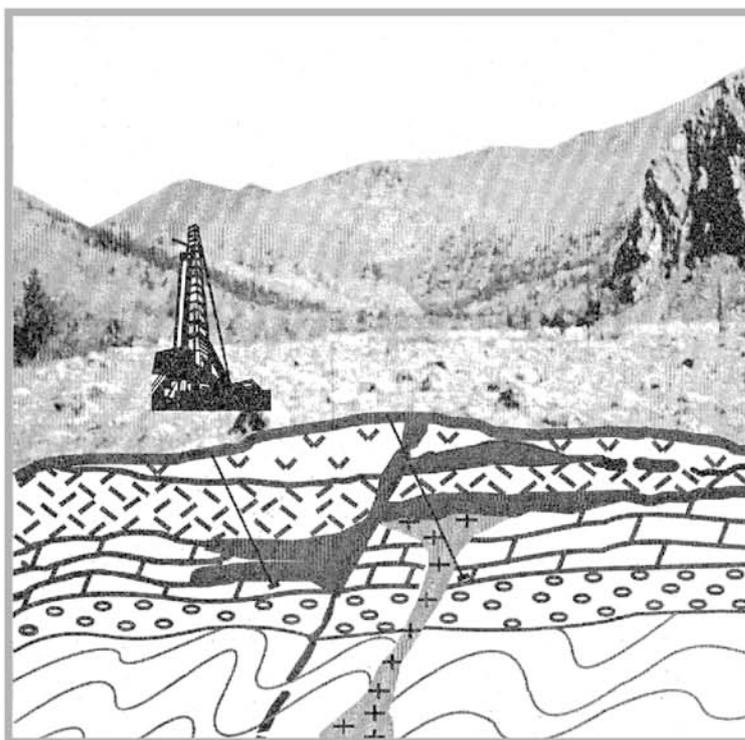


ИЗВЕСТИЯ

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК



**ГЕОЛОГИЯ,
ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**



2008

Выпуск 7 (33)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выпуск 7 (33)



ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского государственного технического университета
2008



**УДК 550: 533 ИЗВЕСТИЯ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О
ЗЕМЛЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК. Геология, поиски и
разведка рудных месторождений. Выпуск 7 (33). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 160 с.**

Опубликованы статьи по металлогении, геологии, геохимии золоторудных узлов и месторождений других полезных ископаемых. Значительное внимание уделено вопросам связи месторождений полезных ископаемых с магматическими формациями, особенностями геотектонического строения регионов. Уделено внимание поисковым предпосылкам и прогнозированию площадей, перспективных на локализацию месторождений алмазов, «жидких» руд редких и редкоземельных металлов, порфириновых полиметаллических руд. освещены отдельные вопросы обработки поисковой и разведочной информации с применением ГИС-технологий и математических методов.

Материалы предназначены для научных работников вузов, НИИ, геологов практиков и студентов. Авторами статей явились научные работники, профессорско-преподавательский состав и аспиранты вузов, НИИ АН и производственных организаций г. Иркутска, Якутска, Читы, Новосибирска, Улан-Батора (Монголия), Ханоя (Вьетнам). Статьи журнала реферируются и рецензируются.

Редакционная коллегия:

Главный редактор – проф. Ж.В. Семинский, действительный член РАЕН, ИрГТУ.
Заместители главного редактора – проф. А.П. Кочнев, член-корр. РАЕН, ИрГТУ;
проф. М.С.Учитель, ИрГТУ.

Члены редколлегии:

проф. В.М. Старостин, действительный член РАЕН, Московский государственный университет; проф. В.Е. Бойцов, действительный член РАЕН, Российский государственный геологоразведочный университет; проф. Р.М. Лобацкая, действительный член РАЕН, ИрГТУ; проф. В.Ю. Фридовский, действительный член РАЕН, Якутский государственный университет; проф. А.Г. Дмитриев, член-корр. РАЕН, ИрГТУ; проф. В.А.Филонюк, член-корр. РАЕН, ИрГТУ; проф. Н.А. Буглов, член-корр. РАЕН, ИрГТУ; проф. А.Н. Иванов, действительный член МАН ПО, член-корр. АН ВШ РФ, ИрГТУ; проф. Ю.В. Лир, Санкт-Петербургский государственный Горный Институт имени Г.В. Плеханова (Горный институт, Технический университет); проф. В.А. Душин, Уральская горно-геологическая академия; проф. А.Ф. Коробейников, Томский политехнический университет; проф. А.И. Трубачев, Читинский государственный университет; проф. Н.А. Макаров, Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, г. Красноярск; проф. И.И. Верхозин, ИрГТУ; Н.В. Родионова, ст. редактор издательства ИрГТУ.

Ответственный редактор выпуска – проф. М.С.Учитель.

Ответственный секретарь – ст. преподаватель М.В. Яхно

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом Иркутского государственного технического университета.

© Иркутский государственный
технический университет, 2008

ТЕКТОНИКА, ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕММОЛОГИЯ

УДК 551.243+550.835.24

К.Ж.Семинский¹, Н.О.Кожевников², А.В.Черемных³, А.А.Бобров⁴, В.В.Оленченко⁵,
Д.Л.Авгулевич⁶

СТРУКТУРА РАЗЛОМНЫХ ЗОН ПРИОЛЬХОНЬЯ (БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ) ПО ДАНЫМ ПОЛЕВОЙ ТЕКТОНОФИЗИКИ И ГЕОФИЗИКИ

Изучены пространственные распределения удельного электрического сопротивления, радона и торона, а также магнитное поле над 17 разломами центральной части Байкальского рифта. Геофизические исследования проводились в комплексе с детальным структурно-геологическим картированием. Установлено, что в геофизических полях различной природы отражаются разные особенности внутренней структуры разломных зон. Это необходимо учитывать при обосновании эффективного комплекса геофизических методов для поисков и разведки рудных месторождений, локализующихся в зонах разломов земной коры. *Ключевые слова:* разломная зона, трещины, радон, торон, электропрофилирование, магнитное поле, Байкальский рифт.

Библиогр. 23 назв. Ил. 4.

¹Семинский Константин Жанович – доктор геол.-минералог. наук, зав. лабораторией тектонофизики Института земной коры СО РАН, 664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, 128, тел.: 42-30-27
Seminsky Konstantin Zhanovich – doctor of geology-mineralogical sciences, head of laboratory tectonophysics. Institute of the Earth's Crust SB RAS. 664033. Irkutsk, Lermontova str., 128, tel. 42-30-27, e-mail: seminsky@crust.irk.ru.

²Кожевников Николай Олегович – доктор геол.-минералог. наук, гл. научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г.Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3, тел.: 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.nsc.ru
Kozhevnikov N.O.) doctor of geology-mineralogical sciences, the main scientific employee. Institute of the oil's geology SB RAS. 630090, Novosibirsk, avenue ack. Koptuga, 3, INGG SO RAN. Tel. 333-28-166 e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.nsc.ru

³Черемных Александр Викторович – кандидат геол.-минералог. наук, снс лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН, 664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, 128
Cheremnikh Aleksandr Viktorovich – SSM of laboratory tectonophysics. Institute of the Earth's Crust SB RAS. 664033. Irkutsk, lermontova str., 128, tel. 42-30-27, e-mail: cherem@crust.irk.ru

⁴Бобров Александр Анатольевич – младший научный сотрудник лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН, 664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, 128, e-mail: alexbob@crust.irk.ru
Bobrov Aleksandr Anatolevich – younger scientific employee of laboratory tectonophysical's. *Institute of the Earth's Crust SB* Irkutsk, lermontova str., 128, tel. 42-30-27, e-mail: alexbob@crust.irk.ru

⁵Оленченко Владимир Владимирович – старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г.Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3
Olenchenko Vlagimir Vlagimirovich – doctor es giolog.-miner. sciences, SSM of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, avenue ack. Koptuga, 3, INGG SO RAN/

⁶Авгулевич Данил Леонидович – кандидат геол.-минералог. наук, доцент Читинского государственного университета, 672039, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, д. 30. e-mail: a_dan@list.ru
Avgulevich Danil Leonidovich – doctor es. giolog.-miner. sciences, docent of Chita State University, : 672039, Chita Aleksandro-Zavodskay, 30. e-mail: a_dan@list.ru

K.Zh. Seminsky, N.O. Kozhevnikov, A.V. Cheremnykh,
A.A. Bobrov, V.V. Olenchenko, D.L. Avgulevich

Structure of the fault zones in Priol'chon'e (Baikal rift) as derived from tectonophysical and geophysical surveys

The paper presents the results of the radon-thoron, magnetic and resistivity surveys over 17 faults in the central part of the Baikal rift. Geophysical measurements were accompanied by detailed tectonophysical survey. It has been found that each specific geophysical field is representative of individual features of a fault zones structure. This should be taken into consideration in deciding on which combination of geophysical methods is most effective in search for ore deposits controlled by fault zones. Key words: fault zones, crack, radon, thoron, electroprofilate, magnetic field, Baikal rift.

Sources 23, illus. 4.

Введение

В тектонофизической систематике рудных полей и месторождений, связанных с разломами [7], под последними понимается не только узкая полоса тектонитов магистрального сместителя, но и существенно большая по размерам область распространения всех генетически связанных с его формированием разрывов 2-го порядка [9, 13]. Структурные подгруппы новой классификации определяются существованием трех главных дизъюнктивных стадий развития разломов – ранней, поздней и стадии полного разрушения, которые существенно отличаются по состоянию представляющих их разрывных сетей. Поэтому одной из ключевых задач поисков и разведки подобных месторождений является детальное картирование структуры рудоконтролирующей разломной зоны. Последняя, кроме традиционно выделяемой полосы тектонитов магистрального сместителя, включает широкие подзоны разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости, располагающиеся в каждом из крыльев. Эффективное решение этой задачи невозможно без привлечения комплекса геофизических методов, позволяющих по аномальным значениям концентрации радона, электрического сопротивления, модуля полного вектора магнитной индукции и других параметров выявлять составляющие разломную зону

разрывные нарушения. Очевидно, выбору оптимального комплекса геофизических методов выявления разломных зон и картирования их внутренней структуры должны предшествовать опытно-методические исследования, подобные тем, которые описаны в данной статье. Их целью было установить специфику отражения в различных физических полях эталонных дизъюнктивов, строение которых детально изучено прямыми структурно-геологическими методами, а проявление в геофизических полях не осложнено влиянием рудного объекта.

В качестве района исследований было выбрано Приольхонье – не скрытая под водами оз. Байкал территория центральной части Байкальского рифта, активно развивающегося в настоящее время в условиях растяжения земной коры. Работы проводились на 10 участках и охватили 17 разломных зон, выбранных таким образом, чтобы среди изученных дизъюнктивов были разломы всех рангов из числа образующих «клавишную структуру» северо-западного плеча Байкальского рифта (рис. 1). При этом объекты исследования – Приморский, Кучелгинский, Улирбинский, Куркутский, Тутаиский и более мелкие разломы северо-восточного простирания – формируют борта различных по размерам впадин, развивающихся при рифтогенезе.

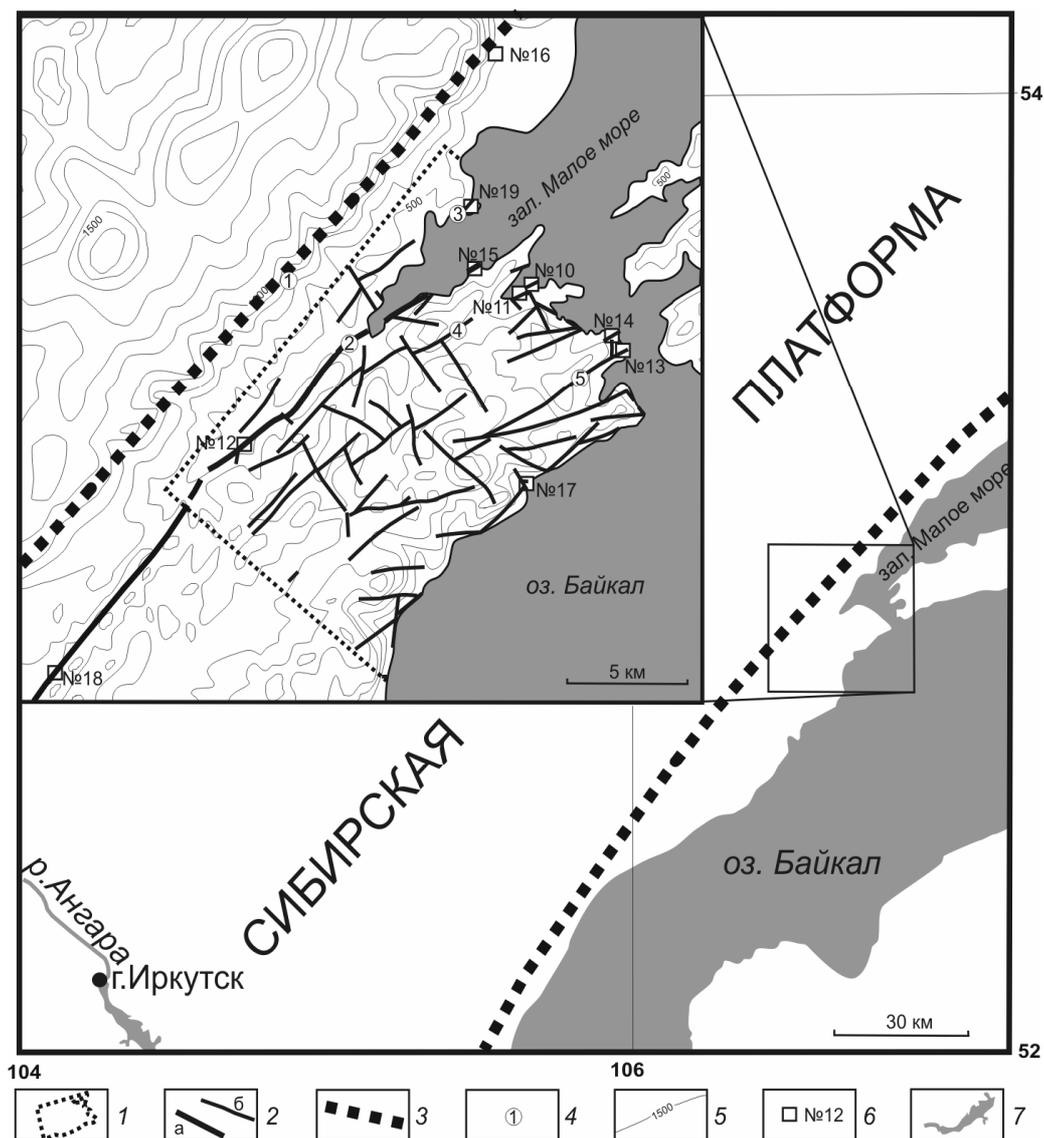


Рис. 1. Обзорная схема разломов Приольхонья (Западное Прибайкалье), изученных геофизическими и структурно-геологическими методами: 1 – участок структурной съемки; 2 – разноранговые (а-б) разломы, выявленные при картировании в Приольхонье [9]; 3 – краевой шов Сибирской платформы; 4 – крупные разломы: 1 – Приморский, 2 – Кучелгинский, 3 – Улирбинский, 4 – Куркутский, 5 – Тутайский; 5 – горизонталы рельефа; 6 – участки детальных исследований разломов и их порядковые номера; 7 – гидросеть

Как известно [4, 6, 16], многие из этих дизъюнктивов заложены задолго до кайнозоя, а затем неоднократно активизировались на различных этапах тектонического развития территории. Одним из интенсивных воздействий на земную кору рассматриваемого региона было палеозойское сжатие в направлении СЗ-ЮВ, когда по северо-восточным разломам произошли масштабные

взбросовые и надвиговые перемещения [1, 9, 10, 11]. Кайнозойская история тектонических подвижек характеризовалась неоднозначностью: на раннеорогенной стадии рифтогенеза доминировали сдвиговые перемещения, а на позднеорогенной – сбросовые [4, 16]. Поэтому среди объектов наших геофизических исследований, кроме перечисленных выше сбросовых дизъюнктивов,

почти половину составляли северо-восточные сдвиги, характеризующиеся на современном этапе развития рифта меньшей активностью по сравнению со сбросами.

Результаты исследований разломов Байкальского рифта геофизическими методами можно разделить на две группы. В первом случае итогом интерпретации является выделение в качестве разломных широких (первые километры) аномальных по физическим свойствам зон, которые вряд ли представляют единый дизъюнктив. В противоположность этому во втором случае поперечные размеры выявленных разломных зон малы (первые метры), т.к. представляют полосы проявления тектонитов у сместителей магистрального типа. Промежуточные оценки ширины разломных зон по геофизическим данным, согласующиеся с принятыми здесь представлениями об объекте исследования, для территории Приольхонья не известны.

Среди зарубежных работ близким к развиваемому нами подходом отличается серия публикаций [14, 15, 18, 21,], в которых принято, что кроме тектонитов к разломной зоне относится и так называемая зона разрушения (damaged zone), выделяющаяся в окружающем горном массиве высокой плотностью разнотипных разрывов и играющая важную роль в миграции рудоносных флюидов. Среди упомянутых публикаций отметим статью С.Е.Шульца и Дж.П.Эванса, в которой представлены исследования одного из сдвигов дизъюнктивной системы Сан-Андреас (США, Калифорния) и показаны разные возможности структурных, геофизических и геохимических методов при выделении внешних границ зоны разрушения.

Таким образом, главными задачами проведенных нами исследований были следующие:

1) Подобрать и реализовать в условиях Приольхонья полевые методы тектонофизики и геофизики, позво-

ляющие изучать физические поля, которые наилучшим образом отражают структуру разломных зон.

- 2) Применить единые критерии выделения разломных зон и сопоставить положение их границ в полях различной физической природы.
- 3) Выявить особенности проявления внутренней структуры разломных зон в эманационном (радон и торон) и магнитном полях, а также в поле кажущегося удельного электрического сопротивления.

Методы исследований

Для изучения разломных зон Приольхонья использовались тектонофизические и геофизические методы. Первые, кроме структурно-геологических способов картирования разломов и трещиноватости, включали специальные способы реконструкции полей напряжений с определением типа подвижки по разломным сместителям [5, 9]. С помощью геофизических методов исследовались только те дизъюнктивы, внутреннее строение которых было в достаточной степени изучено на этапе *геолого-структурных исследований*. Основу последних составляла детальная документация поверхностей скольжения и трещиноватости в серии коренных выходов горных пород, представляющих каждую разломную зону и располагающихся на близком расстоянии от геофизических профилей. Был сформирован обширный банк структурно-геологических данных по 135 точкам наблюдения, в 95 из которых сделаны статистические замеры элементов залегания трещин. Итогом обработки фактического материала стали структурные разрезы, соответствующие каждому из выбранных для дальнейших исследований дизъюнктивов. Эти разрезы позволили определить характер зональности структуры дизъюнктивов, включая оценку поперечных размеров полос проявления тектонитов главного сме-

стителю и подзон распространения разрывов 2-го порядка. Для оценки ширины зоны повышенной трещиноватости, обрамляющей представленную наиболее крупными разрывами осевую часть дизъюнктива, использовалась плотность трещин на квадратный или погонный метр (D), измеренная с определенным шагом вдоль каждого структурного разреза (рис. 2).

Из большого числа *геофизических методов* для изучения разломных зон были выбраны радон-тороновая эманационная съемка, магнитная съемка и электроразведка методом симметричного электрического профилирования. Эти методы традиционно считаются наиболее информативными при изучении разрывных нарушений и трещиноватости горных пород. В то же время, они характеризуются высокой производительностью и простотой реализации в поле, что позволило за сравнительно короткое время сформировать необходимый банк численной информации об объемном распределении геофизических полей в пределах разломных зон и на их флангах.

Эманационная радон-тороновая съемка проводилась при помощи полевого радиометра РРА-01М-03, позволяющего одновременно измерять объемную активность радона-222 (Q , Бк/м³) и количество распадов торона (N) в пробе почвенного воздуха, забор которого осуществлялся при помощи пробоотборного устройства ПОУ-04. Измерения выполнялись в соответствии с прилагающимися к приборам инструкциями и с учетом результатов собственных методических экспериментов, позволивших снизить влияние на величину Q атмосферного давления, температуры и влажности воздуха. Измерения производились днем (с 10 до 20 часов) в сухую погоду, причем проба воздуха качивалась с глубины 50 см, где влияние перечисленных метеофакторов ослаблено. Общий объем эманационной съемки составил 45 профилей, пункты

измерений на которых располагались с шагом 10-15 м со сгущением до 5 м в центральной части зон.

Для измерения модуля полного вектора магнитной индукции T применялся протонный магнитометр ММП-203, обеспечивающий точность измерений порядка 1 нТл. Во время съемки датчик располагался на высоте 2 м по отношению к поверхности земли. При проведении съемок методом электрического профилирования использовалась симметричная установка с разносом между питающими электродами $AB=20$ м. Такая установка позволяет оценить удельное электрическое сопротивление ρ горных пород в интервале глубин от 2 до 7 м. Геофизические профили ориентировались перпендикулярно по отношению к разломным зонам.

При выполнении измерений электроразведочная установка располагалась вдоль профилей. Всего измерения магнитного поля были выполнены в 1663 пунктах (41 профиль), а удельного электрического сопротивления ρ_k – в 1023 пунктах (30 профилей).

Измерения упомянутыми геофизическими методами были проведены на одних и тех же профилях. При этом пункты эманационной съемки совпадали с местами замеров параметров ρ и T , распределения которых, как правило, изучались с большей детальностью. Длина геофизических профилей определялась необходимостью полного пересечения разломной зоны с выходом на ее периферии к фоновым значениям параметров изучаемого физического поля.

Результаты исследований

Фактические данные, полученные на отдельных участках при профильных или площадных исследованиях, иллюстрируются на примере разломных зон, отделяющих от «материка» мысы Онтхой (см. рис. 2) и Улирба (рис. 3).

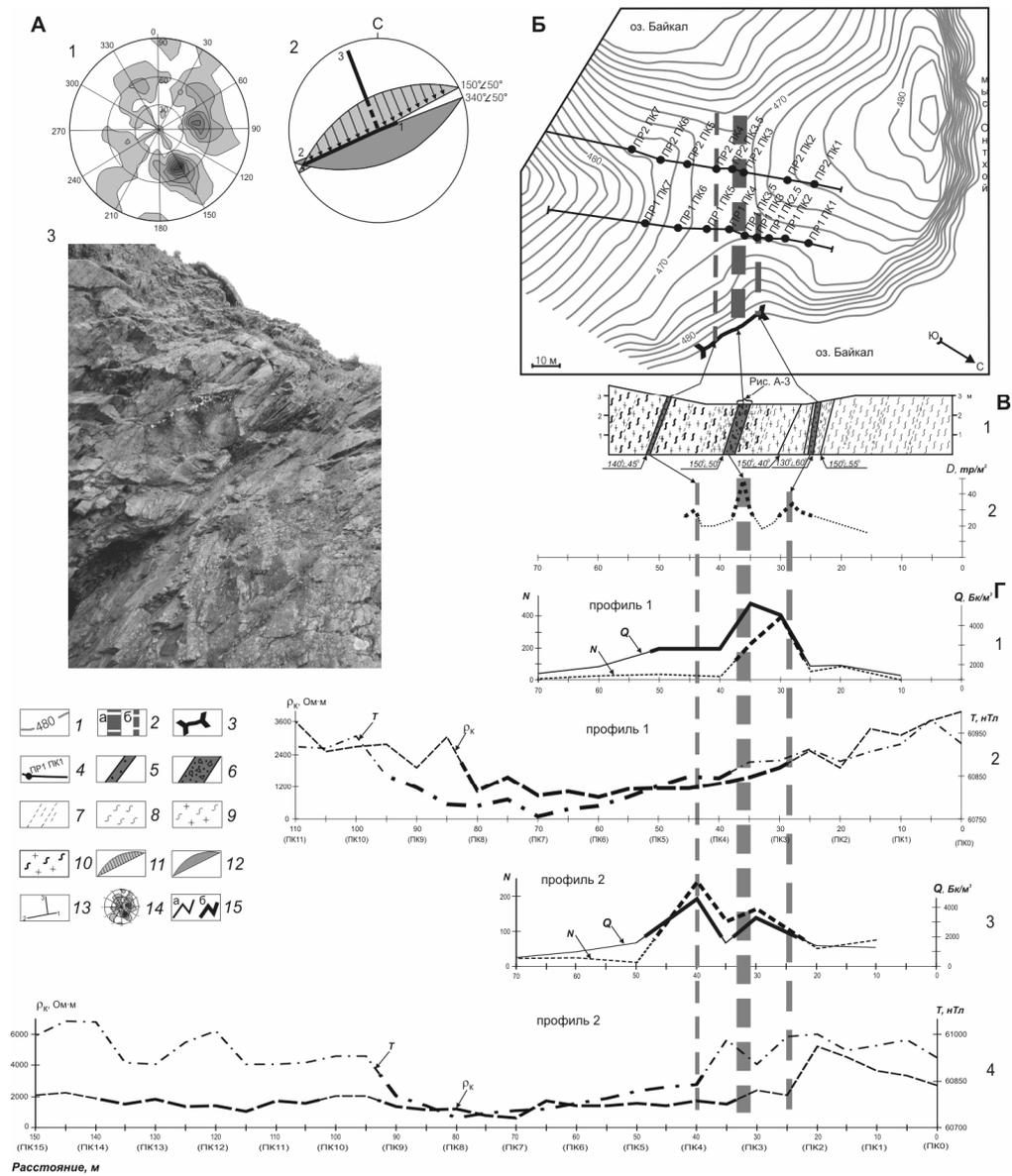


Рис. 2. Результаты структурно-геологических, геоморфологических и геофизических исследований разломной зоны на мысе Онтхой в Приорьхонье: А – результаты структурно-геологических исследований: 1 – диаграмма трещиноватости, 2 – реконструкция поля напряжений, 3 – фотография коренного выхода, с главным сместителем разломной зоны; Б – расположение геофизических профилей; В – результаты тектоно-структурного анализа: 1 – структурно-геологический разрез, 2 – график вариаций плотности трещин в 1 м^2 (D) коренного выхода; Г – объемная активность 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; 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; 15 – участки графиков с величинами соответствующего параметра, меньшими (а) и большими (б) среднего арифметического значения по профилю

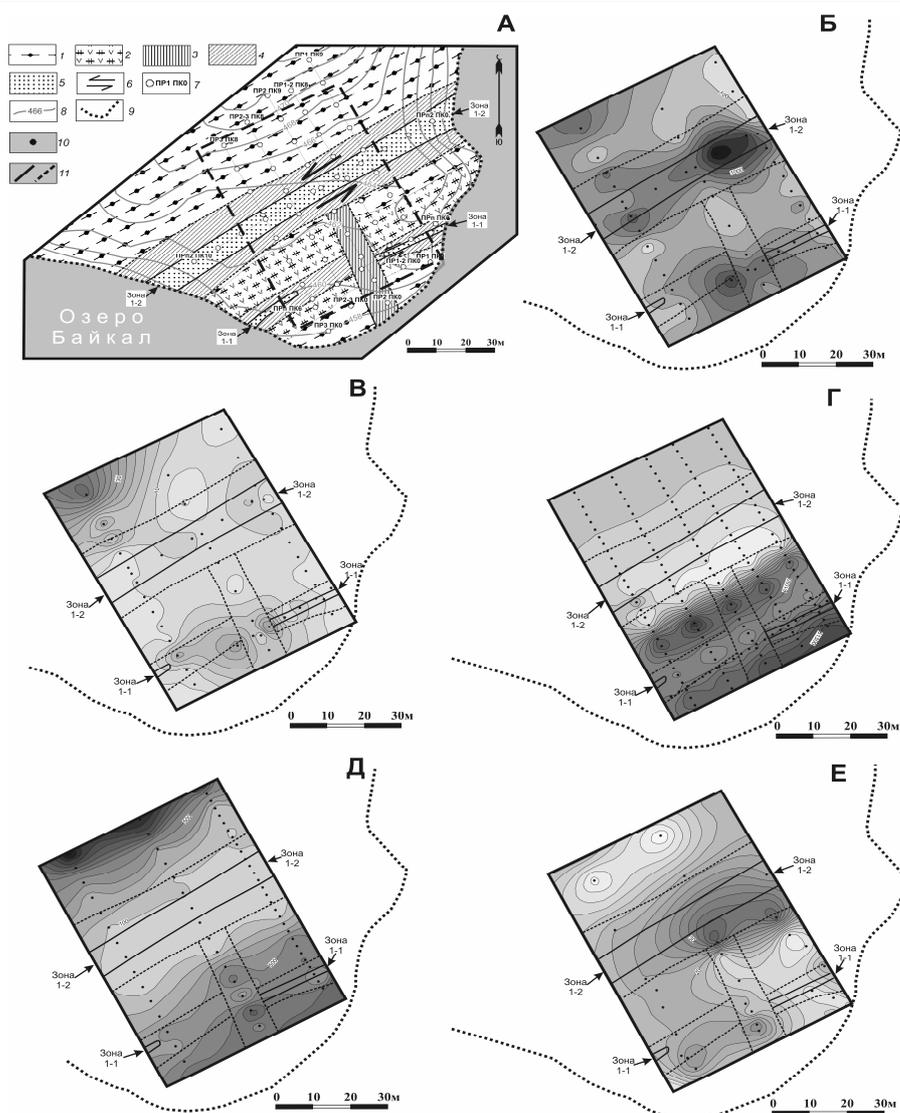


Рис. 3. Результаты площадных структурно-геологических и геофизических исследований разломных зон № 1-1 и 1-2 на мысе Улирба в Приольхонье: А – геолого-структурная карта (пунктирный контур – площадь, представленная на рис. 3, Б-Е); Б-Е – карты, на которых в изолиниях показаны распределения значений: Б – объемной активности радона (Q), В – количества распадов торона (N), Г – полного вектора магнитной индукции (T), Д – кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k), Е – плотности трещин в 1 пог. метре коренного выхода (D); 1 – биотитовые гнейсы; 2 – амфиболовые гнейсы и амфиболиты; 3 – зона повышенной трещиноватости; 4-5 – строение разломных зон № 1-1 и 1-2: 4 – подзона разрывов 2-го порядка и сопутствующей трещиноватости, 5 – подзона главного сместителя; 6 – направление смещения крыльев; 7 – точки геофизических наблюдений и индексация их крайних пикетов (для рис. А); 8 – изолинии рельефа; 9 – береговая линия; 10 – точки наблюдений для данного метода (для рис. Б-Г); 11 – границы разломных зон и их подзон по структурным данным (для рис. Б-Г)

Они включают геоморфологические и структурно-геологические материалы. Здесь же представлены результаты радон-тороновой съемки, а также магнито- и электроразведки в виде графиков или карт параметров Q , N , T , ρ_k , D по одним и тем же профилям или участкам. Рис. 2,3 иллюстрируют те особенности выраженности разломных зон в разнотипных геофизических полях, которые являются наиболее общи-

ми для изученных в Приольхонье дизъюнктивов. Ниже дается подробная характеристика измеренных геофизических полей. Выделение связанных с разломами аномалий каждого поля (включая поле плотности трещин) 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.

Объемная активность радона на каждом из профилей, пересекающих разломные зоны, положение последних отчетливо фиксируется наибольшими для данного участка значениями. Иногда дизъюнктив выделялся в виде единого максимума с постепенным или ступенчатым повышением объемной активности от периферии к наибольшему значению в центральной части (см. рис. 2, Г-1; рис. 3-Б, зона № 1-2 на профилях 1 и 2). Часто наиболее крупные из сместителей разломной зоны проявляются на участках аномальных значений Q в виде локальных экстремумов: максимумов при заполнении сместителя трещиноватой разломной брекчией (см. рис. 2, Г-3) и минимумов, если тектонитом является глина трения (см. рис. 3-Б, зона № 1-1 на профиле 1). В случае, когда аномалией Q выделялась серия частных сместителей, поперечный размер всей зоны оценивался по внешним ограничениям крайних участков аномальных значений объемной активности радона. Границы отрезков профиля с аномальными величинами Q практически совпадают с границами зоны проявления сместителей и сопутствующей трещиноватости, плотность которой превышает значение, среднее для профиля. Для участков профилей, где результаты структурных и эманионной съемок отчетливо согласуются друг с другом, наблюдается значимая корреляция между Q и D . Для таких участков справедливо усредненное по всем разломным зонам соотношение $M_D / M_Q \approx 0.7$, где M_Q и M_D – оценки ширины разломной зоны по размеру участков аномальных значений объемной активности радона и плотности трещин, соответственно.

Анализ материалов радоновой съемки свидетельствует о том, что, несмотря на отличия в распределении Q для отдельных объектов, можно выделить общие особенности объемной активности радона в разломных зонах Приольхонья. Отличия в форме и величинах аномалий Q на разных профилях,

пересекающих один и тот же дизъюнктив (см. рис. 2, Г-1,3; рис. 3-Б, зона № 1-2 на профилях 1 и 2), а также изменения рассматриваемого параметра вдоль разломных зон (см. рис. 3-Б) свидетельствуют о неравномерности распределения объемной активности радона по простиранию дизъюнктивов.

В поперечном направлении объемная активность радона характеризуется еще более ярко выраженной изменчивостью, проявляющейся в уменьшении значений параметра Q от максимума в приосевой части к периферии. При этом участок аномальных значений обычно асимметричен: в висячем крыле разломной зоны он имеет большую протяженность и характеризуется меньшим градиентом, чем в лежащем (см. рис. 2, Г-1). Отмеченные закономерности проявления активности радона согласуются с особенностями строения разломных зон [8, 9], для которых в целом характерно увеличение плотности трещин и разрывов 2-го порядка от периферии к центру, чередование максимумов и минимумов данного параметра в продольном направлении, а также большая нарушенность одного из крыльев (обычно висячего).

Таким образом, главным фактором выявленной пространственной изменчивости объемной активности радона является неоднородная проницаемость горного массива для газов, вызванная неравномерностью процесса разрывообразования в разломной зоне. Этот вывод подтверждает значимый коэффициент корреляции (0.72) между параметрами Q и D , измеренными на располагающихся рядом поперечных профилях структурной и эманионной съемок, которые пересекали каждую из изученных разломных зон. Отсутствие технической возможности измерения и последующего сопоставления объемной активности радона и плотности трещин в одних и тех же точках (забор пробы воздуха производился из под почвы, которая перекрывает пригодные для измерения D коренные породы) объясняет отличие коэффициента корреляции от единицы. Кроме высокой восприимчивости поля радона к изменению

дислоцированности пород в разломной зоне, отличие коэффициента корреляции от единицы обусловлено вариациями метеоусловий, слабой изученностью временных изменений интенсивности излучения источника и др. В целом же полученные материалы не дают оснований сомневаться в том, что активность радона в разломных зонах контролируется преимущественно степенью нарушенности их субстрата.

Количество распадов торона, измеренное вдоль геофизических профилей, характеризуется более сложной пространственной изменчивостью по сравнению с объемной активностью радона. Иногда форма графиков параметра N практически совпадает с формой графиков объемной активности радона (см. рис. 2, Г-1, 3). В других случаях графики N и Q в целом подобны и отличаются лишь в деталях. Наконец, на некоторых профилях при выделении разломных зон по аномальным значениям обоих параметров обнаруживается существенное несовпадение формы графиков (см. рис. 3, Б-В). Иногда их пики приурочены к располагающимся рядом точкам измерений; подобная ситуация отмечалась ранее при изучении наиболее крупных разломов Байкальской рифтовой зоны [3]. В других ситуациях эманации радона трассируют главный сместитель, а эманации торона – его крылья. Учитывая, что характер эманаций в обоих случаях определяется проницаемостью субстрата разломной зоны, логично предположить, что несовпадение пространственного распределения эманаций связано с отличием периодов полураспада радона и торона. Поскольку период полураспада торона ($T_{1/2} = 54.5$ сек) в несколько тысяч раз меньше периода полураспада радона ($T_{1/2} = 3.8$ сут.), более сложное пространственное распределение количества распадов торона отражает преимущественно близповерхностную картину нарушенности пород в зоне разлома.

Кажущееся удельное электрическое сопротивление. Изученные разло-

мы выделяются аномалиями кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k горных пород, причем за исключением одного случая речь идет об аномально низких значениях ρ_k . Для сравнительно небольших разломов аномальные участки, выявленные по значениям Q и ρ_k , пространственно совпадают. Практически у всех крупных разломов Приольхонья (Приморский, Кучелгинский, Улирбинский, Куркутский) ширина аномалии ρ_k в 2 и более раз превышает размер участка аномальных значений Q (см. рис. 2, Г; рис. 3, Б, Д), причем последний, как правило, занимает краевую часть минимума графика ρ_k , центр которого смещен в висячий блок (см. рис. 2, Г). В некоторых случаях это объясняется различием сопротивления пород в крыльях при их вертикальном перемещении по разломной зоне сбросового типа. В случае, иллюстрируемом рис. 2, а также в ряде других структурных ситуаций, причиной отмеченного несоответствия является то, что в поле ρ_k отражается крупная зона древнего разлома, тогда как газовые эманации маркируют лишь ее краевую часть, наиболее активную на современном этапе рифтогенеза. Причиной аномально низких сопротивлений в таких зонах может являться отличие их субстрата от вмещающих пород как по петрофизическим свойствам (милониты и катаклазиты), так и по условиям обводненности (вследствие большей дислоцированности).

Магнитное поле иногда отражает наличие разломной зоны примерно также, как поле ρ_k в рассмотренном выше случае (см. рис. 2, Г). Однако по большому счету в пространственном распределении модуля полного вектора магнитной индукции разломные зоны Приольхонья выражены наименее отчетливо. В зависимости от контраста магнитных свойств тектонита и контактирующих по сместителю горных пород разломы не проявляются (2 случая) или проявляются в магнитном поле аномальными зонами. В последнем случае это могут быть участки минимальных или максимальных значений T , но чаще всего (7 случаев) – это участки градиентных изменений данной

величины вдоль профиля (см. рис. 3, Г).

Обсуждение результатов

В первом приближении дизъюнктивы центральной части Байкальского рифта выделяются максимумами эманацій радона и торона, минимумами кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород и градиентными изменениями магнитного поля. Следует подчеркнуть, что выделяются не единичные сместители, а довольно широкие зоны, сложное внутреннее строение которых по-разному отражается в полях различной физической природы. Это подтверждается количественными показателями, характеризующими пространственную связь между аномалиями различных геофизических полей. Значимые корреляционные зависимости обнаружены лишь для эманацій радона и торона, да и то не на всех участках. Что же касается корреляционных связей между модулем полного вектора магнитной индукции и удельным электрическим сопротивлением, а также между этими параметрами и характеристиками эманационных полей, то они отсутствуют. Таким образом, хотя нет сомнений, что дизъюнктивы Приольхонья выделяются в различных геофизических полях, каждое из изученных полей отражает отдельные, специфические особенности внутреннего строения разломных зон.

Это можно наглядно проиллюстрировать на примере Кучелгинского, Улирбинского, Куркутского и других главных структурообразующих разломов Приольхонья, которые были изучены с оптимальной детальностью. Сопоставление геофизических и структурно-геологических данных показало, что, как и Приморский разлом [12], упомянутые дизъюнктивы представляют зоны многократной активизации, для которых докайнозойский тектогенез был более масштабным по сравнению с современным рифтообразованием. Поэтому рассматриваемые разломы выделяются в виде широких зон древ-

них тектонитов, трассируемых явно выраженными аномалиями ρ_k , а иногда и магнитного поля. Раннекайнозойские сдвиговые и позднекайнозойские сбросовые перемещения, как правило, охватывают зоны древних бластомилонитов лишь частично, что находит отражение в размерах, форме и амплитуде эманационных аномалий. Обычная приуроченность последних к краевым участкам минимальных значений ρ_k для сбросовых разломов объясняется тем, что кажущееся удельное сопротивление крыльев различно в зависимости от степени их нарушенности разрывами или наличия контакта (по сместителю) пород с отличающимися удельными сопротивлениями.

Эманационные аномалии различной природы могут по-разному отражать строение разломной зоны, активной на современном этапе тектогенеза. Пространственное распределение торона характеризует преимущественно близповерхностную часть зоны разлома. Поскольку период полураспада данного радиоизотопа мал, содержание торона отличается значительной изменчивостью, которая не всегда прямо связана со степенью тектонической нарушенности субстрата. Радон, имеющий больший период полураспада и обладающий способностью перемещаться с потоками метана, водорода, гелия и других газов [20, 22], в значительной мере отражает структуру активной разломной зоны.

В целом распределение радона характеризуется изменчивостью вдоль и вкрест простирания разломной зоны в соответствии с пространственной неравномерностью процесса разрывообразования. Обобщение полученных в Приольхонье данных и их сопоставление с материалами выполненных ранее эманационных съемок [2, 3, 9, 17, 19, 23] позволяет предложить принципиальный, т.е. построенный без учета осложняющих неструктурных факторов, разрез разломной зоны, отражающий закономерности ее радоновой активности в зависимости от особенностей внутреннего строения (рис. 4).

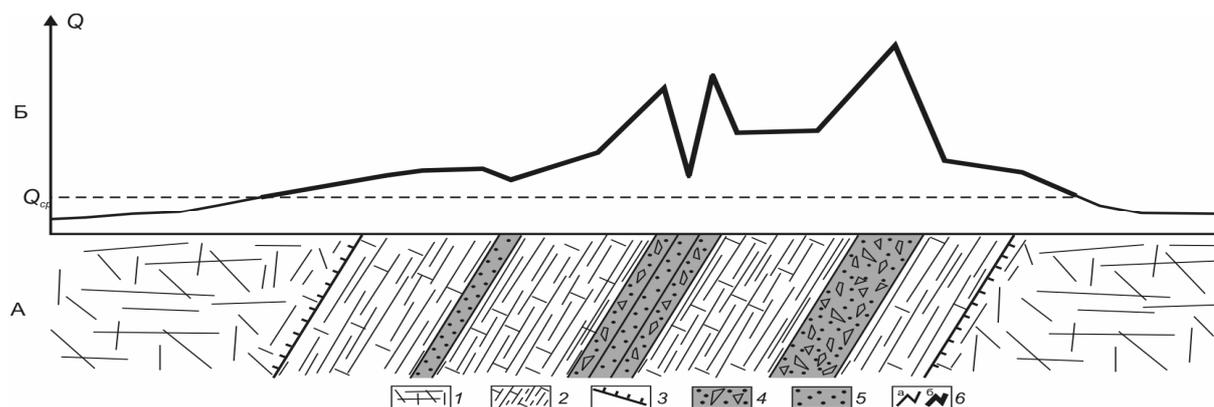


Рис. 4. «Типичный» разрез разломной зоны (А) и «обобщенный» график объемной активности радона (Б), иллюстрирующие связь пространственного распределения активности радона с внутренним строением разломной зоны: 1 – хаотическая, «фоновая» трещиноватость горного массива; 2 – трещинная сеть, характеризующаяся системностью и повышенной плотностью трещин; 3 – границы разломной зоны; 4, 5 – участки сместителя, выполненные соответственно брекчией дробления и глиной трения; 6 – участки графика, для которых величина объемной активности радона (Q) меньше (а) или больше (б) среднего арифметического значения по профилю

В поле объемной активности радона разломная зона выделяется в виде положительной аномалии, поперечные размеры которой примерно в 1.4 раза превышают ширину полосы повышенной плотности открытых трещин, по-видимому, за счет ее обрамления по периферии участками интенсивного проявления микротрещиноватости, проницаемой для газа. Форма аномалии характеризуется асимметрией, выражающейся ее расширением в более нарушенном разрывом висячем крыле. На фоне общего увеличения объемной активности радона от краевых частей к оси имеют место флуктуации активности, положение и размер которых обусловлены наличием сместителей разломной зоны, выраженных тектонитами. При переработке материала крыльев до глины эти локальные аномалии представлены минимумами, в случае наличия пронизанной микротрещинами разломной брекчии – максимумами.

Заключение

Применение комплекса экспрессных методов полевой тектонофизики и геофизики для изучения разломов Приольхонья позволило получить уникаль-

ную информацию по состоянию структуры и физических полей в разломных зонах земной коры региона, отличающегося многоэтапной историей тектонического развития. Анализ структурных и геофизических данных дал возможность установить, что границы разломных зон отчетливо выделяются в каждом из полей по аномальным, т.е. отличающимся от среднего, значениям характеризующих их параметров. Сопоставление поперечных размеров полученных таким способом аномальных зон, сравнение на качественном уровне характера выраженности отдельных структурных элементов разломов в разных геофизических полях и корреляция их параметров друг с другом позволили сделать выводы, которые можно распространить на существенно больший круг объектов, чем дизъюнктивы центральной части Байкальского рифта. В краткой формулировке эти выводы сводятся к следующему.

1. Разломные зоны как сложные трехмерные структурные элементы земной коры проявляются в особенностях пространственного распределения радона и торона, модуля полного вектора магнитной индукции и удельного электрического сопротивления, причем детали этих распределений

- отражают разные особенности внутреннего строения дизъюнктивов.
2. Наибольшей неоднозначностью в плане структурной интерпретации отличается магнитное поле, поскольку в нем отражается специфическое свойство субстрата, присутствие которого в дислоцированном горном массиве или образовавшемся тектоните не является обязательным. Более информативным является удельное электрическое сопротивление, на пространственное распределение которого влияет как вещество, так и структура: степень нарушенности горного массива в близповерхностном слое напрямую связана с его обводненностью, что отчетливо фиксируется значениями электрического сопротивления. Поэтому по пространственному распределению удельного сопротивления, измеренному в пределах и на флангах крупных разломов Приольхонья, удалось выделить в одних случаях широкие зоны тектонитов, образовавшихся при масштабных тектонических событиях на докайнозойских этапах развития территории, а в других – узкие полосы интенсивно нарушенных пород, представляющих активизированную в кайнозойскую часть древних дизъюнктивов. Наиболее отчетливо активные разломные зоны проявляются в полях газовых эманацій, прежде всего радона, поскольку торон ввиду малого периода полураспада отражает проницаемость преимущественно близповерхностного слоя, которая контролируется в том числе и не тектоническими процессами.
 3. Главные закономерности внутренней структуры разломных зон земной коры находят отчетливое отражение в пространственном распределении радона, т.к. его активность пропорциональна степени нарушенности горного массива разноранговыми разрывами. Активные разломы проявляются в виде широких зон аномальных значений объемной

активности радона, поперечные размеры которых в Приольхонье примерно в 1.4 раза превышают ширину зон повышенной трещиноватости, сформировавшихся в результате перемещения крыльев. Радоновые аномалии над разломами демонстрируют ярко выраженную продольную и поперечную неоднородность, обусловленную изменчивостью проницаемости субстрата разломной зоны для газовых эманацій. Типичная или «обобщенная» аномалия характеризуется неравномерным повышением радоновой активности от периферии к его осевой части. На фоне этого повышения наблюдается серия локальных максимумов и минимумов, маркирующих положение отдельных сместителей с проницаемыми или непроницаемыми для газа тектонитами.

Таким образом, даже без влияния рудоносных флюидов, осложняющих картину деформаций субстрата в разломных зонах, связанные с ними физические поля характеризуются закономерной пространственной изменчивостью. Последняя отражает неравномерность процесса разломообразования и должна учитываться при использовании геофизических методов в рудной геологии. Установленные закономерности отражения структуры разломных зон в пространственном распределении радона, электрического сопротивления и модуля полного вектора магнитной индукции могут стать основой единого комплекса методов полевой геофизики, оптимального для проведения поисково-разведочных работ в условиях, сходных с существующими в Приольхонье. В то же время при обосновании методического комплекса и интерпретации результатов геофизических съемок необходимо учитывать, что присутствие рудного вещества в большей или меньшей степени скорректирует геофизический имидж разломной структуры.

Авторы благодарны к.г.-м.н. А.С. Гладкову, инженеру Е.И. Когуту и другим коллегам за помощь в сборе полевых материалов по трещиноватости и разломам Прибайкалья.

Библиографический список

1. Александров В.К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1990. –103с.
2. Войтов Г.И. Прогнозное значение радиевых и радоновых полей подземных водно-газовых систем Средней Азии // Физ. Земли. – 1998. -№7. –С.72-84.
3. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Саньков В.А. и др. Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны (ртуть, радон и торон) // Докл. РАН. -2006. –Т.409, №3. –С.389-393.
4. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. -Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. –252с.
5. Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. –М.: Недра, 1992. –295с.
6. Плешанов С.П., Ромазина А.А. Некоторые вопросы кинематики развития разломов центральной части Байкальского рифта // Проблемы разломной тектоники. – Новосибирск: Наука, 1981. – С.129-141.
7. Семинский Ж.В., Семинский К.Ж. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах земной коры // Геология рудных месторождений. –2004. –№6. –С.695-708.
8. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. –Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. –243с.
9. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В. и др. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. –293с.
10. Сизых В.И. Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. –Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. –154с.
11. Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника. –1997. –№6. –С.56-71.
12. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. –Новосибирск: Наука, 1977. – 102с.
13. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). –Новосибирск: Наука, 1983. –112с.
14. Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. Fault zone architecture and permeability structure // Geology. 1996. V.24. P.1125-1128.
15. Chester F.M., Logan J.M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl Fault zone, California // Pure and Applied Geophysics. 1986. V.124. P.79-106.
16. Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al. // Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V.282. P.1-38.
17. Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K. et al. Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones // Applied Radiation and Isotopes. 2003. V.59. P.205-213.
18. Kim Y.S., Peacock D.C.P., Sanderson D.J. Fault damage zones // J. of Struct. Geol. 2004. V.26. P.503-517.
19. [King C.-Y.](#), [Zhang W.](#), [King B.-S.](#) Radon anomalies on three kinds of faults in California Pure and Applied // Geophysics PAGEOPH. 1993. V.141 (1). P.111-124.
20. [Lachassagne P.](#), [Pinault J.-L.](#), [Laporte P.](#) Radon-222 emanometry: A relevant methodology for water well siting in hard rock aquifers // Water Resources Research. 2001. V.37 (12). P.3131-3146.

21. Schulz S.E., Evans J.P. Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip faults // J. of Struct. Geol. 2000. V.22. P.913-930.

22. Varhegyi A., Baranyi I., Somogyi G. A model for the vertical subsurface

Исследования выполнены при поддержке СО РАН (проект ОНЗ-6.13) и РФФИ (проект 07-05-00061).

Рецензент: доктор геолого-минералогических наук, профессор Иркутского государственного университета А.П. Кочнев

radon transport in “geogas” micro-bubbles // Geophys. Transaction. 1986. V.32. B3. P.18-37.

23. [Zhang X.-J.](#), [Zhang H.](#), [Su H.-J.](#) et al. Geochemical feature of radon and mercury across Liujiapu active fault // Earthquake. 2005. V.25 (4). P.87-92.