

На правах рукописи

БОБРОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

**СТРУКТУРА РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ
ПО ДАННЫМ РАДОНОВОЙ СЪЕМКИ
(на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья)**

Специальность 25.00.03 – геотектоника и геодинамика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2010

Работа выполнена в Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор геолого-минералогических наук
Семинский Константин Жанович
(Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск)

Официальные оппоненты доктор геолого-минералогических наук
Ружич Валерий Васильевич
(Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск)

доктор геолого-минералогических наук
профессор Булнаев Андрей Иосифович
(Иркутский Государственный
Технический Университет, г. Иркутск)

Ведущая организация Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ)

Защита состоится «15» февраля 2010 г. в 09:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 003.022.02 в Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского научного центра СО РАН в здании Института земной коры СО РАН.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета к.г.-м.н. Юрию Витальевичу Меньшагину, e-mail: men@crust.irk.ru

Автореферат разослан «__» января 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

Меньшагин Ю.В.

Введение

Актуальность исследований. Измерения концентрации радона в подпочвенном воздухе проводятся для различных в геодинамическом отношении регионов с целью выявления разломов, определяемых в тектонике как активные. Информация о них лежит в основе установления теоретических закономерностей разломообразования в земной коре, позволяет оценивать сейсмическую опасность районов интенсивного природопользования, необходима при строительстве коммуникаций, промышленных зданий и сооружений. В подавляющем большинстве случаев главной задачей проведения подобных исследований является лишь выявление главного разломного сместителя, тогда как целая серия структурных факторов образования эманационных аномалий, обуславливающих различие последних по величине, размеру и форме, остается не изученной.

Согласно современным представлениям тектонофизики, разлом у поверхности земли редко представлен лишь узкой полосой тектонитов. Как правило, это достаточно широкая зона проявления парагенетически связанных разрывных нарушений, обрамленная по периферии участками повышенной трещиноватости. Ее внутреннее строение определяется степенью тектонической активности, стадией развития, размерами и морфогенетическим типом разлома. Акцентированного (на количественной основе) исследования обусловленности радоновых аномалий перечисленными факторами, судя по известным литературным данным, ранее не проводилось. Кроме того, практически не изучены соотношения радоновой активности дизъюнктивов, т.е. степени их проявления в поле эманаций радона, с характеристиками других связанных с ними геофизических полей (эманационных и электромагнитных), что необходимо для разработки в будущем обобщенной геолого-геофизической модели разломной зоны земной коры.

Цель работы – исследовать радоновую активность разнотипных и разноранговых разломных зон, располагающихся в пределах смежных регионов юга Восточной Сибири, существенно отличающихся интенсивностью тектонических движений.

Районы исследований. В качестве представителя стабильных территорий выбрано Южное Приангарье (окраина Сибирского кратона), а тектонически активных участков земной коры – Западное Прибайкалье (точнее – Приольхонье), принадлежащее к центральной части Байкальского рифта. Для рассматриваемых регионов исследование является вдвойне актуальным, так как, несмотря на их хорошую изученность вследствие интенсивного природопользования, в литературе приводятся лишь единичные оценки радоновой активности, относящиеся к крупным разломам Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Задачи исследования.

1. Оработать методику экспрессной эманационной съемки в условиях юга Восточной Сибири и определить пределы изменений объемной активности радона (ОАР) в подпочвенном воздухе для тектонически активного (центральная часть Байкальского рифта) и пассивного (юг Иркутского амфитеатра) участков земной коры.

2. Выявить наиболее общие закономерности пространственных вариаций ОАР в дизъюнктивных зонах Приольхонья и Южного Приангарья и представить их в качестве принципиальной модели поля радона над разломом земной коры.

3. Сопоставить радоновую активность разломных зон, отличающихся тектонической активностью, масштабным рангом и морфогенетическим типом.

Объекты исследований. Был проведен целый ряд исследований в различных районах: Тункинская долина, дельта р. Селенги, Приольхонье и Южное Приангарье. Основные выводы были сделаны по данным лишь двух последних территорий, как наиболее изученных. Таким образом, в представленной работе объектами исследований являются 28 разломных зон, располагающихся в пределах 19 участков, 10 из которых относятся к рифту и 9 – к платформенной территории.

Главный предмет исследований – поле концентрации радона в подпочвенном воздухе, изменяющееся в зависимости от структурных особенностей разломных зон Приольхонья и Южного Приангарья.

Фактический материал и методы исследований. В основу работы положен большой объем количественной информации, полученной в результате реализации на изученных территориях комплекса методов *полевой геофизики* (эманационная съемка на радон и торон, магниторазведка, электроразведка методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), симметричное (СЭП) и дипольное (ДЭП) электрические профилирования) и *полевой тектонофизики* (структурная съемка в сочетании с методами реконструкции полей напряжений и кинематики перемещений по разломным поверхностям). В анализе участвовали данные по: 84 профилям радон-тороновой съемки (837 пунктов измерений), 41 профилю магниторазведки (1663 пункта измерений), 30 профилям электроразведки методом СЭП (1023 пункта измерений), 3 профилям электроразведки методом ДЭП (67 пунктов измерений), 3 профилям электроразведки методом ЗСБ, 4 профилям электроразведки методом ВЭЗ, а также структурные материалы по разломам и трещинам (135 точек наблюдений, включая 95 станций массового замера трещиноватости).

Основные геофизические материалы были получены лично (эманационная съемка) и под непосредственным руководством (магниторазведка, СЭП) автора диссертации, который также принял участие в сборе и обработке структурно-геологической информации по ключевым пересечениям каждой из исследованных разломных зон. Основная часть использованной в работе информации по разломам и трещинам составляет банк структурно-геологических наблюдений, созданный сотрудниками лаборатории тектонофизики в течение многолетних полевых исследований на территории Прибайкалья. В связи с этим автор выражает глубокую благодарность коллегам по лаборатории, а также сотрудникам ООО «Байкальская геофизическая партия» Поспееву А.В., Агафонову Ю.А., Компанеец С.В., Колесникову Ф.П. и работникам кафедры геофизики ЧитГУ Авгулевичу Д.Л. и Оленченко В.В., материалы которых по методам ВЭЗ, ЗСБ и ДЭП использовались при анализе структурной ситуации на некоторых участках.

Защищаемые положения:

1. Разломные зоны Приольхонья и Южного Приангарья отчетливо выделяются в эманационном поле, причем радон отражает их существенно более глубокое

строение по сравнению с тором. Главным структурным фактором пространственной изменчивости эманационного поля Западного Прибайкалья является неравномерная проницаемость разломных зон для газов, обусловленная различием степени современной нарушенности горного массива разноранговыми разрывами.

2. Строение эманационной аномалии характеризуется повышением радоновой активности от периферии к осевой части, на фоне которого выделяется серия локальных максимумов и минимумов, соответствующих положению отдельных сместителей с проницаемыми или непроницаемыми для газа тектонитами. Поперечный размер радоновой аномалии, связанной с разломом, пропорционален ширине зоны повышенной трещиноватости, сформировавшейся при перемещении его крыльев.

3. Радоновая активность разломных зон при прочих равных условиях зависит от их тектонической активности, размера и морфогенетического типа. На уровне главных тенденций она выше у рифтовых дизъюнктивов по сравнению с платформенными, больше у сбросов по отношению к сдвигам, возрастает с увеличением масштабного ранга и степени тектонической активности разлома, которая является наиболее значимым геодинамическим фактором формирования эманационного поля.

Новизна исследования определяется, с одной стороны, недостаточной изученностью эманационных полей Западного Прибайкалья и Южного Приангарья, а с другой, – современным пониманием объектов исследования (т.е. разломных зон), как широких областей проявления парагенетически связанных разрывов и трещиноватости.

Впервые для большой группы разнотипных и разноранговых дизъюнктивов получены инструментальные оценки объемной активности радона, характеризующие центральную часть Байкальского рифта и смежную территорию Сибирской платформы. Установлено, что сейсмоактивный регион в среднем отличается большими концентрациями газов в подпочвенном слое. В то же время высокие значения ОАР у отдельных платформенных разломов (в совокупности с их выраженностью в позднечетвертичных отложениях разрывами со смещениями в первые десятки сантиметров) свидетельствуют о локальном проявлении высокоактивных блоковых подвижек по краю древнего кратона, генетически связанных с процессом деструкции в смежном рифте.

На основе установленных закономерностей проявления в эманационных полях внутренней структуры дизъюнктивов Приольхонья и Южного Приангарья предложена обобщенная модель поля радона над разломом земной коры.

Показано, что ввиду существенной зависимости абсолютных значений объемной активности радона от нетектонических факторов местного значения (интенсивность первичного излучения, тип геологического разреза и др.) для эманационных исследований разломов Восточной Сибири эффективен безразмерный параметр – показатель радоновой активности (K_Q), представляющий отношение максимальной величины ОАР в разломной зоне к ее минимальному значению в крыльях. При прочих равных условиях K_Q возрастает с увеличением

масштабного ранга и степени тектонической активности разлома. Он больше у сбросов по сравнению со сдвигами.

На основе сопоставления эманационных и электромагнитных полей над одними и теми же дизъюнктивами установлено, что наиболее информативным методом картирования структуры активных разломных зон Приольхонья является радоновая съемка. Ее данные с меньшими временными затратами позволяют выделять отдельные сместители и общие границы разломной зоны, ширина которой, согласно результатам количественного анализа, меньше поперечного размера соответствующей аномалии объемной активности радона в ≈ 1.4 раза.

Практическая значимость. Отработана методика экспрессной радон-тороновой съемки приборами типа РРА для условий Восточной Сибири. В совокупности с представленными в работе закономерностями проявления структуры разломов в эманационном поле эта методика может быть использована в качестве эффективной основы комплексных прикладных исследований в регионе: нахождения скрытых разломов, структурного картирования, поиска и разведки рудных месторождений, прогнозирования землетрясений и строительных изысканий.

Сведения о выявленных в результате данного исследования аномальных по концентрации радона зон, ассоциирующихся с высокопроницаемыми разломами земной коры, уже сейчас могут быть использованы в качестве важной информации для строительства и эксплуатации объектов различной экономической значимости. В Приольхонье, как активно развивающемся центре проведения курортно-туристических мероприятий, наиболее активные в плане эманаций радона участки разломных зон должны быть рассмотрены на предмет безопасности их использования в качестве площадок для размещения пансионатов, туристических баз и кемпингов. Результаты исследования радоновой и тектонической активности платформенных разломов в Южном Приангарье свидетельствуют о необходимости пересмотра статуса этой экономически значимой территории в отношении опасности со стороны разломообразования и сопровождающей его сейсмичности.

Апробация работы. Основные результаты работ докладывались на «Научно-технической конференции факультета геологии, геоинформатики и геоэкологии» (г. Иркутск, 2006 г.), «XXII Всероссийской молодежной конференции» (г. Иркутск, 2007 г.), «Всероссийской конференции по сейсмологии и геодинамике Центральной и Восточной Азии» (г. Иркутск, 2007 г.), «Всероссийской конференции к 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (г. Москва, 2008 г.), «Всероссийском совещании: Разломообразование и сейсмичность в литосфере», (г. Иркутск, 2009 г.), «VIII Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике» (г. Иркутск, 2009 г.), а также неоднократно обсуждались на семинарах лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. Исследования по теме диссертации поддержаны РФФИ (проект 07-05-00061_а; 08-05-98062_сибирь) и СО РАН (проект ОНЗ-6.13; программа ОНЗ-7, проекты № 6, 7).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ (в т.ч. 6 – в журналах из списка ВАК), 2 статьи приняты к печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложена на 128 страницах, содержит 57 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 158 наименований.

Автор благодарен научному руководителю д.г.-м.н. Семинскому К.Ж. за постановку темы и общее руководство исследованиями, к.г.-м.н. Черемных А.В. и Гладкову А.С. – за помощь в сборе и интерпретации структурно-геологических материалов, д.г.-м.н. Кожевникову Н.О. – за помощь в сборе и интерпретации геофизических материалов, Черемных А.С. и Когуту Е.И. за помощь в проведении электроразведочных и магниторазведочных работ, к.г.-м.н. Черных Е.Н. за ценные советы и редакционные замечания, а также всем сотрудникам лаб. тектонофизики ИЗК СО РАН, оказавшим помощь в подготовке диссертации.

Глава 1. Введение в проблематику

В данной главе представлены общие сведения о радоне, его параметрических характеристиках и результатах исследований предшественников, занимавшихся анализом радоновой активности разрывных нарушений земной коры. Кроме того, акцентируется внимание на том, что разломы имеют специфическое строение как в поперечном, так и в продольном направлениях. Только в одной из статей предшественников [Коваль, Удодов, Саньков и др., 2006], которые изучали поле радона, под разломом подразумевается довольно широкая область, однако отражение ее строения в поле ОАР не рассмотрено. В связи с этим актуальным является изучение проявлений разломных зон в эманациях радона с учетом зональности их строения, активности, ранга, морфогенетического типа и угла наклона сместителя, т.е. факторов, которые целенаправленно не исследовались предшественниками.

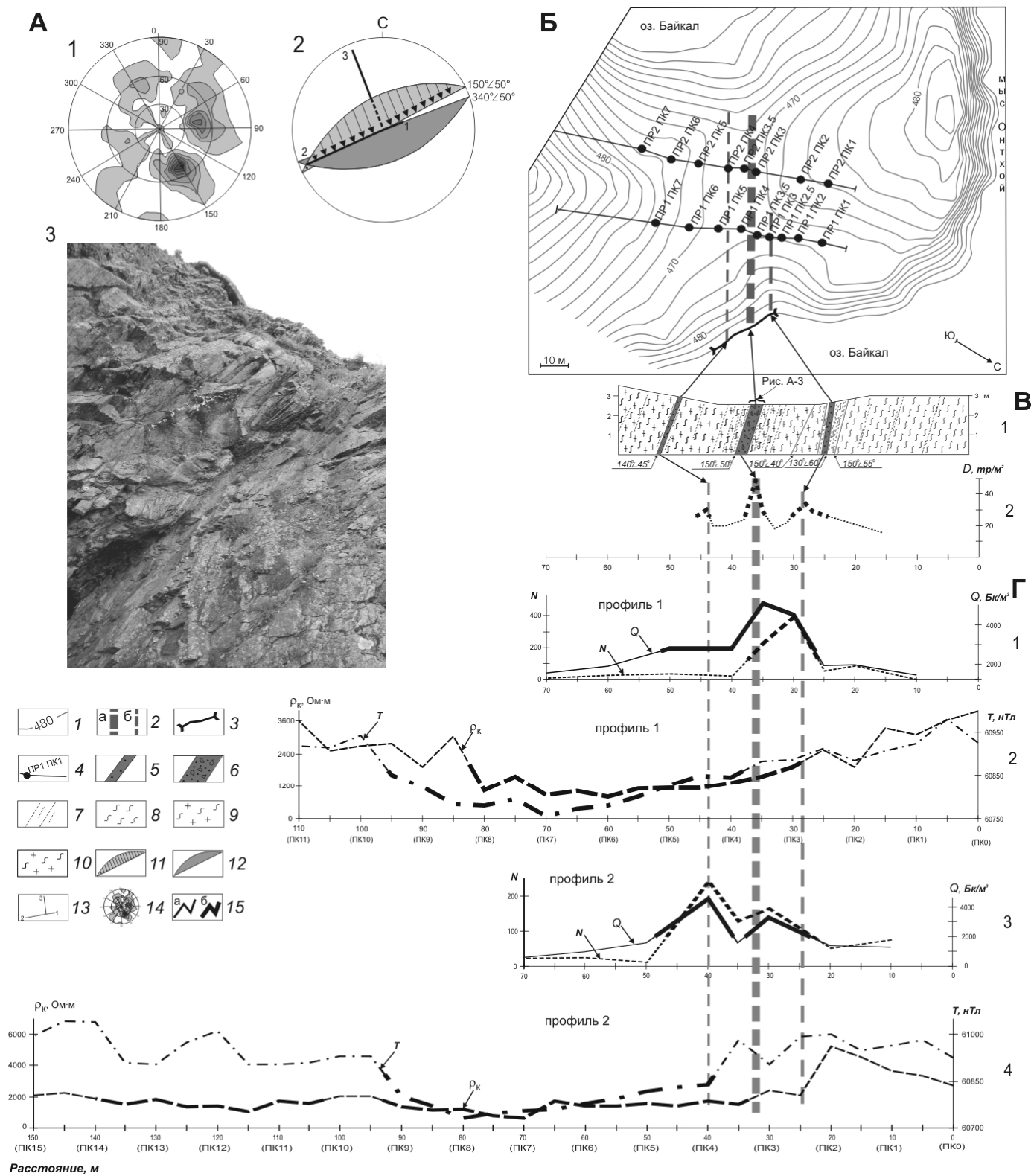
Глава 2. Объекты исследования

Глава посвящена рассмотрению географического положения района исследования и его геолого-геоморфологического строения, а также – характеристике проявления изучаемых разломных зон в электромагнитных полях. Работы проводились в двух существенно отличающихся тектонической активностью регионах: платформенного и горно-складчатого. Первый из них охватил левобережье р. Ангары от ее истока до г. Зимы, – второй расположен в центральной части Байкальской рифтовой зоны (Приольхонье). Платформенные участки локализовались в пределах крупных дизъюнктивных зон (например, Окино-Катангская) или охватывали более мелкие разломные структуры. В Приольхонье они выбирались так, чтобы охарактеризовать главные дизъюнктивы, образующие «клавишную структуру» северо-западного плеча Байкальского рифта: зоны Приморского, Кучелгинского, Улирбинского, Куркутского, Тутайского и более мелких разломов северо-восточного простирания представляют борта различных по размерам впадин, сформировавшихся при рифтогенезе.

Каждый из разломных объектов исследован комплексом методов в результате проведения профильных или площадных работ. Фактурную основу для анализа составили геоморфологические (топоплан или гипсометрические профили) и структурно-геологические (карта или разрез, фотодокументация разломных

смещителей, графики вариаций плотности трещин, круговые диаграммы трещиноватости и полей напряжений) материалы, а также результаты радон-тороновой съемки, магнито- и электроразведки в виде графиков или карт вариаций соответствующих геофизических параметров, построенных для одних и тех же профилей или участков. Рис. 1 иллюстрируют те особенности выраженности разломных зон в разнотипных геофизических полях, которые являются наиболее общими для изученных в Приольхонье дизъюнктивов. Выделение связанных с разломами аномалий каждого поля независимо от его природы осуществлялось по единой методике: аномальная зона трассировалась величинами, большими или меньшими (в полях разного типа), чем среднее по выборке (обычно – по профилю) значение рассматриваемого параметра.

В итоге обработки материалов электро- и магниторазведки на многих участках было уточнено положение скрытых под наносами разломных смещителей, определены границы зон их влияния в трещиноватости, получена дополнительная информация о параметрах тектонических нарушений.



Расстояние, м

Рис. 2. Результаты структурно-геологических, геоморфологических и геофизических исследований разломной на мысе Онтхой в Приольхонье.

А. Диаграмма трещиноватости (1), решение о поле напряжений (2) и фотография коренного выхода (3), в котором обнажается главный сместитель разломной зоны м. Онтхой.

Б. Расположение геофизических профилей на схеме горизонталей рельефа, построенной для участка исследований при помощи GPS-приемника с шагом между замерами 10 м (данные Е.И. Когута).

В. Структурно-геологический разрез (1) и график вариаций плотности трещин в 1 m^2 коренного выхода (2). Г. Объемная активности радона (Q), количество распадов торона (N),

кажущееся удельное электрическое сопротивление (ρ_k) и полный вектор магнитной индукции (T), измеренные вдоль профилей 1 (Г, 1-2) и 2 (Г, 3-4).

1 – горизонтали рельефа; 2 – главный (а) и второстепенные (б) сместители разломной зоны; 3 – линия структурно-геологических наблюдений вдоль берегового обрыва; 4 – линии геофизических профилей (индексация и положение пикетов показаны только для эманационной съемки); 5-6 – второстепенные (5) и главный (6) сместители, представленные разнотипной брекчией дробления; 7 – интенсивно трещиноватые участки коренного выхода; 8 – гнейсы; 9 – гранито-гнейсы; 10 – древние милониты; 11-12 – плоскости сопряженных сколов, по которым определялись оси напряжений и направление скольжения (стрелки) по главному сместителю разломной зоны; 13 – оси напряжений (1 – ось сжатия, 2 – промежуточная, 3 – ось растяжения); 14 – диаграмма трещиноватости (100 замеров; уровни изолиний – 0,5-1,5-2,5-3,5-4,5-5,5-6,5-7,5%); 15 – участки графиков с величинами соответствующего параметра, меньшими (а) и большими (б) среднего арифметического значения по профилю.

Глава 3. Методика проведения измерений

В главе дано описание приборов и методов геофизических измерений. Основной задачей, стоявшей перед началом исследований, была разработка оптимальной методики эманационной съемки. Предложенная в комплекте с приборами схема измерений [Методика..., 2004] не удовлетворяла требованиям, необходимым для выполнения цели исследования, так как при ее реализации: 1) требуется продолжительное (не менее 12 часов) время экспозиции пробоотборника в шпуре; 2) невозможно учесть степень разубоживания проб при их извлечении из почвы в разных погодных условиях (ветер, осадки и др.); 3) объем пробоотборника недостаточен для определения небольших концентраций радона. В связи с этим, учитывая опыт предыдущих исследователей, она была разработана специально для применения в условиях Приольхонья и Южного Приангарья [Бобров, 2008]. Отбор проб осуществлялся с 10 до 20 часов в сухую погоду с глубины 0.5 м. При измерениях по данной методике влияние метеорологических факторов незначительно. Использование безразмерного параметра – показателя радоновой активности дает возможность с одной стороны исключить влияние целого ряда мешающих факторов, а с другой – дает возможность сравнивать разломные зоны в различных регионах.

Глава 4. Выделение разломных зон в эманационных полях

Как показал анализ литературных данных, главной задачей эманационных работ предшественников картирование разломных сместителей или районирование территорий по радоноопасности. При этом подразумевалось, что высокая ОАР обусловлена наличием зон дробления горных пород. Так как ранее не проводилась оценка связи параметра нарушенности пород (плотность трещин на квадратный метр) с ОАР, это стало одной из задач данного исследования в приложении к конкретной территории (Приольхонье и Южное Приангарье).

В изученных регионах границы разломной зоны, выделенные по аномальным значениям концентрации радона, примерно совпадают с границами, определенными по параметру плотности трещин. При этом коэффициент корреляции ОАР с плотностью трещин на некоторых профилях достигает 0.72. Однако подобная картина наблюдается не всегда. Есть участки, где границы, выявленные по аномалии ОАР, не совпадают с границами, установленными по плотности трещин.

Вследствие таких различий для отдельных профилей установлен низкий коэффициент корреляции, свидетельствующий об отсутствии зависимости между анализируемыми параметрами. Во-первых, это связано с несоответствием детальности структурной и радоновой съемок: сеть эманационных наблюдений была дискретной, а структурные наблюдения, как правило, – непрерывны. В результате некоторые графики вариаций ОАР недостаточно точно отражают реальную картину нарушенности пород. Во-вторых, на ряде участков имела место пространственная удаленность профилей структурной и радоновой съемок, т.е. несовпадение точек наблюдений ОАР с точками замеров плотности трещин. Для расчета корреляционных соотношений использовалось интерполированное значение плотности трещин между ближайшими замерами, что значительно искажает картину нарушенности пород: иногда в пределах первых метров или даже десятков сантиметров наблюдаются локальные участки с высокой плотностью трещин.

В целом коэффициент корреляции, равный 0.71, является значимым для исходного массива абсолютных значений ОАР и плотности трещин в зоне разлома. Характер полученной зависимости свидетельствует, что с увеличением плотности трещин увеличивается ОАР. Таким образом, интерпретация полученных материалов подтверждает на количественном уровне обусловленность газовых эманаций степенью нарушенности горного массива разрывами.

При анализе графиков ОАР и количества распадов торона было обнаружено, что, как правило, их максимальные значения пространственно совпадают. На некоторых профилях графики ОАР и количества распадов торона подобны по форме, что подтверждается тесной связью между параметрами (коэффициент корреляции – 0.92). Однако такая картина наблюдается не на всех участках. В некоторых случаях пики ОАР и количества распадов торона смещены друг относительно друга. Подобная ситуация отмечалась ранее при изучении некоторых крупных разломов Прибайкалья [Коваль, Удодов, Саньков и др., 2006]. Учитывая, что характер эманаций в обоих случаях определяется проницаемостью субстрата разломной зоны, логично предположить, что несовпадение пространственного распределения эманаций связано с различием периодов полураспада радона ($T_{1/2} = 3.8$ сут) и торона ($T_{1/2} = 54.5$ сек). Таким образом, в поле торона иногда обнаруживаются те же закономерности, что и в распределении ОАР, но часто они затушевываются из-за изменения характера нарушенности в близповерхностной части разломной зоны, которую отражает торон в связи с малой глубинностью.

В целом детальное сопоставление результатов тектонофизических и эманационных исследований для каждого природного объекта в отдельности и синтез полученного материала показали, что разломные зоны Приольхонья и Южного Приангарья отчетливо выделяются в полях радона и торона. Пространственное несовпадение их аномалий связано с малым периодом полураспада и, соответственно, небольшой глубинностью эманаций последнего. Проанализированный фактический материал подтвердил наличие прямой связи ОАР с трещиноватостью массива горных пород на изученных природных объектах, поэтому радоновая съемка может использоваться в качестве эффективного метода изучения внутренней структуры разломных зон земной коры.

Глава 5. Отражение главных закономерностей внутренней структуры разломных зон в поле радона

Новизна исследований, представленных в данной главе, заключается в акцентировании внимания на изучении внутренней структуры разломных зон Приольхонья и Южного Приангарья по данным анализа распределений величины ОАР, которая, согласно установленным данным, прямо связана с плотностью трещин в горном массиве.

Согласно полученным данным, в большинстве случаев поле радона над разломной зоной характеризуется высокой изменчивостью, что отражает наличие главного сместителя, а также разрывов 2-го порядка, локализующихся у его изгибов. На некоторых участках тектонические нарушения состоят из серии мелких подзон, каждая из которых отмечается максимумом ОАР при условии, что детальность работ позволяет выделить соответствующие им отдельные пики. Установлено, что форма поля ОАР различна над разломами с разным типом тектонита: разломная брекчия выделяется максимумом, а глина трения – минимумом. Этот минимум иногда является самым низким на профиле и соседствует с двумя максимумами по краям, что обуславливает «седловидную» форму эманационной аномалии.

Еще одной особенностью проявления структуры разломной зоны в поле ОАР является асимметрия пиков, зафиксированная на некоторых объектах со сбросовым типом подвижек. Она выражается растянутостью аномалии по направлению падения главного сместителя. Это объясняется тем, что висячее крыло при тектонических подвижках разрушается сильнее и, таким образом, характеризуется большей проницаемостью для газов, чем лежащее [Семинский, Гладков, Лунина и др., 2005].

Сравнение на количественном уровне истинной ширины разлома (по структурным данным) с шириной разлома, найденной по эманационному методу, позволило установить, что отношение между этими параметрами в среднем составляет ≈ 0.73 . При этом коэффициент корреляции между шириной зоны, найденной по графикам ОАР и оценкой, полученной по геолого-структурным данным, равен 0.93 является значимым.

В одной из немногих работ [Коваль, Удодов, Саньков и др., 2006] измерения ОАР проводились не только вкрест, но и вдоль простирания разломных зон. При этом были обнаружены вариации эманационного поля радона. Наши данные подтверждают результаты этих наблюдений на большем объеме фактического материала.

Таким образом, проведенная интерпретация полученных для платформы и рифта материалов не дает основания для сомнений, что радоновая активность разломных зон определяется степенью нарушенности субстрата в их пределах. Это позволяет представить результаты эманационных исследований в виде обобщенного (не учитывающего осложняющие неструктурные факторы эманаций) разреза разломной зоны, отражающего закономерности ее радоновой активности в тесной взаимосвязи с особенностями внутреннего строения (рис. 2).

Разломная зона выделяется в поле радона в виде аномалии, поперечные размеры которой превышают ширину полосы повышенной плотности открытых трещин, по-видимому, за счет ее обрамления по периферии участками интенсивного проявления микротрещиноватости, также проницаемой для газа. Форма аномалии

характеризуется асимметрией, выражающейся расширением в более нарушенном разрывах висячем крыле. На фоне общего увеличения значений объемной активности радона от краевых частей к оси имеют место существенные флуктуации параметра, положение и размер которых обусловлены наличием сместителей разломной зоны, представленных тектонитами. При переработке материала крыльев до глинки эти локальные аномалии выражены минимумами, в случае наличия пронизанной микротрещинами разломной брекчии – максимумами.

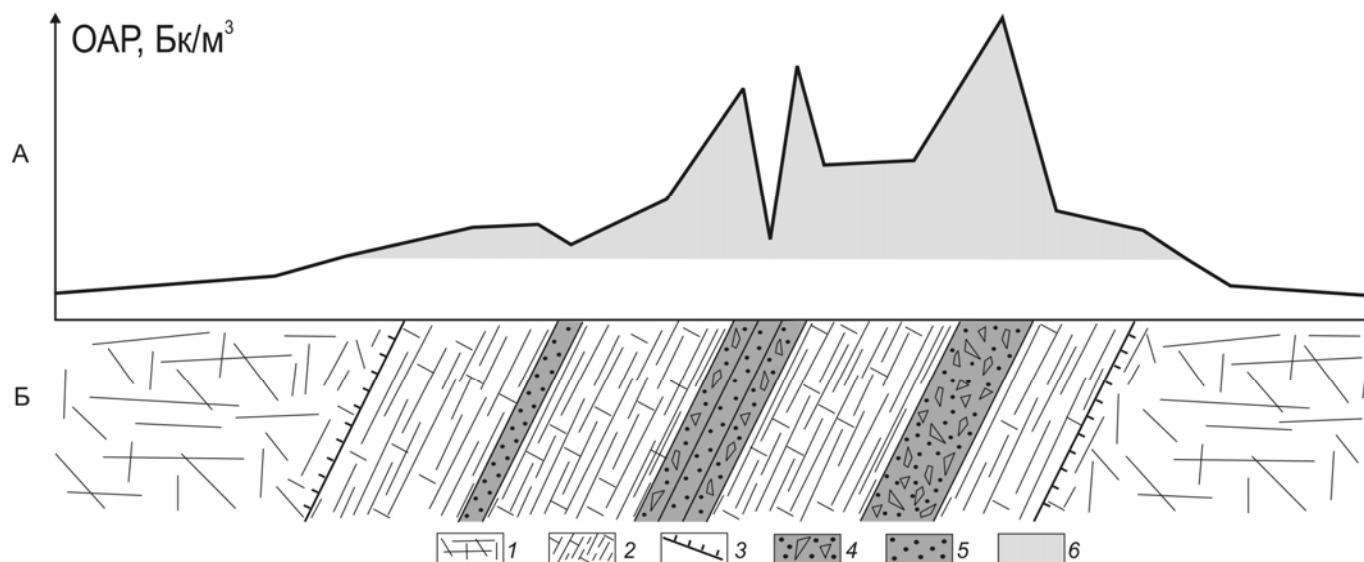


Рис. 2. Модель распределения поля объемной активности радона (ОАР) над условной разломной зоной.

А. График концентрации ОАР в подпочвенном воздухе над разломной зоной.

Б. Геологический разрез, отражающий структуру разломной зоны: 1 – хаотическая трещиноватость вмещающих пород, 2 – зона сопутствующей трещиноватости и разрывов второго порядка, 3 – границы разломной зоны, 4 – тектонит, представленный разломной брекчией, 5 – тектонит, представленный глиной трения, 6 – область графика, для которой величина ОАР больше среднеарифметического значения по профилю.

Глава 6. Связь показателя радоновой активности (K_Q) с тектонической активностью, масштабным рангом и морфогенетическим типом разломных зон

Существенные вариации абсолютных значений параметра ОАР в разломных зонах обусловлены различными факторами, как связанными с дизъюнктивом (активность, характер внутреннего строения), так и обусловленными региональной спецификой (тип геологического разреза и др.), что создает определенные трудности для сопоставления объектов, располагающихся на разных территориях. В связи с этим для сравнения радоновой активности разломов разного типа, ранга и тектонической активности был использован показатель, принадлежащий к группе относительных величин, обычно используемых для сравнения разнотипных объектов. Показатель радоновой активности (K_Q) в нашем случае вычислялся как отношение максимального из ассоциирующихся с дизъюнктивом значений параметра ОАР к его наименьшей величине, имеющей место в любом из крыльев сразу после аномального участка, обусловленного наличием разломной зоны. Высокие значения K_Q свидетельствуют о контрастности связанной с разломом аномалии, а низкие – о ее незначительном отличии от величины ОАР в крыльях.

Известно, что длина разлома функционально связана с его шириной [Ружич, 1972; Mawer, 1987; Шерман, Семинский, Борняков и др., 1991]. В связи с этим, при ранжировании дизъюнктивов можно воспользоваться поперечным размером зоны. Для ранжирования изученных дизъюнктивов был построен график зависимости ширины зон, установленной по геолого-структурным методам, к ширине, полученной по эманациям радона (рис. 3). Согласно рисунку, все разломные зоны по соотношению параметров были разделены на 4 масштабных ранга.

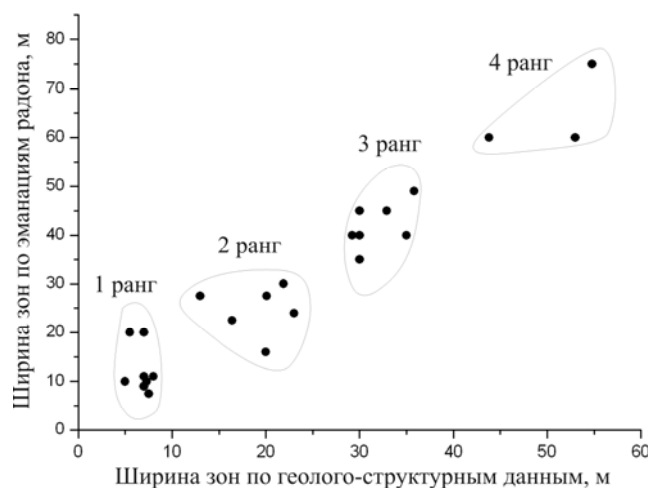


Рис. 3. График зависимости ширины разломной зоны, определенной по геолого-структурным данным, к ширине, полученной при изучении эманаций радона.

Морфогенетический тип дизъюнктивов определялся по характеру наиболее значимых в кайнозой подвижек. С этой целью использовались как прямые наблюдения за смещением маркеров, так и специальные методы, основанные на тектонофизическом анализе статистических замеров трещин и разрывов вблизи разломных сместителей [Семинский, Гладков, Лунина и др., 2005]. В целом объекты исследования делятся на две большие группы, для одной из которых (11 шт.) в кайнозой доминировали сдвиговые перемещения, а для другой (17 шт.) – подвижки по падению (в подавляющем большинстве сбросового типа).

Тектоническая активность объектов исследования рассматривалась отдельно для платформенных и рифтовых разломных зон ввиду их приуроченности к участкам земной коры, отличающимся по интенсивности и условиям проявления блоковых перемещений. Деление платформенных разломов по тектонической активности проведено на основе применения единого экспертного подхода, рекомендуемого при изысканиях под строительство трубопроводов [Овсяченко, 2005] при отсутствии количественных определений скоростей перемещения крыльев дизъюнктивов. Полученные результаты для наиболее активных разломов подтверждены собственными оценками на основе комплексного анализа геофизических, геоморфологических и структурно-геологических (в т.ч. документация канав) материалов. Предпринятый для платформенных разломов подход не мог быть применен для приольхонских объектов эманационной съемки, т.к. специфика их проявления (например, наличие тектонитов в коренных породах для всех разломов, с одной стороны, и локальное развитие четвертичных отложений, – с другой) не позволила равноценно освидетельствовать большинство

из оцениваемых признаков. Вследствие этого, разделение приольхонских объектов по тектонической активности носило приближенный характер (наличие сейсмодислокаций; принадлежность к разным этапам кайнозойской активизации и др.).

Для выявления связи показателя радоновой активности с тектонической активностью разломов была составлена гистограмма распределения соответствующих им значений K_Q (рис. 4). Основная часть объектов расположена в пределах среднестатистического отклонения от среднего показателя радоновой активности (от 1.5 до 7.5). При этом выделились пять разломов ($K_Q > 11.5$), четыре из которых вошли в группу с высокой степенью тектонической активности, определенной независимыми методами (см. выше). Это свидетельствует о том, именно этот фактор в значительной мере определяет радоновую активность изученных разломных зон.

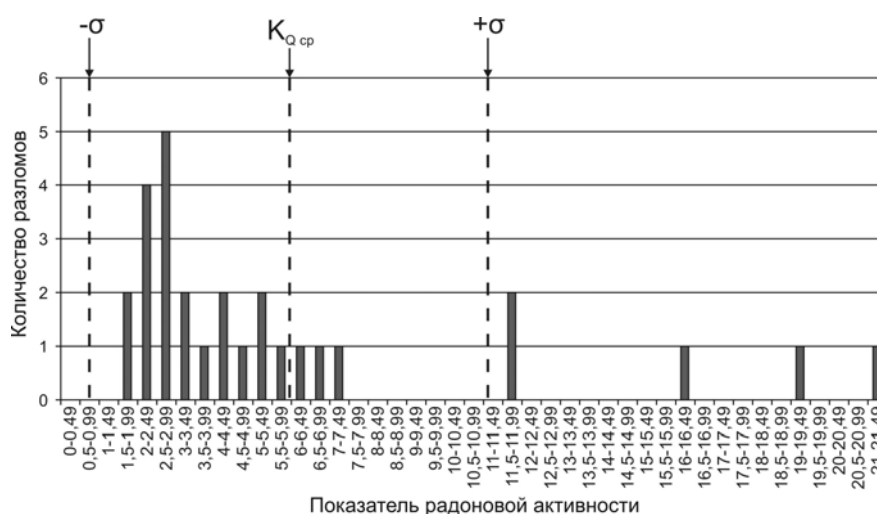


Рис. 4. Гистограмма распределения изученных разломов по величинам показателя радоновой активности.

Сопоставление K_Q для разнотипных и разноранговых разломов Приольхонья и Южного Приангарья проводилось посредством определения его средних значений по отдельным выборкам, которым соответствовали группы дизъюнктивов, различающиеся по анализируемым характеристикам. Вначале выборки для анализа влияния тектонической активности, морфогенезиса и ранга разлома делались из массива данных по всем объектам, а затем – только для тех из них, которым соответствовали однотипные оценки по двум другим (не анализируемым в данной выборке) признакам (рис. 5).

Как видно из графиков, у разломов с большей степенью тектонической активности K_Q выше (рис. 5, А, Г). Во всех случаях K_Q для высоко активных разломных зон в несколько раз превышает величины данного параметра у дизъюнктивов с низкой и средней тектонической активностью. В рамках двух последних групп по совокупности данных также можно сделать вывод об увеличении значений эманационной характеристики с возрастанием тектонической активности разлома. Его справедливость определяется не столько небольшим увеличением относительного показателя K_Q при переходе от первой ко второй

группе разломов, сколько существенно большими значениями ОАР у разломов средней активности, причем только в этом случае анализ абсолютных значений объемной активности радона свидетельствует о наличии устойчивой тенденции.

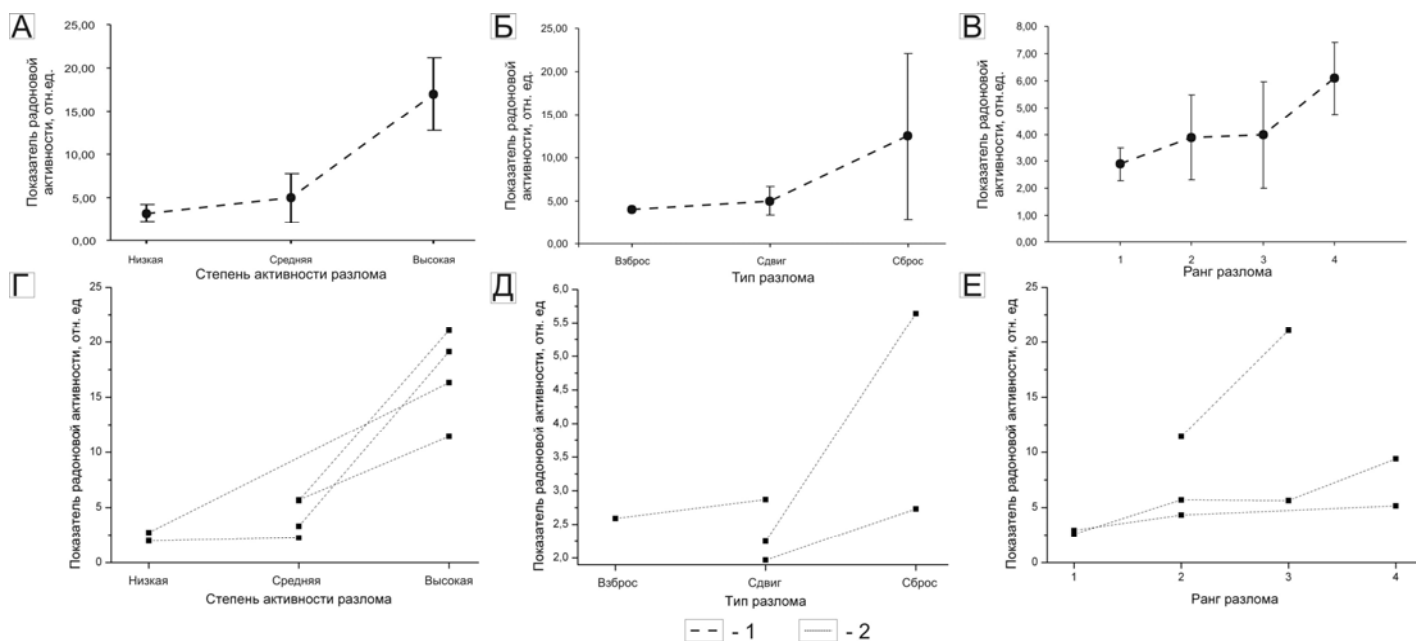


Рис. 5. Графики, иллюстрирующие основные тенденции изменений показателя радоновой активности у разломов, отличающихся степенью тектонической активности (А, Г), морфогенетическим типом (Б, Д), масштабным рангом (В, Е). Линии получены: 1 – для всех разломов; 2 – для разломов, характеристики которых, за исключением анализируемых, совпадают.

Из графика распределения средних значений показателя K_Q (рис. 5, Б), видно, что сбросы характеризуются более высокими значениями, чем сдвиги. Существенный разброс значений для разломов сбросового типа объясняется наличием в группе дизъюнктивов как с низкой, так и с высокой степенью тектонической активности. Из рис. 5, Д, при составлении которого исключено влияние данного фактора, видна отчетливая тенденция увеличения показателя радоновой активности от разломов взбросового типа к сдвиговым и далее – к сбросовым. Ее справедливость согласуется с данными В.И.Уткина [Уткин, 2000а], исследовавшего зависимость ОАР от напряженного состояния массива горных пород. Таким образом, при растяжении, и, следовательно, преобладании сбросов, наблюдается повышение концентрации радона, а при сжатии – уменьшение. Участок со взбросовым типом подвижек, хотя и представлен одной разломной зоной, не противоречит установленной тенденции.

Распределение среднего показателя K_Q , подсчитанного для каждой из групп рангов разломов, отображено на рис. 5, Д. Из анализа были исключены разломные зоны с высокой степенью тектонической активности, так как они, как правило, характеризуются в поле концентрации радона довольно узкими пиками с высокими значениями ОАР. Это приводит к росту показателя K_Q , что в большей степени обусловлено тектонической активностью дизъюнктива, чем рангом структуры. На данном графике (рис. 5, Д) видно, что увеличение ранга дизъюнктива приводит к росту показателя K_Q . Разломы первого и четвертого рангов хорошо разделяются по среднестатистическим отклонениям от среднего в группе. Дизъюнктивы второго и

третьего ранга имеют близкие значения, что инициировало построение графика (рис. 5, Е). Из-за неравноценного вклада в «чистоту» выборки привнесенной дизъюнктивными, расположенными на платформе (характеризуемыми ранними стадиями развития и имеющими более широкие зоны повышенной трещиноватости, чем разломы более поздних стадий в рифте), приангарские объекты из анализа были исключены. Из графика (рис. 5, Е) видно, что увеличение ранга разлома сопровождается повышением показателя радоновой активности.

Анализ рифтовых и платформенных объектов исследования показал, что Приольхонье в целом характеризуется более высокими показателями радоновой активности. При этом оценка тектонической активности дизъюнктивов на базе определенных для каждого из них величин K_Q отчетливо согласуется с имеющимися данными по современной геодинамике платформенного и рифтового регионов.

Таким образом, радоновая активность разломных зон при прочих равных условиях зависит от их тектонической активности, размера и морфогенетического типа. На уровне главных тенденций она выше у рифтовых дизъюнктивов по сравнению с платформенными, больше у сбросов по отношению к сдвигам, возрастает с увеличением масштабного ранга и степени тектонической активности разлома. Последняя характеристика является наиболее значимым геодинамическим фактором формирования эманационного поля. Это открывает возможность посредством проведения экспрессной радоновой съемки разделять разломы по степени тектонической активности на количественной основе, причем перекрытие их сместителей осадками не является препятствием для проведения исследований. В отличие от других параметров эманаций относительный показатель K_Q позволяет сравнивать объекты из существенно разных по геологии и климату регионов. Однако при анализе данных должны учитываться ранг разлома и его морфогенетический тип, которые также влияют на абсолютные значения ОАР.

Заключение

Тема диссертации раскрыта на основе анализа большого фактического материала, полученного в результате применения в Приольхонье и Южном Приангарье комплекса тектоно- и геофизических методов для исследования разнотипных и разноранговых разломных зон. В его состав вошли структурно-геологические работы с применением мобильных GPS и использованием результатов дешифрирования космоснимков, эманационная съемка, электроразведка методами ВЭЗ, ЗСБ, ДЭП и СЭП, а также магниторазведка.

Комплексный анализ полученных результатов позволил сделать следующие основные выводы, характеризующие радоновую активность разломных зон центральной части Байкальского рифта и смежной платформенной территории.

1. Объемная активность радона (ОАР) в разломных зонах Приольхонья и Южного Приангарья изменяется от ≈ 1500 до ≈ 60300 Бк/м³, причем для платформенной территории она в целом ниже, чем для рифта.

2. Для разломных зон Приольхонья и Южного Приангарья характерна прямая зависимость ОАР от плотности трещин горных пород, что позволяет использовать радоновую съемку в качестве эффективного инструмента исследования внутренней структуры разломных зон земной коры.

3. Разломы Прибайкалья выделяются в эманационном поле в виде широких зон аномальных значений ОАР, поперечные размеры которых в ≈ 1.4 раза больше ширины зоны повышенной трещиноватости, сформировавшейся в результате перемещения крыльев.

4. Показатель радоновой активности (K_Q), представляющий отношение максимального значения ОАР в разломной зоне к минимальной величине данного параметра в крыльях, наиболее эффективен для оценки и сопоставления разнотипных и разноранговых разломных зон по степени их тектонической активности.

5. Разломы разных рангов и морфогенетических типов отличаются по показателю радоновой активности. Величина K_Q больше у сбросов по сравнению со сдвигами и возрастает при увеличении поперечных размеров дизъюнктива.

6. В разнотипных геофизических полях выделяются разные структурные элементы разломных зон, что отражается в несовпадении их пространственных флуктуаций. По параметру кажущегося удельного электрического сопротивления дизъюнктивы, как правило, отмечаются понижением значений. По данным магниторазведки они выделяются более неоднозначно и часто представлены градиентной зоной. Наиболее информативным методом картирования структуры активных разломных зон Прибайкалья является эманационная съемка. Ее данные позволяют отчетливо выделять отдельные сместители, границы зон и составляющих их подзон, что имеет важное значение для современной геодинамики в плане выявления закономерностей разломообразования в земной коре.

Практическая значимость проведенных работ заключается в разработке экспрессной методики эманационной съемки, адаптированной для условий Приольхонья и Южного Приангарья. Она открывает новые возможности измерений и анализа объемной активности радона для выделения скрытых разломов, картирования их внутренней структуры, определения ширины зон трещиноватости, оценки степени тектонической активности разломов, а также выявления территорий, опасных для проживания людей, так как высокие дозы облучения радоном и продуктами его распада приводят к повышению риска онкозаболеваемости. Значимость подобных работ для геодинамических реконструкций в регионах с разной тектонической активностью и обнаженностью горных пород не вызывает сомнений, однако их эффективность напрямую связана с результатами дальнейшего изучения поля радона с учетом опыта исследований, представленных в диссертации.

Список работ по теме диссертации

1. **Бобров А.А.** Исследование объемной активности радона в разломных зонах Приольхонья и южного Приангарья: методика и предварительные результаты // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008, Вып. 6 (32), С. 124-129.

2. **Бобров А.А.** Исследования разломов земной коры по эманациям радона: опыт предшественников и организация полевого эксперимента // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований // Сборник избранных трудов научно-технической конференции факультета геологии, геоинформатики и геоэкологии ИрГТУ, Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006, Вып. 6, С. 6-10.

3. **Бобров А.А.** О влиянии метеоусловий на объемную активность радона в почвенном воздухе Приольхонья и Южного Приангарья // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: Материалы Всероссийского совещания (г. Иркутск, 18-21 августа 2009 г.). – В 2-х т. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009, Т. 2, С. 176-178.
4. **Бобров А.А.** Об особенностях влияния метеоусловий на объемную активность радона в некоторых регионах юга Восточной Сибири // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXII Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 24-29 апреля 2007 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007, С. 215-216.
5. **Бобров А.А.** Отражение некоторых особенностей разломных зон Приольхонья и южного Приангарья в эманациях радона // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. – М.: ИФЗ, 2008, Т. 2, С. 18-20.
6. Кожевников Н.О., Семинский К.Ж., **Бобров А.А.**, Авгулевич Д.Л., Оленченко В.В. Первые результаты применения геофизических методов для изучения современной тектоники Приольхонья // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. – М.: ИФЗ, 2008, Т. 2, С. 43-45.
7. Семинский К.Ж., **Бобров А.А.** Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика, 2009, Т. 50, № 8, С. 881-896.
8. Семинский К.Ж., **Бобров А.А.** Сравнительная оценка радоновой активности разнотипных и разноранговых разломов Байкальского рифта и юга Сибирской платформы // ДАН, 2009, Т. 427, № 4, С. 521-525.
9. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Вахромеев А.Г., Черемных А.В., **Бобров А.А.**, Когут Е.И. Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы: особенности проявления на разных масштабных уровнях // Литосфера, 2008, № 4, С. 3-21.
10. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Радзиминович Я.Б., Черемных А.В., **Бобров А.А.** Закономерности проявления активных разломов и сейсмичности на юге Сибирской платформы // Доклады РАН, 2008, Т. 422, № 4, С. 516-521.
11. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Черемных А.В., **Бобров А.А.** Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы совещания. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007, Т. 2, С. 138-143.
12. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Черемных А.В., Радзиминович Я.Б., **Бобров А.А.** Особенности проявления активных разломов на юге Сибирской платформы // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии, 2006, Вып. 5, С. 63-74.
13. Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., **Бобров А.А.**, Оленченко В.В., Авгулевич Д.Л. Структура разломных зон Приольхонья (Байкальский рифт) по данным полевой тектоно- и геофизики // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008, Вып. 7 (33), С. 111-124.
14. Семинский К.Ж., Черемных А.В., **Бобров А.А.**, Кожевников Н.О. Отражение внутренней структуры разломных зон Прибайкалья в геофизических полях // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Материалы XIV международной конференции. Петрозаводск: Карельский научный центр, 2008, 2 часть, С.177-179.
15. Семинский К.Ж., Черемных А.В., **Бобров А.А.**, Кожевников Н.О. Разломные зоны Прибайкалья: внутренняя структура и геофизические поля // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. – М.: ИФЗ, 2008, Т. 2, С. 78-80.