

РАДОНОВАЯ АКТИВНОСТЬ РАЗНОТИПНЫХ РАЗЛОМОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья)

К.Ж. Семинский, А.А. Бобров

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

Проведена профильная радоновая съемка для 26 разнотипных и разноранговых разломов Западного Прибайкалья (Байкальский рифт) и Южного Приангарья (юг Сибирской платформы). Установлено, что изученные дизъюнктивы выделяются в поле радона в виде широких зон аномальных значений объемной активности радона, поперечные размеры которых примерно в 1.4 раза больше ширины зоны повышенной трещиноватости, сформировавшейся в результате перемещения крыльев. Показано, что радоновая активность разломных зон при прочих равных условиях зависит от их размера, морфогенетического типа и степени тектонической активности в кайнозое. Она в среднем выше у рифтовых дизъюнктивов по сравнению с краевыми платформенными, больше у сбросов по отношению к сдвигам, возрастает с увеличением масштабного ранга и степени тектонической активности разлома, являющейся наиболее значимым геодинамическим фактором формирования эманационного поля.

Радон, разломная зона, тектоническая активность, Байкальский рифт, Сибирская платформа.

RADON ACTIVITY OF FAULTS (western Baikal and southern Angara areas)

K.Zh. Seminsky and A.A. Bobrov

We report results of transect radon surveys on 26 large and small faults of different geometries in the western Baikal and southern Angara (southern Siberian craton) areas. The studied faults show up in the radon field as broad zones of high radon activity concentration, with their widths 1.4 times the widths of faulting-related deformation zones. Other things being equal, radon emanation depends on the size and slip geometry of faults and on their activity in the Cenozoic. Relative radon activity is higher in rift faults than in cratonic ones, in normal relative to strike-slip faults, and in larger and more active faults, the latter factor being the basic geodynamic control of radon emanation.

Radon, fault, tectonic activity, Baikal rift, Siberian craton

ВВЕДЕНИЕ

Целью эманационной съемки, основанной на измерениях объемной активности радона (Q) в почвенном воздухе, как правило, является установление местоположения активных разломных сместителей. В подавляющем большинстве случаев результаты таких работ используются для решения разнотипных прикладных задач, тогда как определяющие проницаемость горного массива структурные факторы образования аномалий, обуславливающие различие последних по величине, размеру и форме, остаются неизученными. Вместе с тем известно, что дизъюнктив у поверхности земли редко представлен лишь полосой тектонитов. Обычно это зона проявления серии сближенных разрывных нарушений, обрамленная по периферии участками повышенной трещиноватости. Ее внутреннее строение определяется размерами, степенью тектонической активности и морфогенетическим типом разлома. Акцентированного (на количественной основе) исследования обусловленности эманационных аномалий перечисленными выше факторами, судя по известным литературным данным, не проводилось. Анализ публикаций, близких к данной тематике [Schery et al., 1982; King et al., 1993, 1996; Войтов, 1998а,б; Guerra, Lombardi, 2001; Дехандшутгер и др., 2002; Ioannides et al., 2003; Moussa, El Arabi, 2003; Коваль и др., 2006; Уткин и др., 2006; Inceoz et al., 2006], свидетельствует лишь о высокой радоновой активности крупных разломов, а также разрывных нарушений, характеризующихся сейсмической активностью (особенно на сегментах, вскрывшихся при недавнем землетрясении). Установлено, что области сжатия характеризуются меньшей проницаемостью для газов по сравнению с участками растяжения.

Эти закономерности используются в качестве отправного момента предпринятых нами более детальных исследований, цель которых состояла в сопоставлении радоновой активности разнотипных и разноранговых разломных зон, располагающихся в пределах смежных регионов, отличающихся интенсивностью тектонических движений. 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. Несмотря на хорошую изученность приангарской территории вследствие интенсивного природопользования, в литературе отсутствуют сведения по радоновой активности разломов юга Сибирской платформы. Для нескольких разломов Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) опубликованы данные по активности радона, торона и содержанию в почвах ртути [Коваль и др., 2006], но основное внимание было акцентировано на последнем химическом элементе.

Таким образом, задачами исследования были: 1) отработать методику экспрессной эманационной съемки для условий юга Восточной Сибири и определить пределы изменений объемной активности радона в подпочвенном воздухе над разломами в тектонически-активном (центральная часть Байкальского рифта) и пассивном (юг Иркутского амфитеатра) участках земной коры; 2) оценить радоновую активность разломных зон, отличающихся тектонической активностью, масштабным рангом и морфогенетическим типом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись 26 разломных зон, располагающихся на 19 участках, 10 из которых относятся к рифту и 9 — к платформенной территории (рис. 1). Платформенные участки локализовались в пределах крупных дизъюнктивных зон (например, № 1 — в Окино-Катангской) 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.

Внутреннее строение дизъюнктивов было изучено посредством проведения детальных **геолого-структурных и геоморфологических наблюдений**. Их основу составили полевое обследование уступов рельефа, а также документация поверхностей скольжения и трещиноватости в естественных и искусственных (небольшие каналы и расчистки склонов) обнажениях горных пород, представляющих каждую

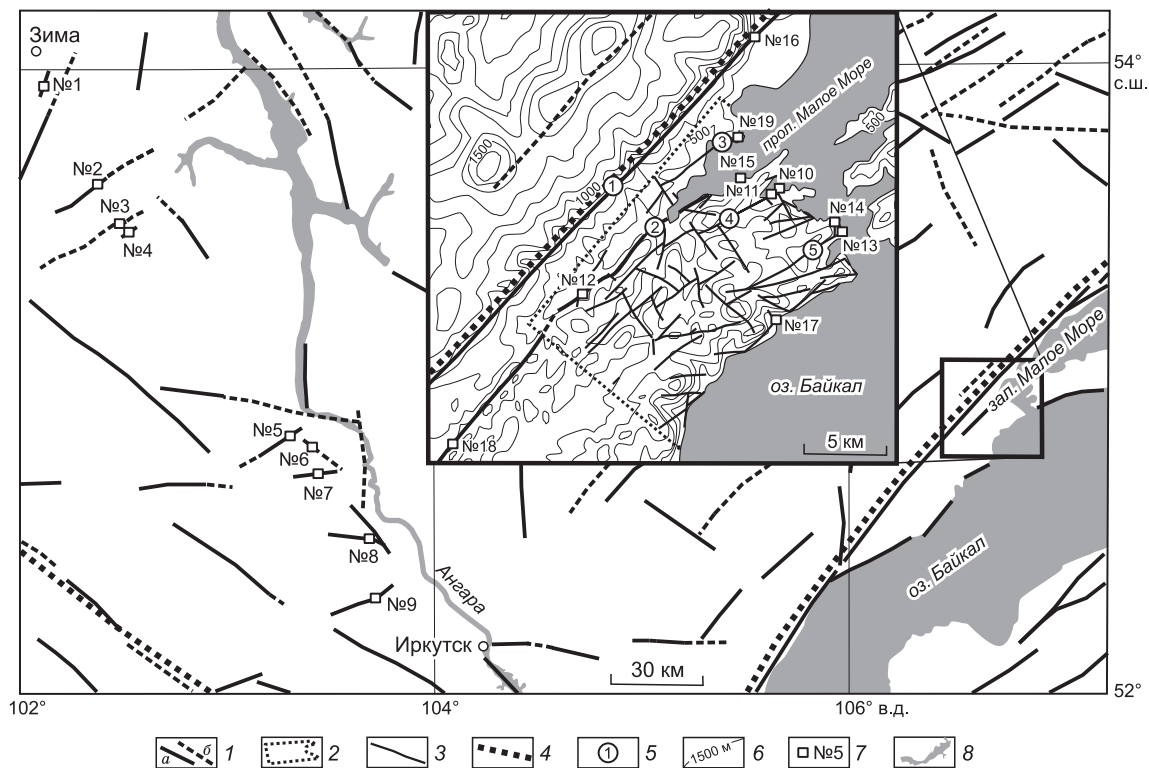


Рис. 1. Обзорная схема разломов Южного Приангарья и Западного Прибайкалья (врезка), изученных эманационным и структурно-геологическим методами.

1 — разломы Иркутского амфитеатра (юг Сибирской платформы), отчетливо (а), менее отчетливо (б) выраженные уступами в рельефе [Семинский и др., 2008]; 2, 3 — участок структурного картирования (2), разломы (3), выявленные по его результатам в центральной части Байкальского рифта (Приольхонье) [Семинский, 2005]; 4 — краевой шов Сибирской платформы; 5 — крупные разломы Приольхонья (1 — Приморский, 2 — Кучелгинский, 3 — Улирбинский, 4 — Куркутский, 5 — Тутайский); 6 — горизонталь рельефа; 7 — участки детальных исследований разломов и их порядковые номера; 8 — гидросеть.

разломную зону и располагающихся на возможно более близком расстоянии от профилей радоновой съемки. Был сформирован обширный банк структурно-геологических данных по 135 точкам наблюдения, в 95 из которых сделаны массовые замеры элементов залегания трещин. Итогом обработки полученных материалов стали круговые диаграммы, структурные и геоморфологические разрезы (рис. 2, А, Б, В₂), соответствующие каждому из дизъюнктивов и отражающие морфогенетический тип, а также характер зональности их разрывной структуры, включая количественную оценку поперечных размеров полос проявления тектонитов главного сместителя и подзон распространения разрывов 2-го порядка. Для оценки ширины зоны повышенной трещиноватости, обрамляющей представленную наиболее крупными разрывами осевую часть дизъюнктива, использовались замеры плотности трещин на квадратный или погонный метр (D , тр/м²), измеренные с определенным шагом вдоль каждого из разрезов (см. рис. 2, В₆).

Кроме собственной структурно-геологической информации для характеристики внутреннего строения платформенных дизъюнктивов привлекались сведения о составе и мощностях рыхлых отложений в их крыльях, по материалам Томского научно-исследовательского и проектного института нефти и газа Восточной нефтяной компании, полученным в 2005 г. при инженерно-геологических изысканиях в «коридоре» строительства разнотипных промышленных коммуникаций, соединяющих города Иркутск и Саянск.

Радоновая съемка проводилась при помощи полевых радиометров серии РРА (РРА-01М-01 и РРА-01М-03), характеризующихся чувствительностью не менее $1.2 \cdot 10^{-4}$ м³/(с·Бк) и $1.4 \cdot 10^{-4}$ м³/(с·Бк) соответственно и 30-процентным пределом допускаемой относительной погрешности. Совместно с РРА-01М-01 использовалось пробоотборное устройство ПОУ-04 в качестве воздухоудки. Предложенная в комплекте с приборами схема измерений [Методика..., 2004] полностью не удовлетворяла требованиям, необходимым для выполнения задач исследования, в связи: 1) с продолжительным (не менее 12 ч) временем экспозиции пробоотборника в шпуре; 2) с невозможностью учета степени разубоживания проб, имеющей место при их извлечении из почвы в разных погодных условиях (ветер, осадки и др.); 3) с недостаточным объемом пробоотборника и, таким образом, с невозможностью определения небольших концентраций радона. Поэтому методика эманационной съемки была адаптирована для решения задач конкретного исследования, проводимого в условиях резко-континентального климата Восточной Сибири [Бобров, 2008].

Измерения осуществлялись с учетом результатов методических экспериментов [Бобров, 2007], позволяющих снизить влияние на объемную активность радона таких метеофакторов, как атмосферное давление, температура и влажность воздуха за счет выбора оптимального режима наблюдений и глубины пробоотбора. Так, отбор проб и измерения осуществлялись с 10 до 20 ч в сухую погоду с глубины 50 см, где, согласно предварительно проведенным исследованиям, влияние атмосферного давления, температуры и влажности воздуха на величину Q минимально. При этом значения перечисленных метеопараметров фиксировались одновременно с каждым замером объемной активности радона, что обеспечивало возможность получения надежных результатов. Если в момент измерения значения Q , существенно отличающегося от предыдущего, было установлено резкое изменение давления, температуры или влажности воздуха, замер дублировался.

Для каждого измерения в почве пробивался цилиндрический шпур диаметром 2.5 см и глубиной 50 см, затем он герметично закрывался на 30 мин, поскольку именно за это время в любом грунте района исследований концентрация радона в данном объеме и в подпочвенном воздухе выравнивается. Далее осуществлялась закачка пробы в радиометр с последующим измерением объемной активности радона. После каждого определения прибор очищался от пробы посредством прокачки его рабочей камеры надпочвенным воздухом. Таким образом, удалось добиться высокой экспрессности полевых измерений, при которых время одного замера не превышало 40 мин. Вместе с тем полученные величины параметра Q следует считать условно абсолютными, так как по приблизительным оценкам они не менее чем в ~7 раз ниже истинных значений, вычисляемых с учетом геометрии шпура, эманационной способности разнотипных почв и других факторов. Поскольку такой расчет нетривиален и может представлять тему отдельного исследования, для решения задач, поставленных в данной работе, использовался главным образом коэффициент радоновой активности (K_Q) — относительная величина, специфика определения которой будет рассмотрена ниже. Кроме того, в рамках исследования правомерно сопоставление условно абсолютных значений Q , так как измерения этого параметра в каждой точке проводились единообразно.

Радоновая съемка осуществлялась в профильном варианте с шагом между точками наблюдения 10 или 15 м. Количество точек на поперечных профилях определялось необходимостью, с одной стороны, сгустить сеть (до 2.5—5 м) в центральной части разломной зоны, а с другой — выйти на ее периферии к минимальным значениям объемной активности радона, соответствующим фоновым величинам Q для горного массива на участке измерений. В зависимости от сложности вариаций объемной активности радона на каждом участке было пройдено от 1 до 3 профилей, ориентированных поперек изучаемой раз-

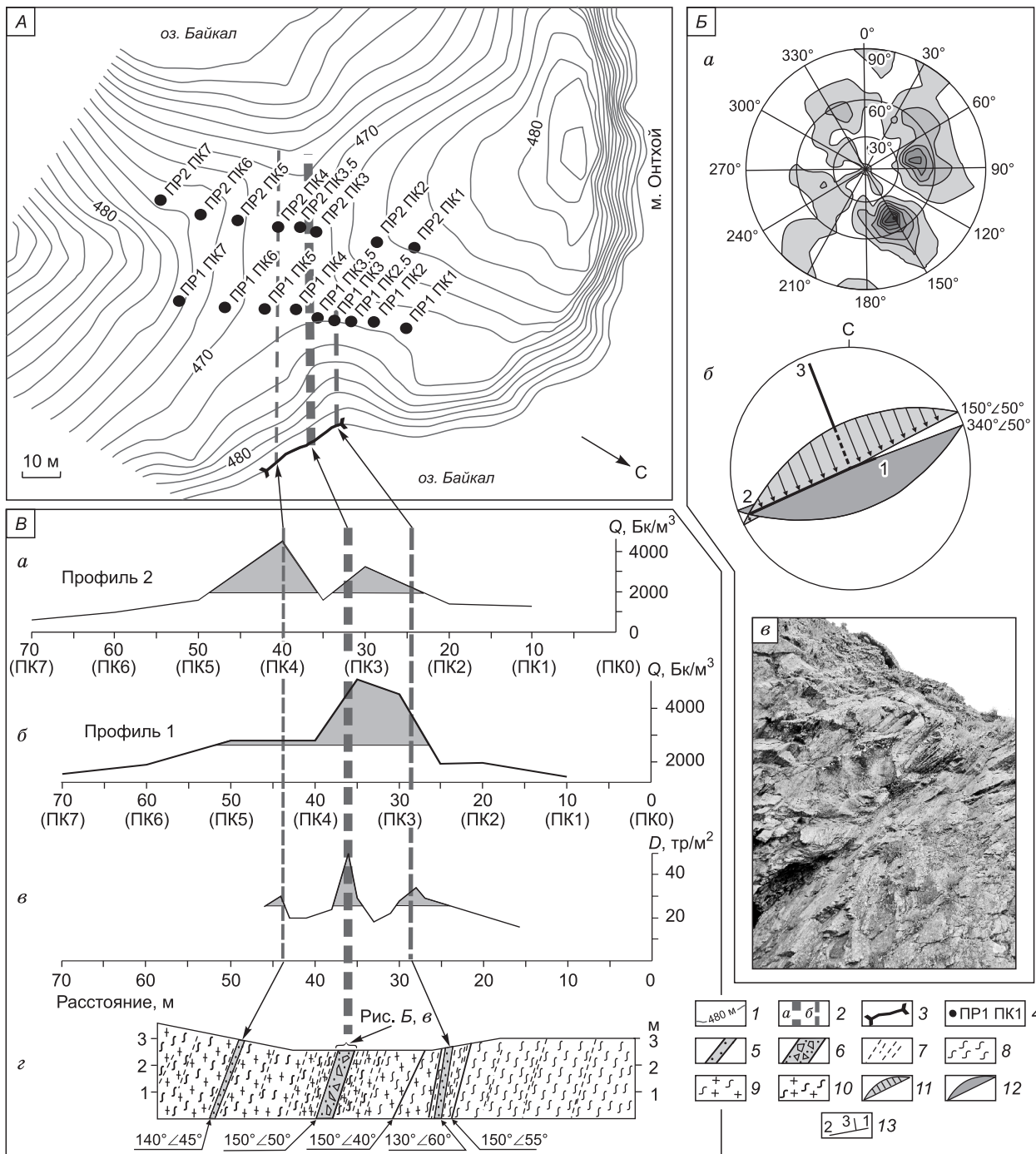


Рис. 2. Результаты структурно-геологических, геоморфологических и эманационных исследований разломной зоны № 15, располагающейся на м. Онтхой в Приольхонье (Западное Прибайкалье).

A — схема горизонталей рельефа, построенная для участка исследований при помощи мобильного GPS-приемника с шагом между замерами 10 м (данные Е.И. Когута); *B* — диаграмма трещиноватости, 100 замеров; уровни изолиний 0.5—2.5...4.5—14.5 % (*a*), решение о поле напряжений (*б*), фотография коренного выхода (*в*), в котором обнажается главный сместитель разломной зоны № 15; *B* — структурно-геологический разрез (*z*), вариации объемной активности радона (*Q*) и плотности трещин в 1 м² (*D*) (*в*) вдоль профилей (*a*, *б*), показанных на рис. *A* (области аномальных значений закрашены серым цветом).

1 — горизонтали рельефа; *2* — главный (*a*) и второстепенные (*б*) сместители разломной зоны; *3* — линия структурно-геологических наблюдений вдоль берегового обрыва; *4* — индексация профилей и пикетов радоновой съемки; *5*, *6* — второстепенные (*5*) и главный (*6*) сместители, представленные брекчией дробления; *7* — интенсивно-трещиноватые участки коренного выхода; *8* — гнейсы; *9* — гранитогнейсы; *10* — древние милониты; *11*, *12* — плоскости сопряженных сколов, по которым определялись оси напряжений и направление скольжения (стрелки) по главному сместителю разломной зоны № 15; *13* — оси напряжений (*1* — сжатия, *2* — промежуточная, *3* — растяжения).

Таблица 1. Количественные параметры разломных зон Западного Прибайкалья и Южного Приангарья, полученные по данным структурно-геологических и эманационных исследований

Номер участка	Номер разлома	Ширина зоны, м		M_D/M_Q	Q_{max} , Бк/м ³	Q_{min} , Бк/м ³	$Q_{max}/Q_{min} (K_Q)$	Тип разлома	Ранг разлома (см. рис. 4)	Степень активности разлома
		по аномалии M_D	по аномалии M_Q							
1	1	21*	30	—	3903	1361	2.9	2	2	1**
2	2	7	11	0.64	7000	2116	3.3	2	1	2**
3	3	32*	45	—	1565	574	2.7	3	3	1**
4	4	13	28	0.46	7524	1846	4.1	3	2	2**
5	5	30	45	0.67	2441	1238	2	2	3	1**
6	6	34*	49	—	2910	1291	2.2	2	3	2**
7	7	17*	23	—	1253	484	2.6	1	2	1**
8	8	7	9	0.78	16852	881	19.1	3	1	3**
9	9	28*	40	—	10371	635	16.3	2	3	3**
10	10-1	7	20	0.5	2037	746	2.7	2	2	1
10	10-2	5	20	0.5	2323	677	3.4	2	2	1
10	10-3	35	40	0.88	2651	444	6	3	3	2
11	11-1	25	45	0.62	2852	661	4.3	3	3	2
11	11-2	53	60	0.88	9921	955	10.4	2	4	1
11	11-3	7*	10	—	3354	820	4.1	2	1	1
12	12	21*	30	—	19171	3730	5.1	3	2	2
13	13	30	35	0.86	3495	166	21	3	3	3
14	14-1	8*	12	—	4452	1698	2.6	3	1	2
14	14-2	5	10	0.5	2865	1595	1.8	3	1	2
15	15	23	24	0.96	4752	759	6.3	3	2	2
16	16-2	21*	30	—	21118	1846	11.4	3	2	3
17	17-1	7*	10	—	13522	3697	3.7	2	1	2
17	17-2	20*	28	—	20000	4222	4.7	2	2	2
18	18	52*	75	—	8048	1148	7	3	4	2
19	19-1	7,5	8	0.94	1214	330	3.7	2	1	1
19	19-2	20	16	1.25	1432	305	4.7	2	2	1

Примечание. Тип разлома — взбросы (1), сдвиги (2) и сбросы (3). Q_{max} — максимальная величина объемной активности радона в разломной зоне; Q_{min} — минимальная величина объемной активности радона в крыльях разлома; M_D — ширина разломной зоны, соответствующая протяженности участка аномальной плотности трещин; M_Q — ширина разломной зоны, соответствующая протяженности участка аномальных величин объемной активности радона; K_Q — показатель радоновой активности.

* Ширина разломной зоны в трещиноватости, вычисленная по значению M_Q .

** Степень активности для разломов, располагающихся на платформе.

ломной зоны. Общий объем проведенных полевых работ составил: 653 пункта измерений на 55 профилях, не включая повторных контрольных замеров и объема работ методических экспериментов.

Результаты, полученные при обработке полевой информации по каждому из участков, иллюстрируются на примере разломной зоны м. Онтхой (см. рис. 2). Они содержат геоморфологические (топоплан или гипсометрические профили) и структурно-геологические (разрез, фотодокументация разломных сместителей, графики вариаций плотности трещин, круговые диаграммы трещиноватости и полей напряжений) материалы, а также результаты эманационной съемки в виде графиков изменения параметра Q по профилям.

Серия количественных параметров структурного и эманационного полей (например, величины максимумов и минимумов Q и D), ассоциирующихся с изучаемым разломом, отражается на графиках, подобных показанным на рис. 2. Определение ширины разломной зоны представляло некоторые сложности, особенно в случаях ее представленности несколькими частными сместителями, отраженными максимумами на графиках вариаций Q и D (см. рис. 2, *Ba*). Учитывая известные трудности выделения наибольших и фоновых значений в массивах геофизических данных, что в данном случае усугубляется существенными вариациями величины Q , при определении ширины разломной зоны использовался на-

и более простой из применяемых критериев. Аномальными, т.е. характеризующими интенсивно нарушенный субстрат разломной зоны, считались величины, превышающие среднее арифметическое для рассматриваемого профиля. В ряде случаев, когда аномальными значениями выделялись два или три сближенных и аналогичных по типу и внутреннему строению сегмента зоны (см. рис. 2, *Ba*), ее поперечный размер определялся по внешним границам крайних участков. Необходимость подобного объединения особенно очевидна для структурно-геологических данных, которые при документации непрерывного естественного или искусственного обнажения горных пород характеризуются большей плотностью наблюдений по сравнению с замерами Q (см. рис. 2, *Bв*).

Следует отметить, что при пересечении разлома несколькими профилями для его обобщенной характеристики значения однотипных количественных величин усреднялись. Именно такие оценки лежат в основе табл. 1, где представлены главные результаты проведенных исследований в количественной форме.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Радоновая активность разломных зон, определенная при помощи радиометров серии РРА путем прямых измерений параметра Q в подпочвенном воздухе, варьирует для изученных территорий в широких пределах. Среднее из максимальных значений объемной активности радона для рифтовых дизъюнктивов составляет 7247 Бк/м³, а для платформенных разломных зон — 5980 Бк/м³. Отдельные замеры величины Q изменяются от первых сотен Бк/м³ в ненарушенном горном массиве до 20261 Бк/м³ для платформенного разлома в долине р. Биликтуйка и 60335 Бк/м³ на одном из профилей в зоне Приморского разлома — наиболее крупного из изученных дизъюнктивов Байкальского рифта. Учитывая, что по оценкам предшественников Приморский сброс характеризовался наибольшей радоновой активностью по сравнению с Главным Саянским, Тункинским и Баргузинским разломами [Коваль и др., 2006], представленное выше значение на данном этапе исследований можно принять в качестве максимальной для разломов БРЗ величины Q , полученной по реализованной нами экспрессной методике.

Следует отметить, что на некоторых из участков минимальные значения объемной активности радона достигали четырех и более тысяч Бк/м³ (например, разлом № 17-2) и, таким образом, превышали максимальные величины из зафиксированных в осевых частях многих разломных зон на платформе и даже в рифте (см. табл. 1). Столь существенные вариации параметра Q вызваны различными факторами как связанными с разломной зоной (активность, характер внутреннего строения), так и обусловленными региональной спецификой (свойства источника излучения, тип геологического разреза, метеодинамика и др.), что создает определенные трудности для сопоставления объектов, располагающихся на разных территориях. В связи с этим в работе в основном использовался показатель радоновой активности разлома (K_Q), принадлежащий к группе относительных количественных характеристик, наиболее эффективных при сопоставлении разнородных данных [King et al., 1993; 1996; Moussa, El Arabi, 2003; Ioannides et al., 2003]. Он вычислялся как отношение максимальной из ассоциирующихся с дизъюнктивом величины параметра Q к его наименьшему значению, имеющему 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 Q в крыльях (см. табл. 1).

Для достижения цели исследований сравнивались значения показателя радоновой активности для разломов, составляющих разные группы по масштабу, типу и тектонической активности.

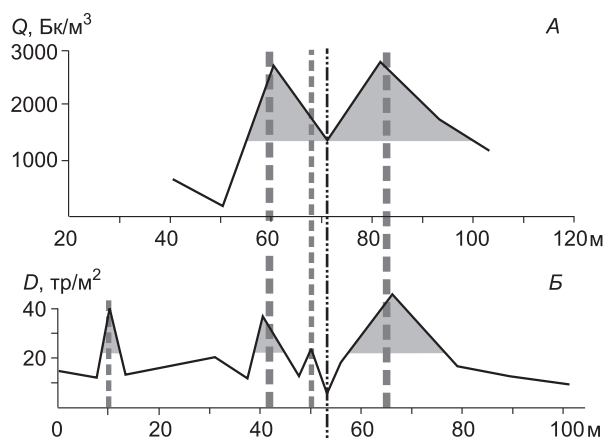
Деление разломов на ранги осуществлялось на основе оценки ширины зон их влияния в трещиноватости поскольку известно, что этот параметр коррелирует с длиной дизъюнктива. Непрерывные измерения плотности трещин ввиду недостаточной обнаженности горных пород были получены не для всех объектов исследования, поэтому анализировалась возможность использования для ранжирования данных радоновой съемки.

Сравнение графиков изменения параметров Q и D , построенных для одних и тех же разломов Западного Прибайкалья и Южного Приангарья, в целом подтверждают то, что эманационная активность разломных зон определяется степенью нарушенности субстрата в их пределах. Это отчетливо проявляется при сопоставлении структурных особенностей коренных выходов и данных эманационной съемки по близкорасположенным профилям (рис. 3). В таких случаях наиболее крупные из сместителей разломной зоны проявляются на участках аномальных значений Q в виде частных экстремумов: максимумов при заполнении сместителя трещиноватой разломной брекчией и минимумов, если тектонитом является глина трения. Эти наблюдения согласуются с данными предшественников [King et al., 1993] и объясняются тем, что проницаемость тектонита и содержание в нем глинистой фракции связаны обратно пропорциональной зависимостью [Шабынин, Рященко, 1991]. Границы отрезков профиля с аномальными значениями Q близко совпадают с границами зоны проявления сместителей и сопутствующей трещиноватости, плотность которой превышает значение, среднее для профиля. Количественные параметры, полученные

Рис. 3. Результаты структурно-геологических и эманационных исследований зоны Тугайского разлома (№ 13) в Приольхонье (Западное Прибайкалье).

A, B — вариации объемной активности радона (Q) и плотности трещин в 1 м^2 (D) вдоль профилей, пересекающих разломную зону в поперечном направлении (области аномальных значений закрашены серым цветом; штриховые линии — разноранговые сместители разломной зоны; штрихпунктирная линия — ось разломной зоны).

B — фотография обвала, приуроченного к разломной зоне: *1* — ось разломной зоны; *2, 3* — стенка отрыва в горизонтальной (*2*) и вертикальной (*3*) экспозициях; *4* — глыба гнейсов, вывалившаяся из берегового уступа.



для таких участков с хорошей согласованностью структурных и эманационных материалов, позволяют считать истинным усредненное по данным табл. 1 соотношение $M_D/M_Q \approx 0.7$, где M_Q и M_D представляют оценки ширины разломной зоны по размеру участков аномальных значений объемной активности радона и плотности трещин соответственно.

Отклонения от установленной закономерности, в той или иной мере проявляющиеся на большинстве изученных участков, обусловлены удаленностью профилей радоновой и структурной съемок. Неотчетливое подобие формы и величины аномалий объемной активности радона, выявленных для одной и той же разломной зоны на субпараллельных профилях эманационной съемки (см. рис. 2, *Вa, Вб*), или их недостаточное соответствие структурной картине в сравнительно близкорасположенном (15—20 м) обнажении горных пород объясняются высокой восприимчивостью поля радона к изменению проницаемости горного массива, которая имеет место даже на небольших расстояниях в связи с известной неравномерностью нарушения субстрата разломной зоны в продольном и поперечном направлениях [Семинский, 2003]. Эффект неудовлетворительного подобия может усиливаться при существенном различии в детальности проведения геофизических и структурно-геологических наблюдений.

Таким образом, интерпретация материалов радоновой съемки путем их детального сопоставления со структурно-геологическими данными на каждом из участков исследования позволила установить, что полученные результаты определяются спецификой отражения сложного строения разломных зон земной коры в газовых эманациях, крайне чувствительных к условиям их проявления. В целом разломная зона выделяется в поле радона в виде аномалии, поперечные размеры которой немного превышают ширину полосы повышенной плотности открытых трещин, по-видимому, за счет ее обрамления по периферии участками интенсивного проявления микротрещиноватости, также проницаемой для газа. Следовательно, недостаток оценок ширины разломных зон по аномальной плотности трещин при их делении на ранги может быть восполнен путем привлечения данных радоновой съемки, имеющих для всех изученных объектов.

Разломные зоны Западного Прибайкалья и Южного Приангарья были разделены на 4 масштабных ранга по соотношению параметров M_Q и M_D (рис. 4). При отсутствии оценки ширины какой-либо разломной зоны по вариациям плотности трещин в коренном выходе (M_D) для построения графика использовалось значение (см. табл. 1), полученное путем умножения величины M_Q , свойственной данному дизъюнктиву, на 0.7 в соответствии с определенным ранее соотношением двух рассматриваемых величин. Учитывая отчетливое обособление групп разломов (см. рис. 4), представленное деление изученных объектов по масштабу на ранги следует считать объективным и, более того (ввиду участия параметра M_Q), адаптированным к исследованию радоновой активности.

Для рифтовых дизъюнктивов результат ранжирования подтверждает известную для Приольхонья иерархическую соподчиненность разломов (см. рис. 1). Приморский разлом (№ 16-1) выходит за пределы 4-го ранга, так как при проведении работ зона его влияния, характеризующаяся самыми высокими значениями Q , не была пересечена полностью. Профили охватили лишь ее крайнюю юго-восточную часть, где располагается Сарминская палеосейсмодислокация [Хромовских, 1965], сформировавшаяся при одной из последних существенных подвижек по Приморскому разлому. К 4-му и 3-му рангам отно-

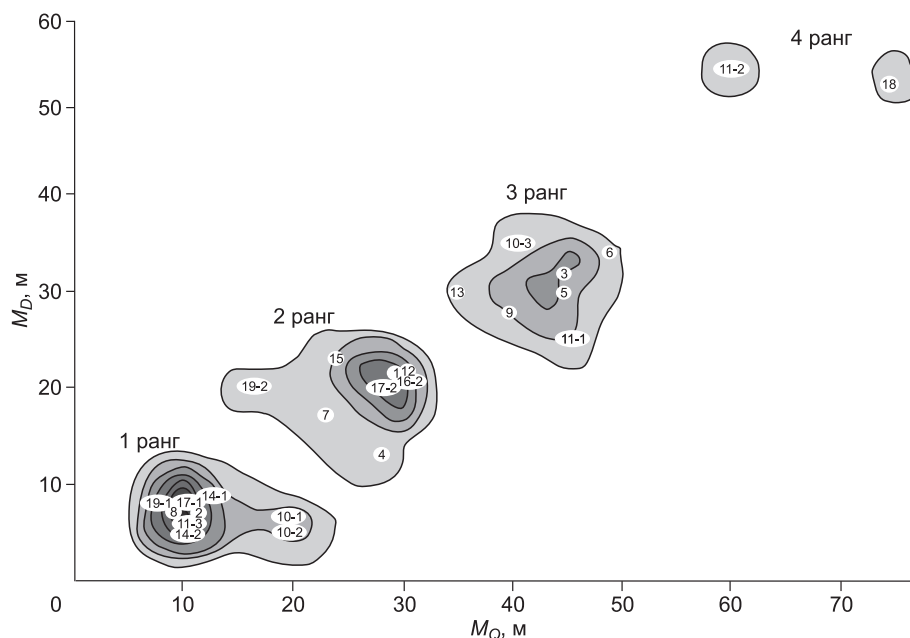


Рис. 4. Соотношения поперечных размеров разломных зон, определенных по данным структурно-геологических и эманационных измерений, позволяющие разделить объекты исследования по масштабу на 4 ранга.

Изолинии отражают распределение в координатном поле объектов, обозначенных индексами в соответствии с табл. 1.

сятся приосевые сместители крупных дизъюнктивных зон северо-восточного простирания: Кучелгинской (№ 18), Куркутской (№ 10-3, 11-1, 11-2), Тутаийской (№ 13). 2-й и 1-й ранги составляют поперечные северо-западные разломы (№ 17-1, 17-2), а также второстепенные сместители, принадлежащие к перечисленным выше и другим (например, Улирбинской) крупным разломным зонам северо-восточной ориентировки (№ 10-1, 10-2, 11-3, 12, 14-1, 14-2, 15, 16-2, 19-1, 19-2). Хорошая согласованность известных и полученных нами результатов ранжирования рифтовых разломов позволяет считать проведенное деление справедливым и для платформенных дизъюнктивов, так как их иерархия в рассматриваемом здесь диапазоне масштабов практически не изучена предшественниками. Отметим, что среди исследованных разломов Южного Приангарья нет дизъюнктивов 4-го ранга, а принадлежность к 3-му рангу в большинстве случаев обусловлена спецификой структурной выраженности: это широкие зоны сгущения малоамплитудных разрывов 2-го порядка, отражающие раннюю стадию развития дизъюнктива в осадочном чехле платформы.

Морфогенетический тип дизъюнктивов был определен по характеру наиболее значимых в кайнозойе подвижек, о котором свидетельствовали прямые наблюдения за смещением маркеров или результаты тектонофизического анализа статистических замеров трещин и разрывов вблизи разломных сместителей [Николаев, 1992; Семинский, 1994; 2005]. В целом объекты исследования делятся на две большие группы (см. табл. 1), для одной из которых (13 шт.) в кайнозойе доминировали сдвиговые перемещения, а для другой (13 шт.) — подвижки по падению, причем из разломов последней группы двенадцать являются сбросами. Сопоставление пространственной ориентировки дизъюнктивов различного морфогенетического типа (см. табл. 1, рис. 1) с известными парагенезисами разломов, развивающимися при сжатии, сдвиге и растяжении земной коры [Семинский, 2003], позволило сделать вывод, что приольхонские объекты радоновой съемки формировались в двух различных динамических обстановках. При левостороннем сдвиге вдоль границы между Сибирским и Забайкальским блоками на раннеорогенной стадии развития БРЗ [Мац и др., 2001; Delvaux et al., 1997] образовывались северо-восточные левые сдвиги (№ 10-1, 10-2, 11-2, 11-3, 19-1, 19-2), тогда как при растяжении в направлении СЗ-ЮВ на позднеорогенной стадии рифтогенеза по разломам северо-восточной ориентировки происходили сбросовые перемещения (№ 10-3, 11-1, 12, 13, 14-1, 14-2, 15, 16-2, 18), а по северо-западным разрывам — левые (№ 17-1, 17-2) или правые сдвиги трансформационного характера [Семинский, 2003]. Что касается приангарских объектов радоновой съемки, то они не могут быть объединены в парагенезисы, так как принадлежат к существенно удаленным друг от друга участкам земной коры.

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.

Таблица 2.

Характеристика платформенных разломных зон по степени активности, определенной при анализе комплекса косвенных признаков

Номер разлома (табл. 1)	Изменение фаций четверт. пород	Изменение мощностей четверт. пород	Уступ рельефа, крутой склон	Наличие оползней	Наличие древнего разлома в фундаменте	Приразломные изменения в четверт. породах	Сумма баллов	Степень активности
8	+	+	+	+	+	++	7	3
2	+	+?	+	—	+?	++	5	2
4	+	+?	+	—	+?	++	5	2
3	+	+	+	—	—	—	3	1
6	+?	+?	+	+	+	—	4	2
1	+	+	—	—	+	—	3	1
9	+	+	+	+?	+?	++	6	3
5	—	+?	—	—	+	—	1.5	1
7	+?	+?	—	—	—	—	1	1

Примечание. Знак «+?» присваивался в случае спорного присутствия рассматриваемого признака; в подсчете баллов такие признаки участвовали со значением 0.5. Степень активности — низкая (1), средняя (2), высокая (3).

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. Подход заключается в оценке на качественном уровне наличия или отсутствия для разлома следующих признаков: 1) резкое изменение фациального состава рыхлых четвертичных наносов; 2) резкое изменение мощности четвертичных отложений и почвы; 3) резкие уступы рельефа и относительно крутые участки склонов; 4) развитие оползневых процессов; 5) наличие древнего разлома в коренных породах; 6) наличие приразломных изменений молодых отложений (глинка трения, лимонитизация и т. п.). При наличии у разлома каждого из пяти первых признаков назначается один балл, а за последний признак — два балла. Суммирование баллов отражает условно-низкую (0—3 балла), среднюю (4—5 баллов) или высокую (6—7 баллов) степени активности. Оценка признаков по каждому из платформенных объектов проведена на основе анализа данных собственных детальных геоморфологических и структурно-геологических исследований, а также сведений о составе и мощностях рыхлых отложений, пересекаемых разломом вблизи коммуникаций, соединяющих города Иркутск и Саянск. Как видно из табл. 2, из 9 платформенных объектов 4 относятся к разломным зонам низкой, 3 — средней и 2 — высокой тектонической активности.

Дополнительным признаком справедливости проведенного деления являются результаты предыдущих исследований [Семинский и др., 2008], свидетельствующие о том, что в позднекайнозойских осадках разломные зоны 1-й группы проявлены в виде закономерно организованной сети системных трещин главным образом отрывной морфологии, а дизъюнктивы 2-й и 3-й групп — в виде зон сгущения отрывных и сколовых трещин, причем в последнем случае перемещения по сколам достигают 10 см. Последнюю группу представляют дизъюнктивы № 8, 9, разрывную структуру которых иллюстрирует рис. 5, составленный по материалам документации канавы, вскрывшей 5-метровый уступ в правом борту долины р. Биликтуйка [Семинский и др., 2006]. В стенке канавы задокументирована серия сбросовых разрывов, смещающих юрские песчаники и рыхлые отложения позднего кайнозоя в целом на 2.5 м. В пользу возможного импульсного характера движений по разломной зоне свидетельствует наличие как минимум двух горизонтов погребенных почв, смещенных вдоль разрыва, который располагается в основании уступа и характеризуется наиболее высокой проницаемостью для радона.

Предпринятый для платформенных разломов подход не мог быть применен для приольхонских объектов эманационной съемки, так как специфика их проявления (например, наличие тектонитов в коренных породах для всех разломов, с одной стороны, и локальное развитие четвертичных отложений, с другой) не дает возможности для равноценного освидетельствования по большинству из оцениваемых признаков. Вследствие этого разделение приольхонских объектов по тектонической активности носило приближенный характер и основывалось на двух косвенных признаках. Одним из них была упомянутая выше принадлежность дизъюнктивов к более ранней (сдвиговой) и современной (раздвиговой) стадиям рифтогенеза. Северо-восточные сдвиги (№ 10-1, 10-2, 11-2, 11-3, 19-1, 19-2) слабоактивны в эпоху современного растяжения, поскольку, согласно детальным структурным исследованиям, вблизи их сместителей сбросовые парагенезисы трещин и соответствующие кинематические маркеры выражены в мини-

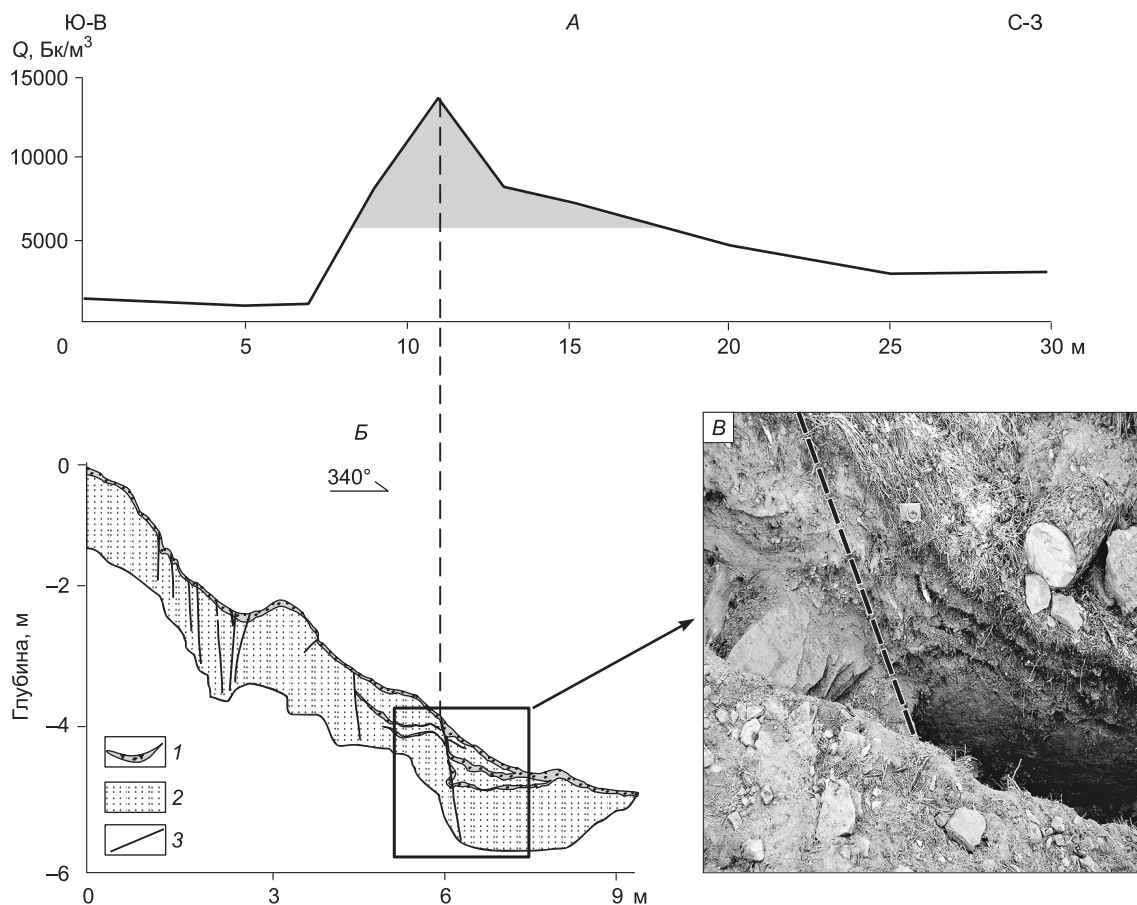


Рис. 5. Результаты структурно-геологических и эманационных исследований разломной зоны № 8, протягивающейся вдоль левого борта долины р. Биликтуйка в окрестностях г. Ангарск (Южное Приангарье).

A — вариации объемной активности радона (Q) вдоль профиля, пересекающего разломную зону в поперечном направлении (область аномальных значений закрашена серым цветом); *B, B* — геологический разрез (*B*), его фрагмент (*B*), изученный в канаве, которая вскрыла осевую часть разломной зоны, в том числе главный сместитель, выраженный максимумом объемной активности радона (тонкая штриховая линия) и смещающий черные почвенные горизонты (жирная штриховая линия) по типу сброса (документация А.С. Гладкова с упрощениями).

1 — почвенные горизонты, 2 — рыхлые позднечетвертичные отложения и элювий юрских песчаников, 3 — разрывы.

мальной степени. С другой стороны, среди разломных зон, обеспечивающих растяжение земной коры в направлении СЗ-ЮВ (№ 10-3, 11-1, 12, 13, 14-1, 14-2, 16-2, 18), правомерно выделить два объекта, для которых имеются свидетельства интенсивных перемещений наиболее молодого возраста. Первый из них (№ 16-2) представлен Сарминской палеосейсмодислокацией, образовавшейся при импульсных подвижках по сместителю Приморского сброса. Вторым объектом является зона Тугайского разлома (№ 13), ее недавняя активизация в режиме растяжения привела к вывалу части берегового уступа, располагавшейся между двумя перпендикулярными берегу частными сместителями, с образованием вдоль одного из них большой плоскости скольжения, выраженной стенкой отрыва в современном почвенном слое (см. рис. 3). Таким образом, в первом приближении изученные в Приольхонье дизъюнктивы могут быть условно разделены на 3 группы по степени тектонической активности на современном этапе рифтогенеза.

Итак, в результате проведенного исследования каждый из разломов, кроме радоновой активности, получил оценку в плане его морфогенезиса, степени тектонической активности и масштабного ранга. Для удобства сравнения каждая из трех тектонических характеристик представлена в табл. 1 числом от 1 до 3...4: в первом случае — это результат качественной, во втором — полуколичественной, а в третьем — количественной оценок. Обозначения представлены в примечании к табл. 1 и для морфогенетического типа не требуют пояснений. Степень активности разлома соответствует цифрам от 1 до 3, но эти оценки для платформы и рифта были получены разными способами, что учитывалось в ходе анализа результатов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление K_Q для разнотипных и разноранговых разломов Западного Прибайкалья и Южного Приангарья проводилось посредством определения его средних значений по отдельным выборкам из табл. 1, 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. Таким образом, точность вычисления средних значений по большему количеству объектов в первом случае компенсировалась «чистотой» выборки во втором. Несмотря на то, что сравнение осуществляется на уровне отдельных величин, а не статистического массива данных, результаты расчетов по выборкам представлены в виде графиков (рис. 6), наглядно иллюстрирующих установленные тенденции.

Как видно (см. рис. 6, *A, B*), у разломов с большей степенью тектонической активности K_Q выше. Специфика этой связи отчетливо выражена для всех видов выборок, причем к полной (линия 1) и частным (линии 6–11) из них в данном случае добавилось разделение на рифтовые и платформенные разломы (линии 2, 3), степень активности которых оценивалась по-разному. Во всех случаях K_Q для высокоактивных разломных зон в несколько раз превышает величины данного параметра у дизъюнктивов с низкой

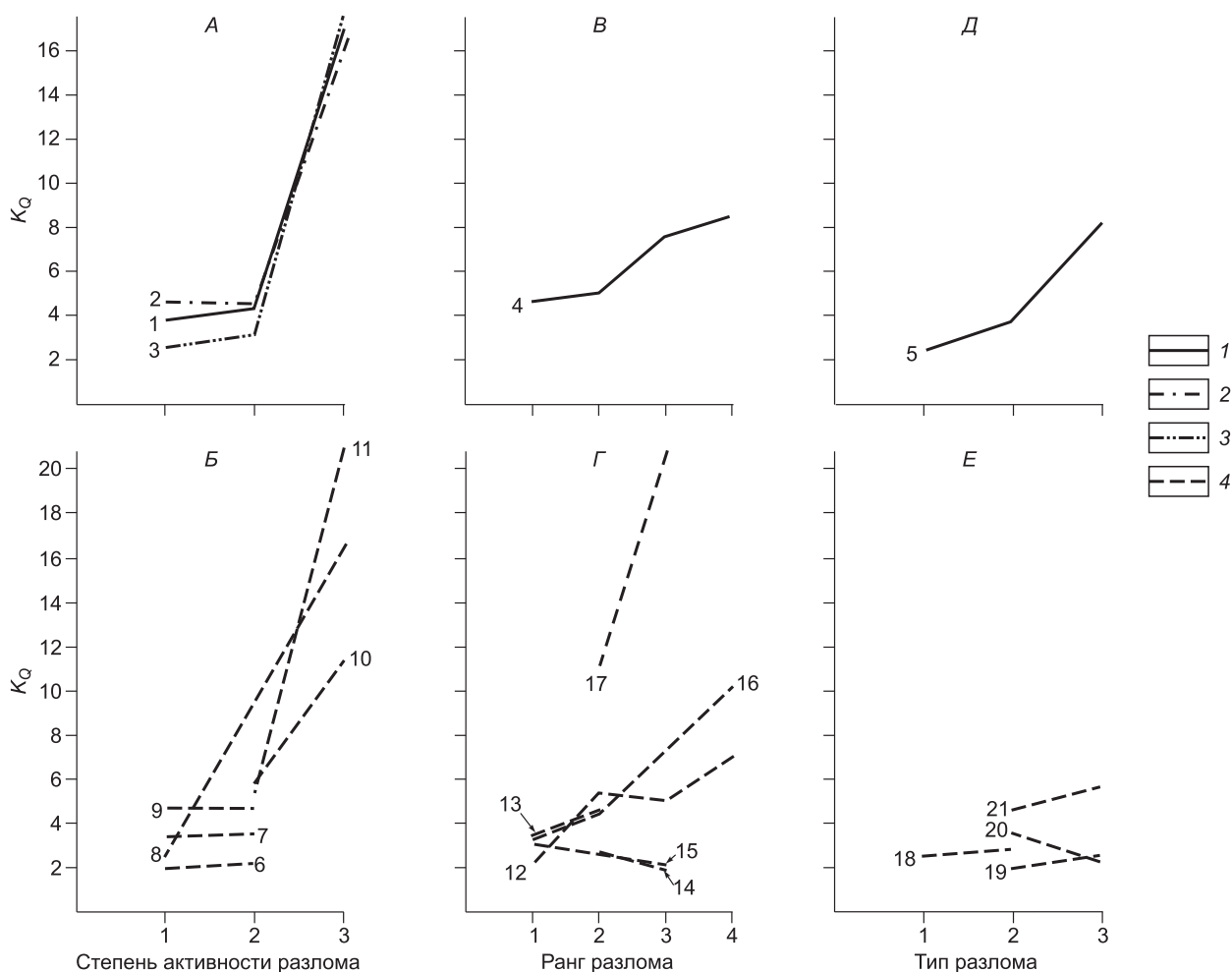


Рис. 6. Графики, иллюстрирующие основные тенденции изменений показателя (K_Q) объемной активности радона у разломов, отличающихся степенью тектонической активности (*A, B*), масштабным рангом (*B, Г*) и морфогенетическим типом (*Д, E*).

Линии, построенные для анализа рассматриваемых на графике величин по выборкам из табл. 1 параметров: 1 — всех разломов; 2 — рифтовых разломов; 3 — платформенных разломов; 4 — разломов, все характеристики которых, за исключением анализируемых, совпадают (линии 1—5 см. в тексте, 6 — разломы № 5, 6; 7 — № 10-1, 10-2, 11-3, 17-1, 19-1; 8 — № 3, 9; 9 — № 17-2, 19-2; 10 — № 12, 15, 16-2; 11 — № 10-3, 11-1, 13; 12 — № 10-3, 11-1, 12, 14-1, 14-2, 15, 18; 13 — № 17-1, 17-2; 14 — № 1, 5; 15 — № 2, 6; 16 — № 10-1, 10-2, 11-2, 11-3, 19-1, 19-2; 17 — № 13, 16-2; 18 — № 1, 7; 19 — № 3, 5; 20 — № 14-1, 14-2, 17-1; 21 — № 12, 15, 17-2).

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. При этом его справедливость определяется не столько небольшим увеличением относительного показателя K_Q (в десятые доли величины) при переходе от первой ко второй группе разломов, сколько существенно большими значениями Q у разломов средней активности (см. табл. 1), причем только в этом случае анализ абсолютных значений объемной активности радона свидетельствует о наличии устойчивой тенденции.

Графики, отражающие средние величины K_Q для разноранговых разломных зон (см. рис. 6, *B, Г*) по полной (линия 4) и частным (линии 12–17) выборкам рифтовых дизъюнктивов, свидетельствуют о возрастании радоновой активности с увеличением масштаба структур. Обратная тенденция характерна для двух частных выборок по платформенным разломам (линии 14, 15), но в них за каждый из рассматриваемых рангов отвечает один разлом при отличии K_Q всего на единицу. Следует ожидать, что после привлечения в дальнейшем достаточного количества данных в рассматриваемые выборки связь « K_Q —ранг разлома» и в этом случае окажется прямой.

Дополнительные данные необходимы и для определения средней величины K_Q у разломных зон, формирующихся при сжатии. В то же время здесь увеличение радоновой активности от взбросов к хорошо представленным в выборках сдвигам и сбросам (см. рис. 6, линия 5) отчетливо согласуется с результатами работ предшественников [Уткин и др., 2006], которые свидетельствуют о большей интенсивности радоновых эманаций в областях растяжения по сравнению с участками сжатия. Проницаемость разломных зон при прочих равных условиях должна уменьшаться в ряду дизъюнктивных структур, формирующихся при растяжении, сдвиге и сжатии земной коры.

Таким образом, радоновая активность возрастает с увеличением масштабного ранга и степени тектонической активности разломной зоны; она больше у сбросов, чем у сдвигов. Об этом отчетливо свидетельствует анализ каждой из трех рассмотренных зависимостей в отдельности, а также более высокое положение на графиках, построенных по частным выборкам (см. рис. 6, *B, Г, E*), тех линий, которые соответствуют сбросам, более крупным зонам, разломам с высокой тектонической активностью, рифтовым дизъюнктивам по сравнению с платформенными. Следовательно, представленные зависимости следует считать однозначно установленными для разломных зон Байкальского рифта и смежной платформенной территории на уровне устойчивых тенденций. Одной из задач дальнейших исследований является проведение радоновой съемки для большего числа природных объектов с последующим уточнением характера рассмотренных зависимостей, которые для ширины разломных зон и степени их тектонической активности могут приобрести строгую аналитическую форму.

Эта задача не является тривиальной, поскольку уже сейчас очевидно, что вклады рассматриваемых факторов в радоновую активность разломных зон неодинаковы. Тектоническая активность имеет больший вес относительно двух других характеристик. Например, наиболее тектонически-активные дизъюнктивы платформы и рифта (№ 8, 9, 13, 16-2) характеризуются очень высокими значениями показателя K_Q при сравнительно узкой ширине участка связанной с ними эманационной аномалии, что явно противоречит прямой связи ранга дизъюнктива с его радоновой активностью. Косвенным признаком определяющей роли тектонической активности является и то, что только с этой характеристикой разлома отчетливо связан показатель Q , несмотря на его существенную изменчивость на разных участках измерений. Кроме того, установленные тенденции возрастания K_Q при увеличении ранга дизъюнктива и в ряду «взбросы—сдвиги—сбросы» можно в определенной степени считать обусловленными тектонической активностью. Она, если судить по скорости перемещений, при прочих равных условиях больше у крупных разломов, чем у мелких, а также у сбросов по сравнению со сдвигами и взбросами, что вызвано дополнительным воздействием гравитационного фактора [Стром, Никонов, 1997; Семинский и др., 2005]. Добавочная нагрузка от веса всяческого крыла разлома не играет структурообразующей роли при сдвиге, ускоряет процесс разрушения в условиях растяжения и замедляет его при сжатии.

Следовательно, показатель радоновой активности в существенной степени отражает именно тектоническую активность. Его использование повышает эффективность радоновой съемки, позволяя более точно оценивать тектоническую активность дизъюнктива по сравнению с определениями, базирующимися лишь на абсолютных величинах Q . В то же время показатель K_Q отвечает за тектоническую активность только в той мере, в которой она обуславливает проницаемость горных пород в процессе деформирования. Очевидно, что разломные зоны в этом плане не являются однородными, и при прочих равных условиях на фоне увеличения радоновой активности в областях интенсивной деструкции будут иметь место участки, слабопроницаемые для газа вследствие локального сжатия или заполнения, например, глиной трения. В связи с этим адекватная оценка тектонической активности дизъюнктива, по данным о его радоновой активности, возможна только при достаточном количестве точек измерения, а также знании общих закономерностей нарушенности субстрата разнотипных разломных зон.

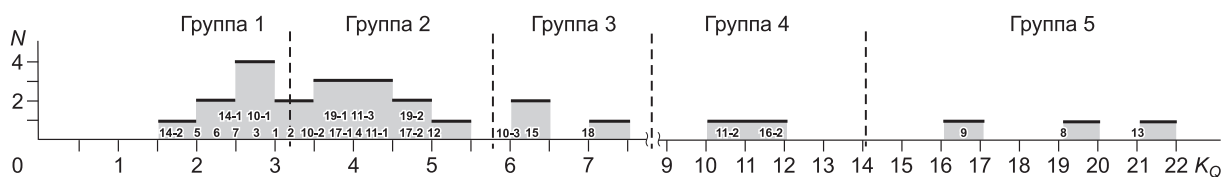


Рис. 7. Распределение изученных разломов по величинам показателя радоновой активности (K_Q) на 5 групп (индексы разломов даны в соответствии с табл. 1).

Имеющиеся материалы позволяют разделить исследованные на платформе и в рифте разломы по значениям показателя K_Q на 5 групп (рис. 7), что будет отражать их тектоническую активность с определенными вкладами за счет ранга, морфогенезиса и, по-видимому, других еще не изученных факторов. Показатели радоновой активности больше 5 имеют 8 разломов, образующих 3, 4 и 5-ю группы. В Приольхонье к ним относятся самые протяженные сбросы (см. рис. 1), ограничивающие главные впадины региона и, таким образом, играющие на современном этапе рифтогенеза основную роль в растяжении земной коры. Это Приморский разлом для котловины Малого моря, а также разломы № 10-3, 11-2, 13, 15, 18 для крупных впадин Приольхонья, подчеркиваемых в окрестностях прол. Ольхонские Ворота заливами Мухор, Куркут и Тутайский.

Среди платформенных разломов к наиболее активным относятся разломы № 8, 9, причем они попадают в 5-ю группу. Оба дизъюнктива располагаются в обрамлении Китайской впадины (см. рис. 1), активно развивающейся в позднем кайнозое, судя по грабенообразной форме, наличию приподнятых и опущенных (судя по вариациям мощности осадков от 5 до 60 м) блоков в днище, а также известным деформациям железнодорожных мостов в долине р. Китай, массовые проявления которых трудно объяснить лишь воздействием инженерно-геологических процессов. Наличие крутого 5-метрового уступа и смещений почвенных горизонтов, выявленных для одной из рассматриваемых разломных зон (№ 8), в совокупности с определенными для них высокими значениями K_Q (превышающими величины однотипных показателей у сейсмоактивных разломов [King et al., 1993, 1996; Ioannides et al., 2003]) свидетельствуют, что тектоническая активизация в обрамлении Китайской впадины носила импульсный характер, обуславливая в данном регионе рассеянную сейсмичность, характерную для южного края Сибирской платформы в целом [Семинский, Радзиминович, 2007].

Основная часть изученных разломов (18) составляет 2 первые группы, для которых пиковые значения объемной активности превышают минимальные величины Q в крыльях не более чем в 5 раз. В Приольхонье это сравнительно мелкие сбросы и сдвиги, осложняющие в большинстве случаев крылья крупных сбросов (группы 3—5). На платформе к группам 1 и 2 относятся все изученные дизъюнктивы за исключением двух уже упомянутых разломов 5-й группы, что и отражает существенно меньшую тектоническую активность этой территории по отношению к рифту. Более того, роль тектонического воздействия при активизации платформенных дизъюнктивных структур 1-й группы ($K_Q < 3$) может быть соизмерима с влиянием флюидодинамических и космогенных факторов, так как в наиболее молодых слабосцементированных осадках эти объекты представлены зонами проявления системных, но главным образом отрывных по морфологии трещин. Зоны подобного типа в соответствии с предложенной ранее терминологией [Lombardi et al., 1998] в большей мере относятся к геохимически- (а не тектонически-) активным.

Итак, оценка тектонической активности дизъюнктивов на базе величин K_Q отчетливо согласуется с имеющимися данными по современной геодинамике платформенного и рифтового регионов. 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. В то же время возможности и недостатки его использования для определения тектонической активности разломных зон ввиду многообразия проявлений этих сложных структур в земной коре будут оценены в полной мере только после осуществления широкомасштабных работ, основанных на опыте исследований, представленных в данной статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения детальных исследований на 19 эталонных участках отработана экспрессная методика замеров концентрации подпочвенного радона приборами серии РРА для условий юга Восточной Сибири с акцентом на измерениях в разломных зонах земной коры. В соответствии с данной методикой для большой группы разнотипных и разноранговых дизъюнктивов получены инструментальные

оценки объемной активности радона (Q), характеризующие центральную часть Байкальского рифта и смежную территорию Сибирской платформы. Параметр Q варьирует от первых сотен Бк/м³ в слабонарушенных массивах горных пород к ≈ 20000 Бк/м³ в зоне влияния наиболее активного из изученных платформенных разломов и до ≈ 60000 Бк/м³ у главного сместителя Приморского сброса, представляющего юго-западное плечо Байкальского рифта.

Разломы в эманационном поле выделяются в виде широких зон аномальных значений объемной активности радона, поперечные размеры которых примерно в 1.4 раза больше ширины зоны повышенной трещиноватости, сформировавшейся в результате перемещения крыльев. Несмотря на осложняющее влияние нетектонических факторов и методические трудности сопоставления эманационных и структурных данных (удаленность участков наблюдения, разная детальность съемок и др.), установлено, что в целом поле радона отражает главные закономерности строения разломной зоны. Обобщенный поперечный разрез линейно вытянутой аномалии характеризуется неравномерным повышением радоновой активности от периферии к осевой части, на фоне которого обособляется серия максимумов и минимумов, отражающих положение отдельных сместителей с проницаемыми (брекчия дробления) или непроницаемыми (глинка трения) для газов тектонитами.

Ввиду существенной зависимости абсолютных значений объемной активности радона от нетектонических факторов местного значения (интенсивность первичного излучения, тип геологического разреза, метеодинамика и др.) для эманационных исследований разломных структур эффективна безразмерная величина — показатель радоновой активности (K_Q), представляющий отношение максимального значения Q в разломной зоне к минимальной величине данного параметра в крыльях. Согласно результатам сопоставления разнотипных дизъюнктивов, K_Q больше у сбросов по сравнению со сдвигами и возрастает с увеличением масштабного ранга и степени тектонической активности разлома, причем последний фактор вносит наибольший вклад в его вариации.

Дизъюнктивы центральной части Байкальского рифта и смежной территории Сибирской платформы могут быть разделены по радоновой активности на 5 групп, при этом их большая часть (группы 1, 2) имеет K_Q не более 5. Разломы, у которых максимальные значения Q превышают величину данного параметра в крыльях в ≈ 7 (3-я группа), ≈ 10 (4-я группа) и ≈ 20 (5-я группа) раз, являются наиболее крупными продольными сбросами в бортах разноранговых рифтовых котловин. В краевой части платформы при существенном преобладании низкоактивных зон 1-й и реже 2-й групп выявлены единичные разломы, относящиеся к 5-й группе по величине K_Q . Это в совокупности с их выраженностью в позднечетвертичных отложениях в виде разрывов со смещениями в первые 10 см свидетельствует о локальном проявлении высокоактивных блоковых подвижек по краю древнего кратона, генетически связанных с процессом деструкции в смежном рифте.

Полученные результаты открывают новые возможности применения радоновой съемки для выделения разломных зон, картирования их внутренней структуры и оценки степени тектонической активности. Значимость подобных работ для геодинамических реконструкций в регионах с разной интенсивностью блоковых перемещений и обнаженностью горных пород не вызывает сомнений, однако их эффективность напрямую связана с результатами дальнейших углубленных исследований поля радона, ассоциирующегося с разнотипными разломами и зонами земной коры.

Авторы благодарны к.г.-м.н. В.А. Боброву, д.г.-м.н. А.И. Непомнящих, ценные рекомендации которых были использованы при работе над заключительным вариантом статьи. Особую благодарность авторы выражают к.г.-м.н. А.В. Черемных за активную помощь в сборе и обработке полевого материала по трещиноватости и разломам Прибайкалья, а также к.г.-м.н. А.С. Гладкову и Е.И. Когуту за предоставление авторских материалов соответственно документации канав и топографии рельефа на отдельных участках исследования разломов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 07-05-00061-а, 08-05-98062-Сибирь) и СО РАН (проект № 6 программы ОНЗ-7).

ЛИТЕРАТУРА

Бобров А.А. Об особенностях влияния метеоусловий на объемную активность радона в некоторых регионах юга Восточной Сибири // Строение литосферы и геодинамика. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2007, с. 215—216.

Бобров А.А. Исследование объемной активности радона в разломных зонах Приольхонья и Южного Приангарья: методика и предварительные результаты // Изв. Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2008, вып. 6 (32), с. 124—129.

Войтов Г.И. Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически-активной Средней Азии // Физика Земли, 1998а, № 1, с. 27—38.

- Войтов Г.И.** Прогнозное значение радиевых и радоновых полей подземных водно-газовых систем Средней Азии // *Физика Земли*, 1998б, № 7, с. 72—84.
- Дехандшуттер Б., Бобров В.А., Хус Р., Астахов Н.Е., Андросова Н.В., Попов Ю.П.** Радоновые аномалии как показатель активности Западно-Саянского разлома в северной части Телецкого озера (Горный Алтай) // *Геология и геофизика*, 2002, т. 43 (2), с. 128—141.
- Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Саньков В.А., Ясеновский А.А., Андрулайтис Л.Д.** Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны (ртуть, радон и торон) // *Докл. РАН*, 2006, т. 409, № 3, с. 389—393.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М.** Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 252 с.
- Методика** экспрессного измерения объемной активности ^{222}Rn в почвенном воздухе с помощью радиометра радона типа РРА. Рекомендация. М., НПП «Доза», 2004, 16 с.
- Николаев П.Н.** Методика тектонодинамического анализа. М., Недра, 1992, 295 с.
- Овсученко Н.И.** Изучение современной активности тектонических нарушений в сейсмоопасных районах (на примере нефтепровода на Северо-Западном Кавказе) // *Трубопроводный транспорт. Теория и практика*, 2005, № 2, с. 8—14.
- Семинский К.Ж.** Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // *Геология и геофизика*, 1994, т. 35 (9), с. 112—130.
- Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 243 с.
- Семинский К.Ж.** Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // *Геофизический журнал*, 2005, т. 27, № 1, с. 85—96.
- Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б.** Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис // *Физика Земли*, 2007, № 9, с. 18—30.
- 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.
- 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.
- 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.
- Стром А.Л., Никонов А.А.** Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // *Физика Земли*, 1997, № 12, с. 55—67.
- Уткин В.И., Мамыров Э., Канн М.В., Кривашеев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н.** Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // *Физика Земли*, 2006, № 9, с. 61—70.
- Хромовских В.С.** Сейсмогеология Южного Прибайкалья. М., Наука, 1965, 122 с.
- Шабынин Л.Л., Рященко Т.Г.** Состав и свойства рыхлого заполнителя тектонических нарушений // *Инженерная геология*, 1991, № 6, с. 56—63.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V.** Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // *Tectonophysics*, 1997, v. 282, p. 1—38.
- Guerra M., Lombardi S.** Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy) // *Tectonophysics*, 2001, v. 339, p. 511—522.
- Inceoz M., Baykara O., Aksoy E., Dogru M.** Measurements of soil gas radon in active fault systems: a case study along the North and East Anatolian fault systems in Turkey // *Radiation Measurements*, 2006, v. 41, p. 349—353.
- Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A., Karakala E.** Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones // *Appl. Rad. Isot.*, 2003, v. 59, p. 205—213.
- King C.-Y., Zhang W., King B.-S.** Radon anomalies on three kinds of faults in California // *Pure Appl. Geophys.* 1993, v. 141, № 1, p. 111—124.
- King C.-Y., King B.-S., Evans W.C., Zhang W.** Spatial radon anomalies on active faults in California // *Appl. Geochem.*, 1996, v. 11, p. 497—510.

Lombardi S., Quattrocchi F., Fytikas M. Geochemical seismic zonation: a multidisciplinary approach using fluid-geochemistry // ENV4-CTT96-0291 (GSZ), 1998.

Moussa M.M., El Arabi A.-G.M. Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safaga road, Eastern Desert, Egypt // Radiation Measurements, 2003, v. 37, № 3, p. 211—216.

Schery S.D., Geaddert D.H., Wilkening M.H. Transport of radon from fractured rocks // J. Geophys. Res., 1982, v. 87, № B4, p. 2969—2976.

Рекомендована к печати 2 декабря 2008 г.

Г.Н. Аношиным

Поступила в редакцию

8 июля 2008 г.