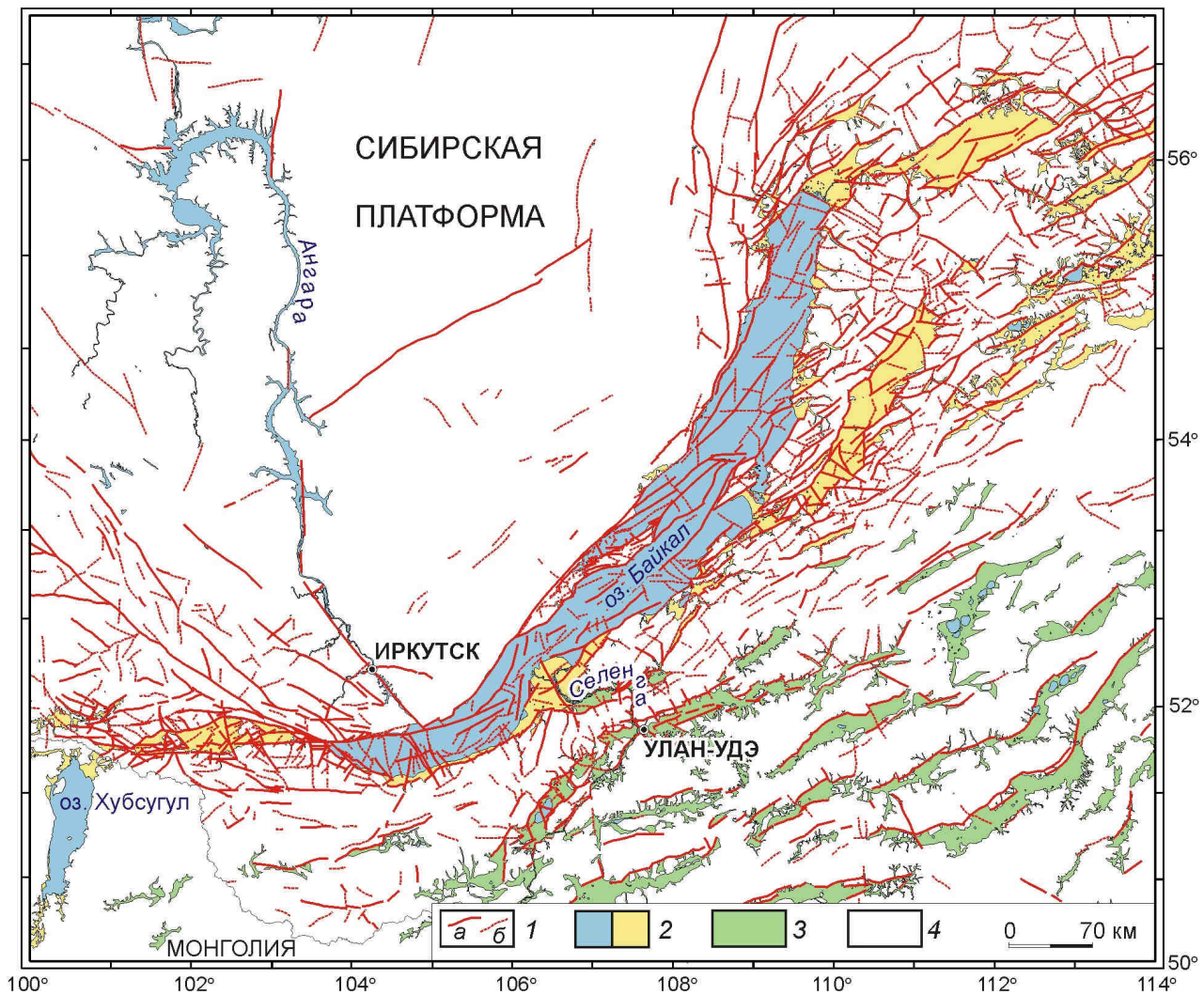


Рис. 2. Электронная карта активных разломов Прибайкалья. 1 – достоверные (а) и предполагаемые (б) разломы; 2 – кайнозойские впадины БРЗ; 3 – мезозойские впадины ЗЗРЗ; 4 - породы кристаллического фундамента и чехла Сибирской платформы.

наблюденными с подводных аппаратов; сейсмоакустическими данными о смещении осадков.

Принципиальным отличием новой электронной карты активных разломов Прибайкалья от разработок других авторов является ее комплексная основа, в которой важное место принадлежит прямым геолого-структурным наблюдениям о разрывных нарушениях различных иерархических уровней и сопутствующим деформациям в разновозрастных породах. Кроме того, она была выполнена на основе топографических карт 1:200000 масштаба с использованием самых последних достижений ГИС-технологий, что обеспечило точную географическую привязку разрывных нарушений. Благодаря детальной проработке различных материалов, на ней удалось обосновано показать разломы внутри рифтовых впадин и в то же время критически пересмотреть ту структурную сеть, которая была выделена ранее для всей территории Прибайкалья.

Выводы

- Движения по разломам Прибайкалья фиксируются в рыхлых отложениях

плейстоцена-голоцена по набору закономерно проявленных разрывных, хрупкопластических и пластических деформаций, которые в зависимости от условий деформирования могут быть представлены сколовыми трещинами (со смещениями и без них), их системами, зонами разрывов, кластическими дайками, складками и/или конволюциями. Их тектонический генезис доказывается удовлетворительным совпадением элементов залегания структур, измеренных в рыхлых и скальных грунтах, формированием трещинных парагенезов, характерных для сцементированных пород и локализацией в зонах известных активных разломов.

- Идентификация в плиоцен-четвертичном чехле локальных деформационных структур, происхождение которых связано с импульсными или криповыми тектоническими процессами, а также учет характера их распространения и степени литификации осадков вместе с данными о зонах дробления, расланцевания и трещиноватости в выступах коренных пород позволяет прослеживать активные разломы на значительном расстоянии и качественно картировать разломно-блоковую структуру территорий, перекрытых рыхлыми и слабосцементированными отложениями.

- Разломы, откартированные на земной поверхности во внутренних частях впадин, хорошо коррелируются с изменениями в глубинном строении осадочных слоев и поверхности кристаллического фундамента, проявляясь изгибами их кровли и подошвы и/или зонами более низких значений удельного электрического сопротивления. Значительные изменения электрических параметров в геологических массивах могут быть обусловлены перераспределением проводящей жидкости (флюида), что позволяет выделять обводненные и необводненные, возможно запертые, разломы.

- Разломно-блоковое строение впадин и горных поднятий Прибайкалья составляют тектонические нарушения СВ–ЮЗ, СЗ–ЮВ, субширотного и субмеридионального направлений, среди которых первые абсолютно доминируют. Тектонические деформации в рыхлых и слабосцементированных осадках плиоцен-четвертичного возраста в БРЗ и ЗРЗ приурочены в основном к зонам разломов СВ–ЮЗ и субширотной ориентировок, указывая тем самым на их большую активность по сравнению с другими дизъюнктивами.

- Кинематика разрывных нарушений, активных в позднем кайнозое, подчиняется единым закономерностям на территории Прибайкалья в пределах БРЗ и ЗРЗ: СВ–ЮЗ дизъюнктивы являются в основном сбросами, ВСВ–ЗЮЗ – левосторонними сдвиго-сбросами или сбросо-сдвигами, ССВ–ЮЮЗ – правосторонними сдвиго-сбросами. Субмеридиональные, СЗ–ЮВ и ССЗ–ЮЮВ разломы несут следы преимущественно правосторонних сдвиговых смещений, а ЗСЗ–ВЮВ – левосторонних. Для многих из них также типична сбросовая компонента. Данное заключение сделано на основе изучения конкретных структурных объектов и тем самым во многом уточняет и детализирует выводы предшественников [Шерман и др., 1973; Замаев и др., 1979; San'kov et al., 2000; и др.] о типах смещений по разнонаправленным разломам отдельных частей региона.

Глава 5. Разрывная тектоника и напряженное состояние земной коры Прибайкалья

Проведенные в последние десятилетия исследования [Леонов, 1995; Andeweg, 1999; Papadopoulos et al., 1986; Richardcon, 1992; Zoback, 1992; Plenefisch et al., 1997; Muller et al., 1997; Шерман, Лунина, 2001; Семинский, 2001; Caputo, 2005; и мн. др.] показали, что для относительно “однородных” по типу напряженного состояния регионов характерны вариации поля напряжений. Это связано с существенным различием в длительности развития разломных структур и действия разных по масштабу напряжений, знания о которых важны при тектонических и прогностических построениях. В связи с этим глава 5 посвящена реконструкциям и анализу напряженного состояния земной коры, которые выполнены для тех же районов, где детально проведено изучение тектонических деформаций и картирование разломов.

Совпадение структурных рисунков трещиноватости и направлений действия главных нормальных напряжений в докайнозойских и плиоцен-четвертичных породах свидетельствует о позднекайнозойском возрасте изученных полей напряжений. Сопоставление роз-диаграмм простираний субгоризонтальных осей растяжения для разных районов Прибайкалья показало, что формирование и активизация разрывной сети в БРЗ и ЗРЗ в позднеплиоцен-четвертичное время происходили в едином поле региональных напряжений под воздействием доминирующего горизонтального СЗ–ЮВ растяжения, региональный тренд которого достаточно устойчив в пределах $310\text{--}330^\circ$. Наибольшие его вариации характерны для флангов БРЗ.

Данные о полях напряжений указывают на то, что изученные системы впадин, за исключением Баргузинской, сформировались в результате косога растяжения, под которым понимается приложение внешней нагрузки под некоторым углом, отличным от $90^\circ \pm 10^\circ$, к осевой линии структуры. Косое растяжение является одной из причин возникновения сдвиговых деформаций в земной коре. Масштаб их проявления напрямую зависит от угла между σ_3 и уже существующей линейной неоднородностью и ее ранга [Withjack, Jamison, 1986; Tron, Brun, 1991; McClay, White 1995; Scott, Benes, 1996; Bonini et al., 1997; Clifton et al., 2000; Mart, Dauteuil, 2000; Corti et al., 2001]. Применительно к рифтовым структурам Прибайкалья наиболее неблагоприятными для реализации СЗ–ЮВ растяжения являются широтные и меридиональные разломные структуры. Именно в их зонах в Баргузинской и Тункинской впадинах наблюдались наибольшие вариации напряженного состояния земной коры.

Для кайнозойских рифтовых впадин и их окружения по геологоструктурным данным получены примерно одинаковые соотношения разных типов стресс-тензоров (табл. 1). При явном превалировании растяжения второе место по количеству решений принадлежит сдвиговому типу, которое играет заметную роль в формировании структуры регионального поля напряжений в каждом из изученных районов. Значительная часть сдвиговых решений связана с поперечными или косо направленными структурами, которые являются вспомогательными для сбросов СВ–ЮЗ и ССВ–ЮЮЗ простирания. Напряженное состояние сдвига возникает зачастую вследствие переориентировки σ_1 , σ_2 и σ_3

в местах структурных неоднородностей в земной коре. Ими могут быть как разломы, так и слоистость осадочных горных пород [Гончаров и др., 2005]. Вышесказанное позволяет заключить, что во многих случаях напряженное состояние сдвига является вторичным по отношению к растяжению, связанному с развитием астеносферного выступа. Часть сдвиговых деформаций реализуется в сочетании со сбросами, о чем свидетельствует довольно высокий процент решений, соответствующих растяжению со сдвигом.

Таблица 1. Соотношение разных типов стресс-тензоров в % для детально изученных районов Прибайкалья

Тип стресс-тензора	Район							
	Тункинской впадины	Баргузинской впадины		впадин Северо-Восточного Прибайкалья		Гусиноозерской впадины	Селенгино-Итанцинской впадины	Селенгинской впадины
		ГС	ГС	С	ГС			
Растяжение	53	52	57	51	57	41	40	56
Растяжение со сдвигом	17	16	24	18	24	15	27	33
Сдвиг	23	25	1	23	1	41	20	0
Сжатие со сдвигом	3	2	5	1	5	0	6,5	0
Сжатие	4	4	6	7	6	0	0	11
Неопределенный	0	1	7	0	7	3	6,5	0

Примечание: ГС – результаты расчетов по геолого-структурным данным; С – результаты расчетов по сейсмологическим данным, приведенным в работе.

Характерной особенностью поля напряжений в рифтовых структурах Прибайкалья является возникновение обстановки локального сжатия и сжатия со сдвигом. На это обращали внимание многие исследователи. Такое нетипичное для рифтовых зон напряженное состояние земной коры особо проявлено в горном обрамлении впадин и в межвпадинных перемычках, что было показано на примере района Тункинской впадины. Оно также выявлено в осадочном чехле Кичерской, Верхнеангарской, Чарской и Селенгино-Итанцинской впадин.

Проведенное исследование во многом подтверждает сделанные ранее выводы об особенностях напряженного состояния земной коры Прибайкалья [Шерман, Днепровский, 1989]. В то же время оно показывает, что очевидной зональности в распределении различных типов полей напряжений на флангах БРЗ не существует. Основной причиной сдвиговых деформаций там является растяжение, косо ориентированное по отношению к ранее существовавшим субширотным структурам. Из представленных в диссертации данных также следует, что напряженное состояние регионального уровня не изменялось в

Прибайкалье с конца плиоцена. Наконец, впервые показано, что для смежной с БРЗ позднемезозойской ЗЗРЗ характерны схожие особенности распределения поля напряжений земной коры.

Выводы

- Формирование и активизация разрывной сети Прибайкалья в пределах БРЗ и ЗЗРЗ в позднеплиоцен-четвертичное время происходили в едином поле региональных напряжений под воздействием доминирующего горизонтального СЗ–ЮВ растяжения, региональный тренд которого достаточно устойчив в пределах 310–330°.

- На флангах БРЗ, где генеральные и региональные разломы имеют субширотное простирание, при воздействии СЗ–ЮВ растяжения создавались условия косоугольного растяжения, являющегося главной причиной возникновения сдвиговых деформаций в земной коре и режима трансенсии регионального уровня. Интенсивность проявления сдвиговых деформаций нарастает на западном замыкании Тункинской системы впадин, где осевая линия БРЗ резко разворачивается к меридиональному направлению, приспособившись к древнему Тувино-Монгольскому структурному шву.

- На локальном уровне структура поля напряжений приповерхностной части земной коры Прибайкалья имеет мозаичное строение, определяемое вариациями ориентировок осей главных напряжений и примерно схожим сочетанием разных типов напряженного состояния. Наибольшие флуктуации поля напряжений возникают в узлах пересечения разломов, которые наряду с растяжением порождают значительные деформации сдвига и реже сжатия в разновозрастных породах, напряженное состояние которых в целом идентично.

Опыт исследований в разных сейсмоактивных регионах позволяет констатировать [Лунина, 2005; Lunina et al., 2005; 2008; Лунина и др., 2009], что на локальном уровне напряженное состояние повсюду характеризуется значительными неоднородностями, которые в первую очередь определяются особенностями разломно-блокового строения геолого-геофизической среды.

Глава 6. Оценка степени активности разломов Прибайкалья по комплексу геолого-геофизических данных

Разломно-блоковое строение геолого-геофизической среды определяется разрывными нарушениями различных направлений, активность которых и вероятность возникновения в их зонах катастрофических природных процессов различна. В связи с этим в главе 6 предлагается методика оценки степени активности разломов для выделения среди них потенциально опасных. На целесообразность их выделения указывалось в работах [Несмеянов и др., 1992; Кузьмин, Жуков, 2004]. Диссертантом под опасным принято понимать тот активный разлом, в зоне которого возможны проявления тектонических, сейсмических и инженерно-геологических процессов, способных принести вред здоровью людей, а также материальный и экологический ущерб экономике страны.

Новый подход к оценке степени активности разломов базируется на анализе разнородных данных, которые систематизируются в каталоге, включаю-

щем два основных раздела. Первый содержит общие сведения и параметры разломов, второй – различные признаки их активности (геоморфологические, структурно-геологические, палеосейсмогеологические, сейсмологические, геофизические, геолого-геодезические, инженерно-геологические, гидрологические, метеорологические), за которые в зависимости от значимости признака присваиваются экспертные оценки. Все группы признаков, за исключением метеорологической [Морозова, 2005], традиционно используются в практике исследований активной тектоники [Кофф, Лобацкая, 1991; Трифонов и др., 1993; Трифонов, 1999а; 1999б; Рогожин, Овсяченко, 2001; Кузьмин, Жуков, 2004; Лунина, Гладков, 2004а, 2007, 2008а; Рогожин и др., 2005; Семинский и др., 2005; Kozhurin, 2004; Имаев и др., 2005; Овсяченко, 2006; и др.]. Значимость признака и балл за него определялся индивидуально в сопоставлении с другими характеристиками разломов и изменялся от 1 до 7. При этом балл за косвенный признак активности не мог быть выше 3. Степень активности рассчитывается суммированием полученных оценок и записывается как общий балл активности разлома. В работе подробно обоснованы принятые баллы на основе существующих в природе связей и закономерностей [Лунина, 2010].

Методика оценки степени активности разломов первоначально была апробирована для Прибаргузинья, Тункинского и Северо-Восточного Прибайкалья. При заполнении базы данных для этих территорий использовались собственные геолого-структурные данные, каталог землетрясений БФ ГС СО РАН (<http://www.seis-bykl.ru>), сведения об известных термальных источниках [Минеральные воды..., 1961, 1962; Пиннекер и др., 1968, 1984], сейсмогеологические материалы [Сейсмогеология..., 1981; Солоненко и др., 1985; Хромовских и др., 1993; McCalpin, Khromovskikh, 1995; Чипизубов, Смекалин, 1999; Чипизубов и др., 2000, 2003], данные о геоэлектрических аномалиях [Санчаа и др., 2004; Эпов и др., 2007], а также некоторые другие материалы о скорости смещений по разломам и геофизических аномалиях.

Анализ полученных экспертных оценок показал, что наиболее целесообразно выделять пять степеней активности разломов: слабую (1–5 баллов), среднюю (6–10 баллов), повышенную (11–20 баллов), высокую (21–30 баллов) и аномально высокую (более 31 балла). Как правило, 11 и более баллов набирается у разломов с прямыми признаками активности, которые указывают на возможность сейсмогенного или довольно быстрого крипового смещения (более 5 мм/год) вдоль сместителя. В ином случае дизъюнктивы, характеризующиеся повышенной и высокой степенью активности, должны обладать большим количеством косвенных признаков активности, которые в комплексе также нельзя игнорировать. Таким образом, именно разломы с активностью 11 и более баллов принято рассматривать в качестве потенциально опасных.

Позднее методика была применена для всей территории Прибайкалья, в пределах которой были закартированы разрывные нарушения (рис. 2). При этом база данных о признаках активности разломов в процессе исследований была обновлена. Статистика проведенных расчетов показывает следующее: минимальное значение степени активности – 1; среднее значение степени активности – 3,16; максимальное значение степени активности – 32; количество разло-

мов со слабой степенью активности – 1396 (77,5%), со средней – 286 (15,9%), с повышенной – 97 (5,4%), высокой – 20 (1,1), аномально высокой – 2 (0,1). Установлено, что область локализации опасных разломов Прибайкалья развивается вдоль южной окраины Сибирской платформы и впадин БРЗ и совпадает с осевой линией современной деструктивной зоны литосферы, выделенной ранее по сейсмологическим данным [Шерман, 1996]. Наиболее опасные из них со степенью активности 20 и более баллов перечислены в выводах.

Выводы

- Подавляющее число разломов, характеризующихся повышенной, высокой и аномально высокой степенью активности, ограничивает борта рифтовых впадин или находится внутри них. Наиболее опасными из них являются Мондинский, Хойтогольский, Окино-Жомболокский, Главный Саянский, Обручевский, Сахалин-Энхалукский, Дельтовый, Южно-Святоносский, Амнундинский, Муяканский разломы, а также сегменты Тункинского, Приморского, Ольхонского (Морского), Баргузинского, Кичерского, Верхнеангарского (Северомуйского), Огней-Уклоньского и Верхнемуйского разломов.

- Простирание большинства разрывных нарушений с повышенной, высокой и аномально высокой степенью активности закономерно согласуется с генеральным направлением рифтовых впадин в разных частях Прибайкалья. При этом некоторые поперечные к ним разломы могут также представлять опасность. Как правило, они образуют узлы пересечения с основными активными структурами.

- Существует только общая тенденция, что чем больше протяженность разломного сегмента, тем больше его активность. При этом разрывное нарушение длиной 10–30 км может представлять опасность, а длиной более 60 км и даже свыше 100 км – нет.

- В рамках координат 100–114° в.д. и 50–57° с.ш. устанавливается около 10 % опасных сегментов разломов, локализующихся вдоль южной окраины Сибирской платформы и кайнозойских впадин БРЗ. В зонах остальных разломов относительная интенсивность движений существенно ниже. При этом очевидно, что вся сеть активных разрывных нарушений определяет строение геолого-геофизической среды, а следовательно, ее проницаемость для флюидов, особенности распределения сейсмических волн, а также аномальных геофизических полей и опасных явлений природного и техногенного характера.

Глава 7. Концептуальные основы, проектирование и анализ реляционной базы данных по разрывной тектонике Прибайкалья

Для Прибайкалья накоплен обширный материал по различным аспектам разрывной тектоники. Наиболее прогрессивным инструментом для его осмысления и обобщения представляется РБД – реляционная база данных, которая позволяет хранить информацию в нескольких таблицах, связанных между собой посредством совместно используемых полей данных, называемых ключами [Лошин, 2001]. Создание такой базы данных и специального программного приложения к ней требует ясного представления о сущности тех природных

объектов и их взаимосвязи, информация по которым интегрируется. В связи с этим в 7 главе представляются результаты разработки концепции и схемы РБД, приводится детальное содержание модуля для активных разломов, а также итоги формирования и анализа базы данных разрывных нарушений Прибайкалья для позднекайнозойского этапа развития земной коры.

Созданию концепции РБД (рис. 4) во многом способствовали ведущие мировые воззрения по проблемам оценки сейсмической опасности и формирования баз данных [Сейсмогеология., 1981; Несмеянов и др., 1992; Трифонов и др., 1993; 2002; Никонов, 1995а; Ружич, 1997; Уломов, Шумилина, 1999; Кузьмин, Жуков, 2004; Чипизубов, 2007; Уломов, 2009; Смекалин и др., 2010; Уломов, Перетокин, 2010; Vita-Finzi, 1986; Reiter, 1990; Matsuda, 1990; Lavecchia et al., 1994; Valensise, Pantosty, 2001; Basili et al., 2001; 2008; 2009; Koravos et al., 2006; Wesnousky et al., 1984; и др.]. В ее основе лежат представления о разломно-блоковом строении геолого-геофизической среды. Среди разрывных нарушений, определяющих ее строение, выделяются две группы сейсмогенерирую-

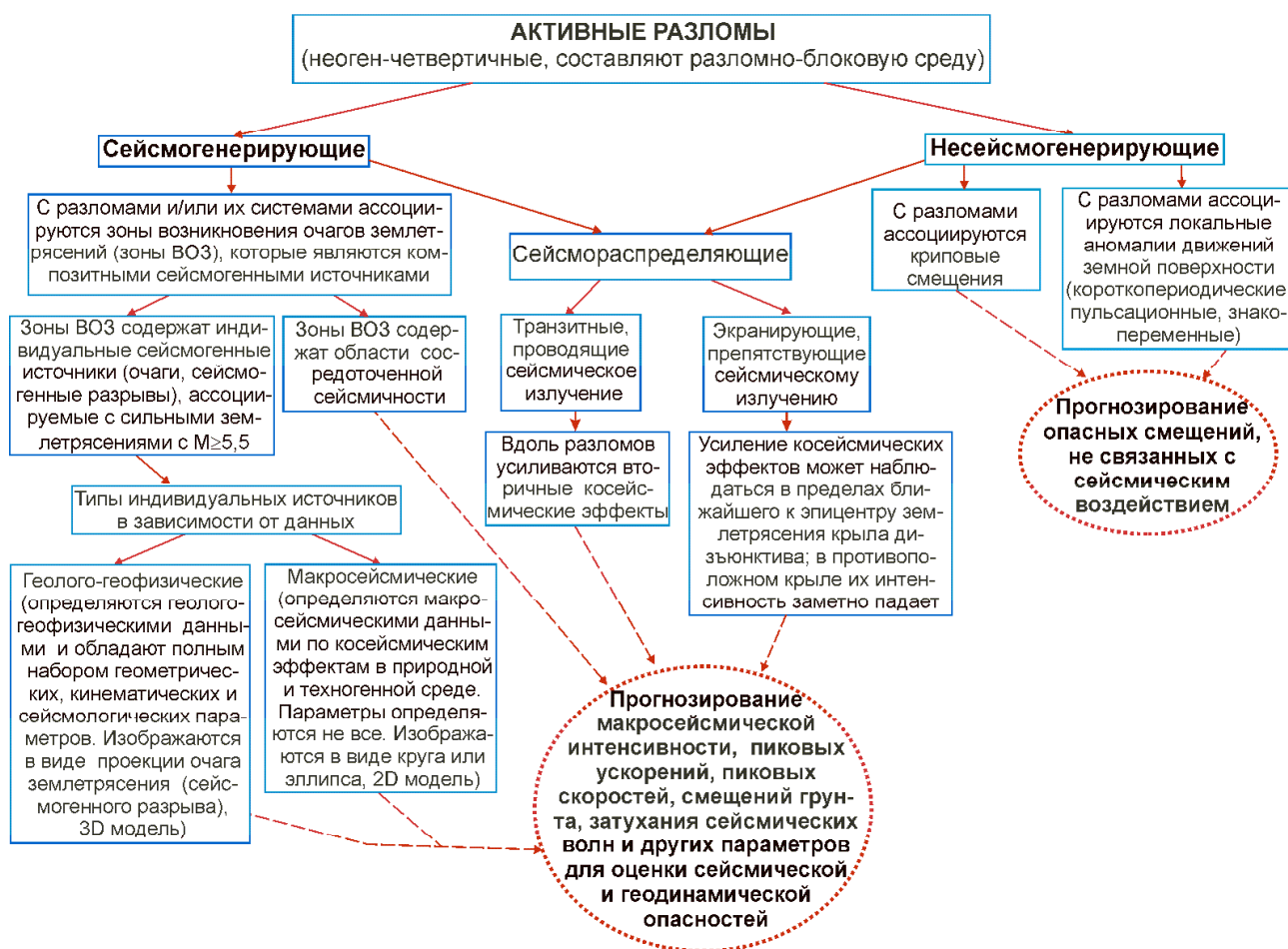


Рис. 4. Блок-схема, отражающая концепцию РБД.

щих и несейсмогенерирующих разломов. В зонах сейсмогенерирующих разломов накапливаемые тектонические напряжения реализуются через землетрясения. В зонах несейсмогенерирующих разломов происходят криповые смещения или короткопериодические, пульсационные и знакопеременные подвижки, относимые к локальным суперинтенсивным деформациям земной поверхности

[Кузьмин, Жуков, 2004]. Для ситуации, когда происходит сильное землетрясение, выделена подгруппа сейсмораспределяющих разрывных нарушений, окружающих сейсмический очаг и влияющих на распределение сейсмических волн и, как следствие, на особенности распространения косейсмических деформаций в разломно-блоковой среде. Сейсмораспределяющие разломы разделены на транзитные и экранирующие. Вдоль первых вторичные косейсмические эффекты (обвалы, оползни, трещины в грунтах, разжижение и т.п.) при землетрясении усиливаются. В случае экранирующего разлома усиление косейсмических эффектов может наблюдаться в пределах ближайшего к эпицентру события крыла дизъюнктива, в то время как в противоположном крыле их интенсивность заметно падает. С сейсмогенерирующими разломами или их системами ассоциируются зоны ВОЗ – возникновения очагов землетрясений, которые включают области сосредоточенной сейсмичности. В них каждый очаг землетрясения связан с эволюцией системы дизъюнктивов. Зоны ВОЗ содержат индивидуальные сейсмогенные источники – очаги сильных землетрясений с $M \geq 5,5$. Последние в зависимости от типа данных, на основании которых они выделяются, делятся на геолого-геофизические и макросейсмические.

РБД разрабатывается как приложение компьютерного пакета MapInfo. Ее структура состоит из шести модулей 1-го уровня, в которых, согласно предложенной концепции, интегрируется информация по активным разломам, композитным сейсмогенным источникам, индивидуальным геолого-геофизическим сейсмогенным источникам, индивидуальным макросейсмическим сейсмогенным источникам, косейсмическим эффектам, а также геолого-структурная информация. Последние два модуля объединяют фактические полевые данные. Для каждого модуля 1-го уровня составлены схемы, показывающие содержание подчиненных баз данных [Лунина и др., 2011].

Для базы данных активных разломов реализовано программное обеспечение «ActiveTectonics», которое позволяет вводить сведения через специальные окна сразу после нанесения объекта на карту, рассчитывать ряд параметров и выводить клиентскую часть базы данных в виде набора HTML страниц. Программирование осуществлено старшим лаборантом ИЗК СО РАН А.А. Гладковым. Создание унифицированной системы позволило для электронной карты активных разломов Прибайкалья (рис. 2) создать иллюстрированную базу данных, в которой информация содержится в виде атрибутивных таблиц, текстовых и графических приложений, взаимосвязанных между собой через идентификатор разлома.

На основе базы данных активных разломов Прибайкалья можно формировать выборки, которые служат базовым материалом для построения различных карт и экспресс-анализа данных. Разделение данных по кинематике дизъюнктивов показало, что в целом их процентное соотношение находится в определенном согласии с соотношениями разных типов стресс-тензоров (табл. 1). Сбросы составляют 65 % от всех разломов с установленными типами подвижек, левые сдвиги-сбросы – 9 %, левые сдвиги 7 %, левые сбросо-сдвиги – 5 %, взбросы – 4 %, правые сдвиги-сбросы – 3 %, правые сдвиги – 3 %, правые

сбросо-сдвиги – 2 %, левые взбросо-сдвиги – 1,6 %, правые взбросо-сдвиги – 0,2 %, левые сдвиги-взбросы – 0,2 %.

При анализе разломов разной кинематики обнаруживается закономерность в их направлении по отношению к частям света. Сбросы имеют доминирующее СВ–ЮЗ простирание (41–60°); левые сдвиги-сбросы, левые сдвиги и левые сбросо-сдвиги – субширотное (71–90°, 271–290°, 81–90°, соответственно); взбросы – СЗ–ЮВ (301–310°); правые сдвиги-сбросы – ВСВ–ЮЮЗ (351–360° и 11–30°); правые сдвиги – субмеридиональное (0–10°); правые сбросо-сдвиги – СЗ–ЮВ (311–330°) и субмеридиональное (0–20°); левые взбросо-сдвиги – СЗ–ЮВ (301–320°). В сущности, такая комбинация дизъюнктивов разного кинематического типа отражает парагенез разломных структур, сформированный в течение позднего кайнозоя в едином поле напряжений регионального уровня под воздействием СЗ–ЮВ горизонтального растяжения, которое определило особенности количественного и пространственного распределения разрывных нарушений с разными типами подвижек.

Пространственное распределение разломов с разными типами подвижек также демонстрирует четкую закономерность. Сбросы и сдвиги-сбросы развиты повсеместно, но особенно густо в центральных частях БРЗ и ЗБРЗ. Левосторонние сдвиги и сбросо-сдвиги встречаются по всей территории Прибайкалья. При этом на юго-западном фланге БРЗ они наиболее распространены, что в значительной степени определило строение Тункинского рифта, повлияв на особенности поля напряжений и геодинамическое развитие данной структуры в условиях косоугольного растяжения. Правосторонние сдвиги и сбросо-сдвиги проявлены локально. Взбросы располагаются по периферии Сибирской платформы только в границах перехода от флангов БРЗ и сопряженных с ними территорий. Правые взбросо-сдвиги, левые сдвиги-взбросы и взбросо-сдвиги окаймляют структуры сжатия в Восточном Саяне. Последние также отмечены в Верхнеанганско-Муяканской межвпадинной перемычке.

Разделение дизъюнктивов по возрасту последней активизации свидетельствует о том, что в плейстоцене разломы между истоком р. Ангары и Баргузинским заливом активизировались в сравнительно узкой полосе шириной от 60 до 140 км. Ее протяженность четко совпадает с СВ–ЮЗ сегментом краевого шва Сибирской платформы. При удалении на запад-юго-запад и северо-восток размеры области активизации увеличиваются до 360 км, что совпадает с изменением конфигурации южной границы древнего кратона. В голоцене территория, в пределах которой происходили смещения по разломам, сужается, и эта тенденция сохраняется до наших дней. Следует заметить, что как в голоцене, так и в настоящее время обновляются разрывные нарушения преимущественно СВ–ЮЗ и субширотного простирания, к которым относятся, главным образом, сбросы, левые сдвиги-сбросы, левые сдвиги и левые сбросо-сдвиги.

Среди всех активных разломов Прибайкалья наибольший интерес представляют сейсмоактивные структуры, способные породить землетрясения с $M \geq 5,5$. Детальное изучение данных о параметрах их очагов, собранных из работ А.В. Солоненко, В.И. Мельниковой, Н.А. Радзиминович и Гарвардского каталога землетрясений (<http://www.globalcmt.org>), позволило увязать большинство

сильных сейсмических событий с современными сейсмогенерирующими структурами. Их доминирующие СВ–ЮЗ и субширотное простирания хорошо согласуются с аналогичными трендами на розе-диаграмме для всей выборки сейсмоактивных нарушений, а также с выводом в главе 4 о том, что тектонические деформации в рыхлых и слабосцементированных осадках плиоцен-четвертичного возраста в БРЗ и ЗБРЗ приурочены в основном к зонам разломов СВ–ЮЗ и субширотной ориентировок, указывая тем самым на их большую активность по сравнению с дизъюнктивами других направлений.

Сопоставляя результаты комплексного анализа геолого-геофизической информации, включающего оценку активности разломов в главе 6, рассмотрение кинематических и возрастных характеристик разрывных нарушений, а также изучение их соотношений с землетрясениями с $M \geq 5,5$, можно выделить три главных фактора, сочетание которых определило особенности строения и активизации разрывной тектоники Прибайкалья на позднекайнозойском этапе развития земной коры: 1) геометрия и пространственное положение краевого шва Сибирской платформы; 2) рифтовые процессы в БРЗ, происходящие в условиях регионального СЗ–ЮВ растяжения по усредненному азимуту 310–330°; и 3) дифференцированное вращение Земли вокруг своей оси, предопределившее развитие и активизацию субширотных разломов в регионе.

Изначально краевой шов Сибирского кратона ограничивает распространение рифтогенных процессов к западу, а его изогнутая форма при соответствующем приложении на подошву земной коры горизонтальных растягивающих напряжений СЗ–ЮВ направления влияет на кинематические параметры разрывных нарушений различных направлений. Закономерно, что в таких структурных и геодинамических условиях вдоль северо-восточного сегмента древней тектонической границы разломы активизируются как сбросы, что благоприятствует развитию впадин соответствующего направления. Северо-западный сегмент краевого шва Сибирской платформы, маркируемый Главным Саянским взбросо-сдвигом, выступает в роли трансформного разлома [Зоненшайн и др., 1995]. Его среднее простирание 305° образует малый угол от 15° до 25° с направлением региональных растягивающих усилий.

Широкое развитие субширотных левосторонних сдвигов, часто со сбросовой компонентой смещений, может быть объяснено сочетанием деформации кручения, связанной с дифференцированным вращением Земли вокруг своей оси [Кэри, 1991], и растяжения в СЗ–ЮВ направлении, ассоциированного с подъемом аномальной мантии [Zorin et al., 2003; Зорин, Турутанов, 2005; Кулаков, 2008]. В Тункинской рифтовой впадине широтные структуры проявились особенно интенсивно, так как иницирующие процессы наложились на древний Тункинско-Хамардабанский структурный шов, возникший в раннем палеозое [Беличенко и др., 2003]. Более того, физический эксперимент показал, что при заложении в модель изогнутой в плане иницирующей структурной неоднородности левосдвиговые перемещения блоков становятся одним из определяющих факторов формирования впадин и разломов БРЗ [Семинский, 2009].

Привлечение механизма кручения, связанного с разной линейной скоростью вращения Земли, изменяющейся от экватора к полюсам, и смещением же-

стких литосферных блоков относительно более вязкой астеностеры в результате действия приливных сил [Scoppola et al., 2006], объясняет не только широко распространенные субширотные левые сдвиги в Прибайкалье, но и их способность генерировать сильные землетрясения наряду с СВ–ЮЗ разломами. Поскольку имеются доказательства влияния изменений скорости вращения Земли на инициацию сильных сейсмических событий [Левин, Чирков, 1999; Левин, 2006; Ma et al., 2006], следует допускать, что при подходящих реологических свойствах литосферы в Прибайкалье механизм вращения мог «сработать» в активной форме. Более того, существуют примеры, указывающие на левосдвиговое «скручивание» Земли [Гончаров, Водовозов, 2010].

Выводы

- Разработаны концепция и схема реляционной базы данных по активной разрывной тектонике, что является фундаментом для создания электронных карт и сеймотектонических проектов нового поколения, в которых базовые элементы – разломы, сейсмогенные источники и места локализации деформаций, связанных с деструкцией земной коры, сопровождаются разносторонними данными, иллюстрирующими степень их обоснованности.

- Для активных разломов реализован модуль РБД, который включает программное обеспечение, работающее в среде ГИС-пакета MapInfo, а также набор папок и файлов с информацией. Унифицированная система позволяет через специальные окна осуществлять ввод данных для картографического объекта, рассчитывать ряд параметров и выводить клиентскую часть базы данных в виде HTML страниц.

- Для территории Прибайкалья в рамках координат 100°–114° в.д. и 50°–57° с.ш., создана иллюстрированная база данных активных разломов, в которой информация для каждого сегмента разрывного нарушения содержится в виде атрибутивных таблиц, текстовых и графических приложений, взаимосвязанных между собой через идентификатор объекта.

- На основе созданной базы данных показано, что комбинация дизъюнктивов разного кинематического типа в Прибайкалье составляет парагенез разрывных структур, который формировался и активизировался в течение позднего кайнозоя в едином поле напряжений регионального уровня под воздействием СЗ–ЮВ горизонтального растяжения, которое определило особенности количественного и пространственного распределения разрывных нарушений с разными типами подвижек на фоне существования жесткой границы древнего Сибирского кратона.

- Установлено, что сбросы СВ–ЮЗ простирания и субширотные разломы с левосторонней компонентой горизонтального смещения являются главными источниками землетрясений с $M \geq 5,5$ в Прибайкалье.

- На основе комплексного анализа геолого-геофизической информации о разломах и рассмотрения их взаимосвязи с землетрясениями с $M \geq 5,5$ выделено три главных фактора, сочетание которых определило особенности строения и активизации разрывной тектоники Прибайкалья на позднекайнозойском этапе развития земной коры: 1) геометрия и пространственное положение краевого

шва Сибирской платформы; 2) рифтовые процессы в БРЗ, происходящие в условиях регионального СЗ–ЮВ растяжения по усредненному азимуту 310–330°; и 3) дифференцированное вращение Земли вокруг своей оси. Привлечение планетарного источника объясняет широкое распространение субширотных левых сдвигов в регионе и их интенсивную активизацию наряду с СВ–ЮЗ разломами, выражающуюся в генерировании сильных землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа на новом уровне обобщает результаты исследований разрывной тектоники Прибайкалья на позднекайнозойском этапе развития земной коры. Впервые для этой территории использован единый подход к картированию разломов с массовым изучением тектонических деформаций в скальных, слабосцементированных и рыхлых породах различного возраста. При этом была предложена классификация проявлений тектонических деформаций в кайнозойских отложениях и сформулированы четыре основных требования, которых необходимо придерживаться при полевом изучении и картировании разломов в чехле молодых осадков. Для трещиноватости в рыхлых отложениях показана возможность использования тектонофизических методов реконструкции напряженного состояния земной коры, основанных на законах механики разрушения твердых тел.

В тектонике долгое время существовал стереотип, что за исключением остаточных сейсмогенных деформаций, другие структурные формы, связанные с реализацией тектонических напряжений, не могут образовываться в самом верхнем осадочном слое земной коры, а если они и формируются там, то быстро исчезают из-за воздействия экзогенных процессов. Однако представленные в диссертации результаты показывают, что при определенном методическом подходе выявление тектонических деформаций в рыхлых и слабосцементированных отложениях возможно и весьма эффективно для изучения особенностей деструкции земной коры в последние периоды геологической истории. Последнее актуально как для геодинамических построений, так и для решения сейсмо-тектонических, инженерно-геологических и гидрогеологических задач, для которых важна информация о современной разломно-блоковой структуре и напряженном состоянии земной коры района исследований.

Использование параметров тектонических деформаций имеет большой потенциал для обнаружения и изучения эпицентральных зон прошлых землетрясений и, в конечном счете, параметризации сейсмогенного источника, связанного с развитием разлома. Впервые такая попытка проведена нами для Цаганского катастрофического землетрясения на Байкале [Андреев и др., 2011]. В итоге была разработана методика локализации эпицентра землетрясения доинструментального периода на основе количественного анализа косейсмических эффектов в рыхлых осадках [Лунина и др., 2011]. Большое значение в применении этой методики имеет анализ разрывов и вторичных сейсмогенных деформаций, относимых к группе сейсмитов. Многие из их типов, и в частности, инъекционные дайки, формируются в тесной взаимосвязи с разрывными наруше-

ниями различных иерархических уровней. В дальнейшем для Прибайкалья требуется более углубленное изучение особенностей проявления и механизмов образования различных косейсмических эффектов; установление корреляционных соотношений между параметрами инструментальных землетрясений и расстоянием от эпицентра до места, в пределах которого они образовались; определение зависимостей, которые позволят выявить закономерности, касающиеся влияния разломов на проявление сейсмогенных деформаций и затухание сейсмических волн для последующего их учета при оценке сейсмической опасности.

В современное время при исследованиях важнейшее внимание должно уделяться организации данных. В этом плане представленные в работе теоретическая концепция РБД, структура файловой системы и подробные схемы ее модулей дают прочный фундамент для развития направления в разрывной тектонике, связанного с информатизацией, в процессе которой происходит активное формирование и широкомасштабное использование информационных ресурсов. В результате информатизации в любой отрасли на новый уровень поднимаются научные исследования и разработки. При программировании всего комплекса модулей РБД по разрывной тектонике усовершенствуются методические подходы, связанные с представлением данных в электронных сейсмо-тектонических проектах, с оценкой сейсмической и других геологических опасностей, прямо или косвенно связанных с деструкцией земной коры. Удобство и частичная автоматизация ввода данных в значительной степени снижает время перевода имеющихся результатов по разрывной тектонике в электронный вид. Уже сейчас готов и протестирован первый модуль [Лунина, Гладков, 2011; Лунина и др., 2012], работающий в среде ГИС-пакета MapInfo. По своим свойствам он отвечает понятию информационная система, создание которой позволило в электронном виде интегрировать полученные знания об активных разломах Прибайкалья. На основе анализа базы данных информационной системы построена серия различных карт и установлены особенности активизации разрывной сети в позднем кайнозое.

Главные итоги проведенных исследований:

1. Доказано, что движения по разломам Прибайкалья фиксируются в рыхлых отложениях плейстоцена-голоцена по набору закономерно проявленных деформаций, которые в зависимости от условий деформирования могут быть представлены сколовыми трещинами (со смещениями и без них), их системами, зонами разрывов, кластическими дайками, складками и/или конволюциями. Их тектонический генезис обосновывается совпадением элементов залегания структур, измеренных в рыхлых и скальных грунтах, формированием трещинных парагенезов, характерных для сцементированных пород, и локализацией в зонах известных активных разломов. Особенности проявления тектонических деформаций зависят от степени литификации пород, их гранулометрического состава и мест локализации относительно осевой зоны разлома, что позволяет картировать разрывную сеть слабо обнаженных территорий.

2. На основе критического анализа предшествующих построений, дешифрирования топографических и батиметрических основ, а также массового поле-

вого изучения тектонических деформаций в разновозрастных породах составлена новая электронная карта активных разломов Прибайкалья для территории в рамках координат 100° – 114° в.д. и 50° – 57° с.ш. Показано, что разломы, откартированные на земной поверхности во внутренних частях впадин, хорошо коррелируются с изменениями в глубинном строении осадочных слоев и поверхности кристаллического фундамента, проявляясь изгибами их кровли и подошвы и/или зонами более низких значений удельного электрического сопротивления.

3. Предложен новый подход к экспертной оценке степени активности разломов, базирующийся на комплексном анализе разнородных данных. С использованием данного метода установлено, что в Прибайкалье большинство тектонических нарушений, характеризующихся повышенной, высокой и аномально высокой степенью активности, локализуется вдоль южной окраины Сибирской платформы и кайнозойских впадин БРЗ. Наиболее опасными из них являются Мондинский, Хойтогольский, Окино-Жомболокский, Главный Саянский, Обручевский, Сахалин-Энхалукский, Дельтовый, Южно-Святоносский, Амнундинский, Муяканский разломы, а также сегменты Тункинского, Приморского, Морского (Ольхонского), Баргузинского, Кичерского, Верхнеангарского (Северо-Муйского), Огней-Уклоньского и Верхнемуйского разломов.

4. Разработаны концепция и схема реляционной базы данных по активной разрывной тектонике, где базовые элементы – разломы, сейсмогенные источники и места локализации деформаций, связанных с деструкцией земной коры, – сопровождаются разносторонними данными, иллюстрирующими степень их обоснованности. Для разломов реализован модуль РБД, который включает работающее в среде ГИС-пакета MapInfo программное обеспечение, а также набор папок и файлов с информацией. При его помощи для новой карты активных разломов Прибайкалья создана иллюстрированная база данных, в которой сведения для каждого сегмента разрывного нарушения содержатся в виде атрибутивных таблиц, текстовых и графических приложений и визуализируются на HTML страницах.

5. Показано, что комбинация дизъюнктивов разного кинематического типа в Прибайкалье отражает парагенез разломных структур, который формировался и активизировался в течение позднего кайнозоя в едином региональном поле напряжений под воздействием доминирующего СЗ–ЮВ горизонтального растяжения. На локальном уровне структура поля напряжений приповерхностной части земной коры определяется вариациями ориентировок осей главных напряжений и примерно схожим сочетанием разных типов напряженного состояния (для каждой из детально исследованных площадей). Флуктуации поля напряжений наиболее часты в зонах влияния субширотных и субмеридиональных структурных швов и в узлах пересечения разломов, где наряду с растяжением возникают значительные деформации сдвига и реже сжатия.

6. Выделено три главных фактора, сочетание которых определило особенности строения и активизации разрывной тектоники Прибайкалья на позднекайнозойском этапе развития земной коры: 1) геометрия и пространственное положение краевого шва Сибирской платформы; 2) рифтовые процессы в БРЗ,

происходящие в условиях регионального СЗ–ЮВ растяжения по усредненному азимуту 310–330°; и 3) дифференцированное вращение Земли вокруг своей оси, инициирующее развитие и активизацию субширотных разломов с левосторонней компонентой смещения, которые вместе с СВ–ЮЗ дизъюнктивами широко распространены на изученной площади и являются главными источниками землетрясений с $M \geq 5,5$ в Прибайкалье.

Практическое значение полученных результатов заключается в их использовании для научно-изыскательских работ на территории Прибайкалья, связанных с оценкой устойчивости и проницаемости инженерно-геологических массивов при природно-техногенных воздействиях на окружающую среду. Они важны для установления сеймотектонической позиции очагов землетрясений и усовершенствования геодинамических моделей развития сложного по своему геологическому строению региона.

Итоги исследований во многом выходят за рамки региональной направленности диссертационной работы. Важным достижением является введение в практику исследований массового геолого-структурного изучения разрезов рыхлых и слабосцементированных пород, что позволяет картировать и изучать разломы в пределах впадин и платформ, перекрытых на большей части молодыми осадками. Наконец, разработка унифицированной информационной системы – РБД «ActiveTectonics» – представляет собой существенный шаг вперед в развитии исследований и представлении данных по разрывной тектонике. РБД может быть внедрена на всей территории России, и тогда данные по разломам со временем будут организованы в доступные информационные ресурсы, необходимые для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. 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.
2. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. – 316 с.

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень..» ВАК Минобрнауки России

3. Гладков А.С., Черемных А.В., Лунина О.В. Деформации юрских отложений южной окраины Иркутского амфитеатра // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 220–227.
4. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Шерман С.И., Лунина О.В., Скуденко Т.В. Внутренняя структура разломов и ее учет при изысканиях под строительство сейсмостойких сооружений (на примере нового моста через р. Ангару в Иркутске) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2001. – № 1. – С. 5–9.

5. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Доклады академии наук. – 2001. Т. 378, № 5. – С. 672–674.
6. Лунина О.В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуд землетрясений // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 9. – С. 1389–1398.
7. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В. Тектонофизическая характеристика зоны Ангарского разлома (юг Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 8. – С. 1260–1270.
8. Лунина О.В., Гладков А.С. Детальное картирование и сравнительный анализ внутреннего строения зон разломов (на примере Прибайкалья) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2002. – № 4. – С. 30–39.
9. Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 5. – С. 446–455.
10. Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура и поля напряжений западной части Тункинского рифта (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 10. – С. 1235–1247.
11. Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура Тункинского рифта – отражение процесса косоугольного растяжения // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 398, № 4. – С. 516–518.
12. Гладков А.С., Лунина О.В. Трещины в позднекайнозойских отложениях: новые возможности для структурного анализа // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 398, № 6. – С. 782–785.
13. Гладков А.С., Лунина О.В., Черемных А.В. О взаимоотношении юрских и кембрийских толщ на юге Сибирской платформы // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2004. – № 2. – С. 9–15.
14. Лунина О.В. Разрывные системы и поля напряжений южной части рифта Мертвого моря // Геотектоника. – 2005. – № 2. – С. 52–65.
15. Лунина О.В., Гладков А.С., Новиков И.С., Агатова А.Р. Тектонофизический анализ зоны разрывных деформаций Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 401, № 1. – С. 58–61.
16. Гладков А.С., Лунина О.В., Дзюба И.А., Орлова Л.А. Новые данные о возрасте деформаций в Тункинской рифтовой впадине // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 405, № 2. – С. 229–232.
17. Mart Y., Ryan W. B.F., Lunina O.V. Review of the tectonics of the Levant Rift System: the structural significance of oblique continental breakup // Tectonophysics. – 2005. – V. 395, № 3–4. – P. 209–232.
18. Lunina O. V., Mart Y., Gladkov A.S. Fracturing patterns, stress fields and earthquakes in the Southern Dead Sea Rift // J. Geodynamics. – 2005. – V. 40. – P. 216–234.
19. Лунина О.В., Гладков А.С., Новиков И.С., Агатова А.Р., Высоцкий Е.М., Еманов А.А. Сейсмогенные деформации и поля напряжений в разломной зоне Чуйского землетрясения 2003 г., $M_s=7.5$ (Горный Алтай) // Геотектоника. – 2006. – № 3. – С. 52–69.

20. 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. 775–789.
21. Лунина О.В., Гладков А.С., Шерман С.И. Вариации полей напряжений Тункинского рифта (Юго-Западное Прибайкалье) // Геотектоника. – 2007. – № 3. – С. 69–96.
22. Лунина О.В., Радзиминович Я.Б., Гладков А.С. О влиянии зон разломов на гравитационные явления при землетрясениях умеренной силы // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 7. – С. 790–794.
23. Лунина О.В. Гладков А.С. Активные разломы и поля напряжений северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 146–160.
24. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I. S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A. Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7,5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics. – 2008. – V. 453. – P. 276–294.
25. Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Гладков А.С., Лунина О.В., Бержинская Л.П., Радзиминович Н.А., Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Опыт применения шкалы ESI-2007 для оценки интенсивности Култукского землетрясения 27.08.2008 г., Южный Байкал // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – Т. 36, № 3. – С. 5–23.
26. Лунина О.В. Гладков А.С. Разломно-блоковое строение и напряженное состояние земной коры Гусиноозерской впадины и прилегающей территории (Западное Забайкалье) // Геотектоника. – 2009. – № 1. – С. 78–96.
27. Лунина О.В., Гладков А.С., Орлова О.А. Свидетельства палеосейсмических событий в рифтовых впадинах Прибайкалья и их возрастные привязки // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 427, № 1. – С. 79–83.
28. Лунина О.В. Формализованная оценка степени активности разломов в плиоцен-четвертичное время (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. – 2010. – № 4. – С. 525–539.
29. Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 5. – С. 662–667.
30. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Тектоническое строение, напряженное состояние и геодинамика рифтовых впадин Прибайкалья // Геотектоника. – 2010. – № 3. – С. 525–539.
31. Лунина О.В., Неведрова Н.Н., Гладков А.С. Тектонофизические и геоэлектрические исследования рифтовых впадин Прибайкалья // Геофизические исследования. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 5–14.
32. Лунина О.В., Гладков А.С. Фрактальный анализ пространственно-временных изменений эпицентрального поля землетрясений в разных районах Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 5. – С. 60–75.
33. Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С. Локализация эпицентра землетрясения доинструментального периода на основе количественного анализа

косейсмических деформаций в рыхлых отложениях // Доклады академии наук. – 2011. – 438. – № 4. – С. 543–549.

34. Лунина О.В., Гладков А.А., Капуто Р., Гладков А.С. Разработка реляционной базы данных для сейсмотектонического анализа и оценки сейсмической опасности юга Восточной Сибири // Геоинформатика. – 2011. – № 2. – С. 26–35.
35. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 1. – С. 49–60.
36. Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С. По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 6. – С. 775–796.
37. Lunina O.V., Nevedrova N.N., Gladkov A.S. Tectonic and geoelectric structure of rift basins in the Baikal region // Comptes rendus geosciences. – 2012. – V. 344, № 3–4. – P. 149–158.

Избранные статьи и тезисы в других изданиях

38. Лунина О.В., Гладков А.С. Особенности внутреннего строения зон сейсмоактивных разломов в областях с различным напряженным состоянием литосферы (на примере Прибайкалья) // Материалы XXXV Тектонического совещания: Тектоника и геофизика литосферы. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 313–317.
39. Лунина О.В. К вопросу о пространственно-временных вариациях напряженного состояния земной коры в зонах активного тектогенеза // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 396–399.
40. Гладков А.С., Лунина О.В. Тектонические деформации в кайнозойских отложениях: особенности проявления и классификация // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Т. 1. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – С. 97–98.
41. Лунина О.В. Опасные разломы: принципы выделения и оценки (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз / Под ред. О.Н. Лихачевой. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – С. 138–146.
42. Лунина О.В., Неведрова Н.Н., Гладков А.С. Тектоническое строение и геофизические поля рифтовых впадин Прибайкалья // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Т. 1. – М.: ИФЗ, 2008. – С. 261–263.
43. Лунина О.В. Деформационные структуры в зонах опасных разломов (результаты апробации нового подхода для оценки степени активности дизъюнктивов) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз / Под ред. О.Н. Лихачевой. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. – С. 101–108.

44. Лунина О.В., Радзиминович Я.Б., Гладков А.С. Сейсмогравитационные деформации Култукского землетрясения 27 августа 2008 г., $M_s=6,2$, на Южном Байкале // Современная тектонофизика. Методы и результаты. – М.: ИФЗ, 2009. – С. 121–125.
45. Лунина О.В., Гладков А.С. Андреев А.В. Вторичные косейсмические деформации в четвертичных отложениях района дельты р. Селенги (Байкальская рифтовая зона) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 7. Т. 1. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – С. 179–181.
46. Гладков А.С., Лунина О.В. Сейсмита юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 249–272.
47. Лунина О.В., Гладков А.А. База данных активных разломов – унифицированная система ввода, хранения и визуализации информации // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – С. 421–423.
48. Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.А. Косейсмические эффекты в природной среде: новый подход к организации данных для их анализа и визуализации // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). – В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – Т. 2. – С. 42–44.
49. Лунина О.В., Гладков А.С., Андреев А.В., Гладков А.А. Тектонофизическое изучение косейсмических эффектов в природной среде // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов конференции в ИФЗ РАН в 2-х томах. – Т. 2. – М.: ИФЗ. – 2012. – С. 130–133.
50. Lunina O.V., Gladkov A.A., Caputo R., Gladkov A.S. Active faults in southeastern Siberia: database, analysis and interpretation // Book of abstract 33-rd General Assembly of the European Seismological Commission (YSTC 2012), 25 – 30 August 2012, Obninsk. – M., PH “Poligrafikwik”, 2012. – P. 350.