

Технология геологической разведки

УДК 550.835.24+551.243.8

ЗОНА ХУСТАЙСКОГО РАЗЛОМА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ МОНГОЛИЯ): РЕЗУЛЬТАТЫ ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

К.Ж. Семинский¹, А.А. Бобров², С. Дэмбэрэл³, Ю.П. Бурзунова⁴, Д. Мунгунсүрен⁵,
М. Оюун-Эрдэнэ⁶, А.К. Семинский⁷, М. Билгуун⁸, А.А. Тарасова⁹

^{1,2,4,7,9}Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^{3,5,6,8}Исследовательский Центр по астрономии и геофизике МАН, 210351, Монголия, г. Улан-Батор, Баянзүрх дүүрэг, Маахуур толгой, 5-р хороо, ШУА-ийн 7-р байр.

Отмечены особенности, изложены результаты эманационной съемки, проведенной с целью картирования разломов земной коры, которые сопровождаются широкой зоной проявления второстепенных разрывов и трещин, связанных с формированием главного сместителя.

Объектом исследований выбран сейсмоактивный разлом Хустай, располагающийся вблизи столицы Монголии, окрестности которой по ландшафтно-климатическим условиям благоприятны для проведения радонометрической съемки. Эманационная съемка осуществлена по 9 профилям, пересекающим разломную зону на отрезке длиной 70 км и имеющим общую протяженность 63 км (≈ 1000 пунктов опробования). Определение объемной активности почвенного радона в каждом пункте измерения проводилось с использованием комплекта оборудования «Камера-01», чувствительность которого находится в диапазоне $0,27 \pm 0,03$ Бк-1с-1, а пределы относительной погрешности составляют не более $\pm 30\%$.

Обработка полученных данных позволила установить форму, размеры, интенсивность и контрастность аномалии почвенного радона, связанной с Хустайским разломом. Анализ выявленных характеристик свидетельствует, что главной особенностью приразломной аномалии является ее неоднородное строение, определяющееся не геохимическим фактором, а геодинамической активностью крупного дизъюнктива на современном этапе тектогенеза. Таким образом, пространственная неравномерность строения радоновой аномалии должна быть свойственна любому активному дизъюнктиву земной коры. Это осложняет поиски проявлений урана, контролируемых разломами, а также урановых месторождений иного типа, локализующихся в геодинамически активных регионах. Повышение эффективности эманационной съемки, применяемой при поисковых работах, возможно путем изучения и систематизации «геодинамических» аномалий и комплексирования с другими методами прикладной геофизики.

Ключевые слова: эманационная съемка; разлом; аномалия радона; геодинамическая активность.

¹Семинский Константин Жанович, зав. лабораторией тектонофизики, доктор геолого-минералогических наук, тел.: (3952) 403027, e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminskiy Konstantin, Head of the Laboratory of Tectonophysics, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, tel.: (3952) 403027, e-mail: seminsky@crust.irk.ru

²Бобров Александр Анатольевич, научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, тел.: (3952) 423027, e-mail: alexbob@crust.irk.ru

Bobrov Alexander, Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, tel.: (3952) 423027, e-mail: alexbob@crust.irk.ru

³Дэмбэрэл Содномсамбуу, кандидат физико-математических наук, директор, тел.: 897611458849, e-mail: demberel@rcag.ac.mn

Demberel Sodnomsambuu, Candidate of Physico-Mathematical sciences, CEO, tel.: 897611458849, e-mail: demberel@rcag.ac.mn

⁴Бурзунова Юлия Петровна, ведущий инженер, тел.: (3952) 423027, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

Burzunova Yulia, Leading Engineer, tel.: (3952) 423027, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

⁵Мунгунсүрен Дашдондог, научный сотрудник, тел.: 897611458849.

Mungunsuren Dashdondog, Researcher, tel.: 897611458849.

⁶Оюун-Эрдэнэ Монхор, научный сотрудник, тел.: 897611458849.

Oyun-Erdene Monhor, Researcher, tel.: 897611458849.

⁷Семинский Александр Константинович, аспирант лаборатории тектонофизики ИЗК, тел.: (3952) 423027, e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

Seminskiy Alexander, Postgraduate, tel.: (3952) 423027, e-mail: zzzsancheszzz@gmail.com

⁸Билгуун Мэнд, научный сотрудник, тел.: 897611458849.

Bilguun Mend, Researcher, tel.: 897611458849.

⁹Тарасова Анастасия Алексеевна, аспирант, тел.: 89500656971, e-mail: tarasova2712@gmail.com

Tarasova Anastasia, Postgraduate, tel.: 89500656971, e-mail: tarasova2712@gmail.com

HUSTAI FAULT AREA (CENTRAL MONGOLIA): EMANATION SURVEY RESULTS

K.Zh. Seminskiy, A.A. Bobrov, S. Demberel, Yu.P. Burzunova, D. Mungunsuren, M. Oyun-Erdene, A.K. Seminskiy, M. Bilguun, A.A. Tarasova

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Research Center for Astronomy and Geophysics MAN, Bayanzurh duureg, Maahuur tolgoi, 5-r horoo, Shua-iyn 7-r bair, Ulan Bator, 210351, Mongolia.

The paper describes the results and features of the emanation survey performed for mapping the crustal faults that are accompanied with the wide manifestation zone of secondary fractures and faults associated with the formation of the main fault plane.

The object of research is the seismically active fault of Hustai located close to the capital of Mongolia, landscape and climatic conditions of which are favorable for radon method application. Emanation survey has been carried out by 9 profiles that intersect the fault zone on a 70 km-long interval and have the total length of 63 km (≈ 1000 sampling points). Volumetric activity of soil radon at each measurement site has been determined using a set of equipment "Camera 01", whose sensitivity is in the range of $0,27 \pm 0,03$ Bq-ls-1, and relative error limits do not exceed $\pm 30\%$.

Processing of the obtained data allowed to estimate the shape, size, intensity and contrast of the soil radon anomaly associated with the Hustai fault. Analysis of the identified characteristics proves that the main feature of the fault-line anomaly is its inhomogeneous geology determined rather by geodynamic activity of the large fault at the current stage of tectogenesis than by a geochemical factor. Thus, the spatial non-uniformity of the radon anomaly structure should be characteristic of any active fault of the earth crust. This complicates the search for fault-controlled uranium manifestations, as well as other types of uranium deposits localized in geodynamically active regions. The efficiency of emanation survey used in exploratory work can be improved through studying and systematization of "geodynamic" anomalies and integration with other methods of applied geophysics.

Keywords: emanation survey; fault; radon anomaly; geodynamic activity.

Введение. Метод эманационной съемки, как известно, является неотъемлемой частью работ, выполняемых при поисках урановых месторождений. Среди их типового разнообразия имеет место группа рудных объектов, контролируемых разломными зонами земной коры [4], для которых аномальная радоновая активность кроме наличия урановой минерализации (геохимический фактор) может быть обусловлена тектоническими подвижками (геодинамический фактор). Перемещения блоков приводят к дроблению породного массива, что в связи с наличием небольших содержаний урана в любой породе создает (за счет увеличения проницаемости и площади эманирования) аномалии радона над разломами земной коры, активными на современном этапе тектогенеза. Как следствие, для повышения эффективности эманационной съемки, направленной на поиски урановых месторождений в разломных зонах, необходимо иметь представления о закономерностях строения аномалий, обусловленных геодинамической активностью.

Главной задачей проведенного исследования было установить особенности пространственных вариаций размеров, интенсивности, контрастности и формы эманационной аномалии, ассоциирующейся с зоной крупного разлома земной коры в связи с его активностью на современном этапе тектогенеза. В качестве объекта исследований выбран сейсмоактивный разлом Хустай [11], располагающийся вблизи столицы Монголии – г. Улан-Батора, окрестности которого по ландшафтно-климатическим условиям благоприятны для проведения эманационной съемки [3, 13].

Объект и методика эманационных измерений. Разлом Хустай располагается в правом борту (ближнего к Улан-Батору) северо-восточного отрезка долины р. Толы (рис. 1). Он состоит из серии сегментов у подножья одноименного хребта, которые, подставляя друг друга по простиранию, образуют выпуклую к северо-западу дугу. Сместитель в пределах большинства сегментов трассируется небольшими, но явно выраженными уступами в рельефе,

которые отчетливо фиксируются на космоснимке. Судя по геолого-структурным наблюдениям, он круто наклонен к юго-востоку, занимая на отдельных участках практически вертикальное положение. Зона влияния сместителя Хустайского разлома состоит из серии разноориентированных разрывов 2-го порядка, располагающихся в хребтовой части территории и, как следствие, отчетливо отражающихся в виде линеаментов рельефа. Кроме разрывов, субпараллельных главному сместителю, в разломной зоне широко распространены разноранговые поперечные нарушения, ограничивающие его сегменты и являющиеся причиной образования постоянных и временных водотоков, выходящих в долину р. Толы. Зона Хустайского разлома активна на позднекайнозойском этапе тектогенеза. Об этом свидетельствуют палеодислокации сейсмогенного происхождения, приуроченные к одному из сегментов главного сместителя (см. рис. 1, район профиля b3) [10]. Современная активность про-

является в виде слабых сейсмических событий ($M \leq 4,5$), которые в последнее десятилетие концентрируются на двух участках разломной зоны (см. рис. 1, районы профилей ПР рег. b2 и b4–b5).

Радоновая активность Хустайской разломной зоны была исследована посредством профильной эманационной съемки, проведенной с разными уровнями детальности. Восемь профилей (см. рис. 1, ПР b1–b8) протяженностью в первые километры были пройдены для изучения эманационной аномалии, связанной с зоной главного сместителя Хустайского разлома. Профили пересекли полностью его разноориентированные сегменты с расстояниями между пунктами опробования 40 и 20 м, соответствующими краям и центральной части. Кроме того, эманационные измерения были проведены в пределах регионального профиля (44 км), что позволило выделить латеральные границы радоновой аномалии, связанной с Хустайской разломной зоной в целом (см. рис. 1). Он пересек долину р. Толы и

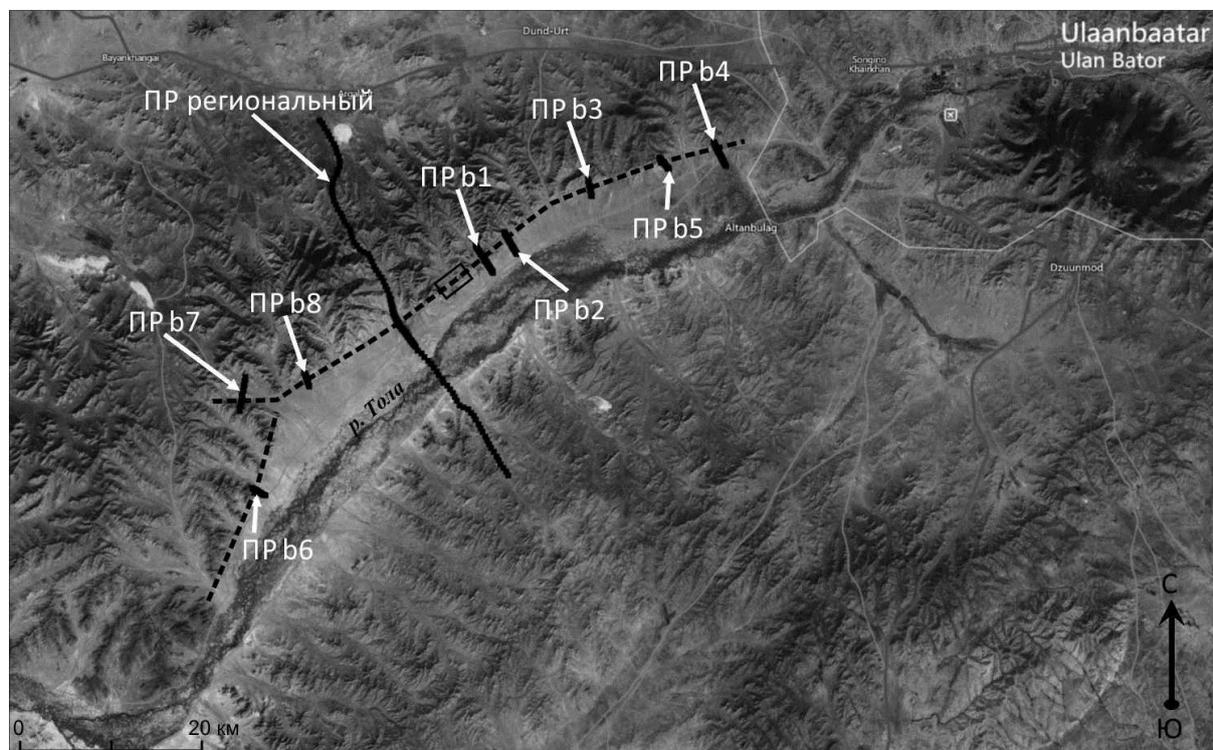


Рис. 1. Положение на космоснимке профилей эманационной съемки (черный пунктир – сместитель Хустайской разломной зоны)

Хустайский хребет с расстоянием между пунктами измерений в 500 м и с той же детальностью опробования, что и у главного сместителя (по ПР b1–b8).

Определение объемной активности почвенного радона Q в каждом пункте измерения проводилось с использованием комплекта оборудования «Камера-01». Его основными элементами являются блок детектирования (БДБ-13), адсорбционные колонки с активированным углем (адсорберы) и портативный компьютер с программным обеспечением РАДОН. Для определения величины Q адсорбер помещался в пункте опробования в грунт на глубине 5–10 см. Углубление с адсорбером перекрывалось сверху крышкой диаметром 20 см, предохраняющей уголь от переувлажнения и препятствующей выходу радона в атмосферу. По истечении двух суток адсорбер извлекался из грунта, а находящийся в нем уголь, насыщенный радоном, подвергался исследованию в детекторе БДБ-13, соединенном с компьютером. Результаты измерений вместе с серией дополнительных параметров (масса адсорбера до и после экспонирования, времена установки и снятия адсорбера и др.) использовались для расчетов в программе РАДОН. Итогом вычислений являлась интегральная (средняя за двое суток) абсолютная величина Q в пункте опробования. Чувствительность измерительного канала комплекса «Камера-01» с блоком детектирования бета-излучения типа БДБ-13 находится в диапазоне $0,27 \pm 0,03 \text{ Бк}^{-1} \text{ с}^{-1}$, а пределы допустимой относительной погрешности составляют не более $\pm 30\%$.

Как известно, объемная активность радона определяется совокупным воздействием геодинамического, геохимического, метеорологического и других факторов. Данное исследование ориентировано на анализ геодинамического фактора, который определяет строение разлома и характер его активности, кратко представленные для Хустайской разломной зоны ранее. Для

того чтобы снизить влияние на величину Q других факторов, экспонирование угольных адсорберов проводилось в сухую погоду в одинаковых ландшафтных условиях степной зоны, характеризующейся наличием почвенного покрова мощностью 5–25 см. Измерения проводились в 2013 и 2014 гг. в течение одного сезонного периода (июль – сентябрь), причем эманационная съемка каждого отдельного профиля осуществлялась одновременно, чтобы исключить влияние на измерения метеорологического фактора. На примере одного из профилей была оценена роль геохимического фактора в формировании аномальных значений параметра Q , которые являются самыми высокими из величин, определенных в настоящее время для территории Центральной Монголии. С этой целью методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектропии (ИСП-МС) было определено содержание урана в образцах скальных пород, отобранных из-под слоя почвы в пунктах, для которых радоновые измерения показали аномально высокие (20200 Бк/м^3) и самые низкие значения Q . Полученные величины не имеют значимых отличий, что свидетельствует об обусловленности радоновой аномалии разрывообразованием в активной разломной зоне, а не геохимией скальных пород на рассматриваемом участке.

Отмеченные особенности методики исследований позволили в существенной степени уравнивать или учесть воздействие негеодинамических факторов на выход радона. Это повышает достоверность изучения влияния процесса разрывообразования в разломной зоне Хустай на распределение абсолютных концентраций почвенного радона Q вдоль одного профиля. Для сопоставления радоновой активности различных сегментов главного сместителя или отдельных разломов, когда значительно возрастает влияние региональной и сезонной специфики эманаций, использо-

вался относительный показатель, способ расчета которого представлен далее.

Фактический материал и особенности его обработки. В целом на девяти профилях эманационной съемки, созданных в Хустайской разломной зоне, было получено несколько сотен определений параметра Q , не считая дублирующих измерений. Эта количественная информация послужила основой для выявления и параметрической характеристики эманационных аномалий, связанных с разломной зоной в целом (рис. 2) и зоной ее главного сместителя (рис. 3). Согласно опыту предыдущих исследований [2], аномальными считались значения Q , которые превышают среднее арифметическое Q_{cp} величин активности почвенного радона, полученных для профиля. Ширина радоновой аномалии H у разлома с простой структурой определялась по размеру отрезка профиля, представленного на всем протяжении аномальными значениями Q . Однако в практике эманационных исследований наиболее часто встречаются ситуации со сложным строением приразломной аномалии радона. В ее поперечном сечении имеет место чередование минимумов и максимумов параметра Q , причем главный

сместитель, выраженный уступом, нередко находится в пределах участка со значениями, меньшими Q_{cp} . Существование в разломной зоне доменов с низкой проницаемостью обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя (например, глинки трения) или небольших блоков, почти не нарушенных открытыми разрывами. Ширина подобной «прерывистой» аномалии определялась путем сопоставления размеров соседних проницаемых и непроницаемых для газа участков. При этом небольшие отрезки профиля с $Q < Q_{cp}$ включались в границы аномалии, если они располагались между двумя участками с $Q > Q_{cp}$ и были меньше хотя бы одного из них по размеру (см. рис. 2, 3).

В качестве количественной характеристики величины аномалии при обработке полученной информации использовались абсолютный параметр Q_{max} и относительный показатель K_Q . Максимальное значение объемной активности почвенного радона Q_{max} отражает интенсивность аномалии, которая наиболее важна для оценки радоновой опасности населенных территорий. Однако для сопоставления радоновой активности разломов, определяющейся

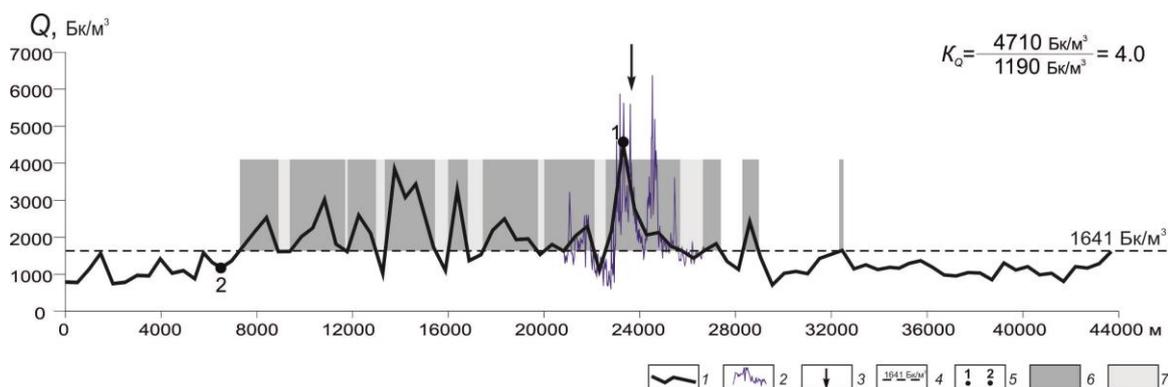


Рис. 2. График изменения объемной активности почвенного радона Q вдоль регионального профиля и оценка вычисленного для него показателя радоновой активности K_Q Хустайской разломной зоны:

1 – график, построенный с детальностью 500 м между пунктами опробования; 2 – график, построенный с детальностью 20–40 м между пунктами опробования; 3 – положение главного сместителя Хустайской разломной зоны; 4 – уровень и значение среднего арифметического Q_{cp} величин активности почвенного радона, измеренных для профиля; 5 – величины параметра Q , представляющие главный максимум в приразломной аномалии и минимум за ее границей; 6 – отрезок профиля с аномальными значениями параметра Q ($Q > Q_{cp}$); 7 – аномалия почвенного радона, ассоциирующаяся с разломом

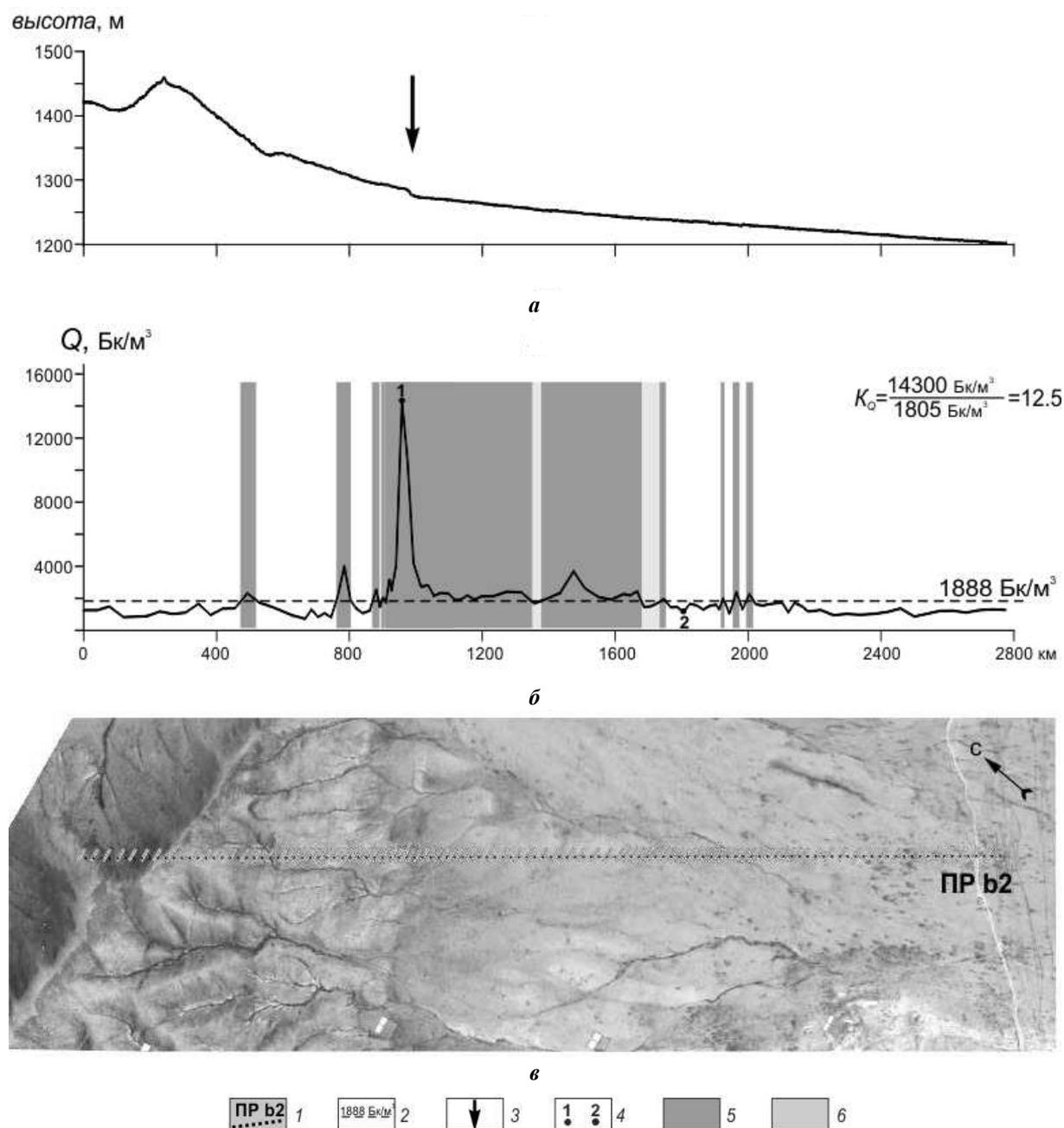


Рис. 3. Результаты исследований радоновой активности зоны главного сместителя Хустайского разлома, полученные для профиля ПР b2:

а – график вариации высоты рельефа вдоль профиля ПР b2; б – график изменения объемной активности почвенного радона Q и оценка показателя радоновой активности K_Q для зоны главного сместителя Хустайского разлома на профиле ПР b2; в – положение профиля ПР b2 на космоснимке.

1 – положение пунктов опробования почвенного воздуха на космоснимке; 2 – уровень и значение среднего арифметического Q_{cp} величин активности почвенного радона, измеренных для профиля; 3 – положение главного сместителя Хустайской разломной зоны; 4 – величины параметра Q , представляющие главный максимум в приразломной аномалии и минимум за ее границей; 5 – отрезок профиля с аномальными значениями параметра Q ($Q > Q_{cp}$); 6 – аномалия почвенного радона, ассоциирующаяся с разломом

главным образом геодинамическим фактором, более эффективными являются относительные величины [6, 8], которые в существенно меньшей степени подвержены влиянию геохимическо-

го и метеорологического факторов (тип и интенсивность источника излучения, физические свойства окружающих пород, метеодинамика и др.). В данном исследовании использовался показатель

радоновой активности K_Q , отражающий контрастность аномалии, выделенной на профиле (см. рис. 2, 3). Он определялся как отношение Q_{max} к минимальной величине Q_{min} , соответствующей активности радона в породах непосредственно за границами приразломной аномалии. При этом использовалось либо среднее из двух значений Q_{min} , установленных в крыльях разлома, либо то из них, где граница зоны установлена достаточно определенно. Как свидетельствует опыт эманационных исследований на юге Восточной Сибири и в Монголии [2, 3, 13], радоновая активность разломов имеет пять градаций: низкая ($K_Q \leq 2$), средняя ($3 \geq K_Q > 2$), повышенная ($5 \geq K_Q > 3$), высокая ($10 \geq K_Q > 5$) и сверхвысокая ($K_Q > 10$).

Форма, интенсивность Q_{max} и контрастность K_Q , установленные для приразломных аномалий радона в пределах каждого профиля эманационной съемки, являлись основой для установления закономерностей распределения концентраций почвенного радона, связанных с зоной влияния разлома Хустай в Центральной Монголии.

Результаты профильной эманационной съемки Хустайской разломной зоны, полученные для профилей разной протяженности, рассматриваются в данном разделе по мере увеличения детальности исследований.

Региональный профиль пересек Хустайскую разломную зону в центральной части и характеризовался сгущением сети опробования почвенного воздуха вблизи главного сместителя (см. рис. 2). Чтобы сохранить уровень детальности исследования, для построения общего графика на данном участке использовались замеры, сделанные через 500 м, как и на окончаниях профиля. Полученный график (жирная линия) свидетельствует о чередовании вдоль регионального профиля повышенных и пониженных значений объемной активности радона, колеблющейся в пределах 628–4710 Бк/м³ при величине среднего арифметического, равной 1641 Бк/м³. Превышающие этот уровень аномаль-

ные значения параметра Q располагаются в центральной части профиля, тогда как его окончания характеризуются величинами, которые, согласно используемой методики обработки результатов, можно считать фоновыми ($Q < Q_{cp}$).

Анализ космоснимков в пределах аномальных участков свидетельствует, что на каждом из них выделяется спрямленный элемент рельефа, который в этом геодинамически активном регионе может отождествляться с активным тектоническим нарушением. Например, главный сместитель разлома Хустай отчетливо проявляется в виде линейно вытянутого уступа (см. рис. 3, а, в), которому на графике вариаций параметра Q соответствует самое высокое значение объемной активности радона (см. рис. 2). Участки фоновых концентраций радона в этой центральной части пересечения ПР рег., как правило, меньше по размерам, чем смежные нарушенные разрывами и более проницаемые для газа отрезки профиля. Это дает основание предположить, что широкая область преобладания аномальных значений параметра Q представляет неоднородную по внутреннему строению радоновую аномалию, ассоциирующуюся с Хустайской разломной зоной в целом.

Аномалия, если строго придерживаться описанного ранее критерия выделения границ у подобных объектов, занимает пространство между 7410 и 29045 м регионального профиля (см. рис. 2). Однако более реальной на юго-востоке является отметка 32455 м, так как по аналогии с северо-западным окончанием профиля после нее на большом расстоянии отсутствуют аномальные значения параметра Q . Кроме того, существование внутри аномалии широкого участка минимальных значений объемной активности радона (29045–32455 м) объясняется наличием слабо проницаемых для радона тонкодисперсных осадков, залегающих в пойменной части долины р. Толы. Следует отметить, что полученная оценка ширины более чем в два десятка кило-

метров, скорее всего, является верхним пределом параметра, так как региональный профиль проходил по прямолинейной долине, обязанной своим происхождением тектоническому нарушению, сочленение которого с Хустайским разломом расширяет зону влияния последнего.

Таким образом, поперечный размер эманационной аномалии, связанной в районе регионального профиля с Хустайской разломной зоной, составляет ≈ 25 км. Ее интенсивность – 4710 Бк/м³ (см. рис. 2), причем величина Q_{max} приурочена к зоне главного разломного сместителя. Показатель K_Q (при значении $Q_{min} = 1190$ Бк/м³ у северо-восточной границы разломной зоны) равен 4, что соответствует повышенной радоновой активности разломной зоны в пределах изученного пересечения. В то же время абсолютный максимум объемной активности радона, зафиксированный у главного сместителя при более плотной сети наблюдений (см. рис. 2, тонкая линия на графике) равен 6340 Бк/м³, что переводит Хустайскую разломную зону в разряд высокоактивных с показателем K_Q , равным 5,3. Следовательно, наиболее значимой в плане радоновой активности частью разломной зоны в данном случае является зона (точнее, подзона) главного сместителя, что позволило сконцентрировать эманационные исследования на отдельных участках ее проявления, увеличив при этом детальность профильной съемки.

Радоновая активность зоны главного сместителя разлома Хустай была оценена на 8 участках (профили b1–b8), а также в центральной части регионального профиля, где опробование было проведено с необходимой детальностью (см. рис. 1). Результаты исследований в параметрической форме представлены в таблице и проиллюстрированы на примере профиля b1 (см. рис. 3).

По форме все выделенные аномалии являются прерывистыми, что связано с двумя структурными ситуациями.

Небольшие по ширине участки со значениями $Q < Q_{cp}$ соответствовали либо узким слабо нарушенным блокам между разломными сместителями, отчетливо проявленным уступами на космоснимке (см. рис. 3), либо значительным по размеру участкам тектонитов у крупных разрывов, представленных глиной трения и тонкодисперсными продуктами выветривания. Таким образом, в рассматриваемом масштабе исследования степень нарушения субстрата зоны главного сместителя является фактором, определяющим его проницаемость и, следовательно, характер распределения концентраций радона в почве.

Ширина эманационной аномалии H , ассоциирующейся с зоной главного сместителя разлома Хустай (таблица), изменяется от первых сотен до первых тысяч метров. При этом практически на всех профилях (исключая ПР b7) большая часть зоны находится в юго-восточном крыле, хотя главный максимум Q_{max} приурочен к нему лишь на трех пересечениях. В продольном направлении (рис. 4, z), несмотря на редкую сеть измерений и существенные вариации параметра H , можно выделить три сегмента: в центральном сегменте (объединяет профили ПР рег., b1, b2 и b3) ширина зоны больше, чем в северо-восточном (объединяет профили b4 и b5), а в северо-восточном – больше, чем в юго-западном (объединяет профили b6, b7 и b8). Уменьшение ширины зоны на центральном сегменте в районе профиля b1, по-видимому, не является истинным, так как при неформальном анализе (см. рис. 3, б), ширина зоны сместителя должна быть увеличена до 1000 м (за счет причленения максимума на отметке 800 м). Более того, все участки аномальных значений параметра Q на рассматриваемом профиле могут принадлежать к зоне главного сместителя, поскольку располагаются компактно на участке шириной 1500 м при отчетливой фиксации фоновых концентраций газа за его границами.

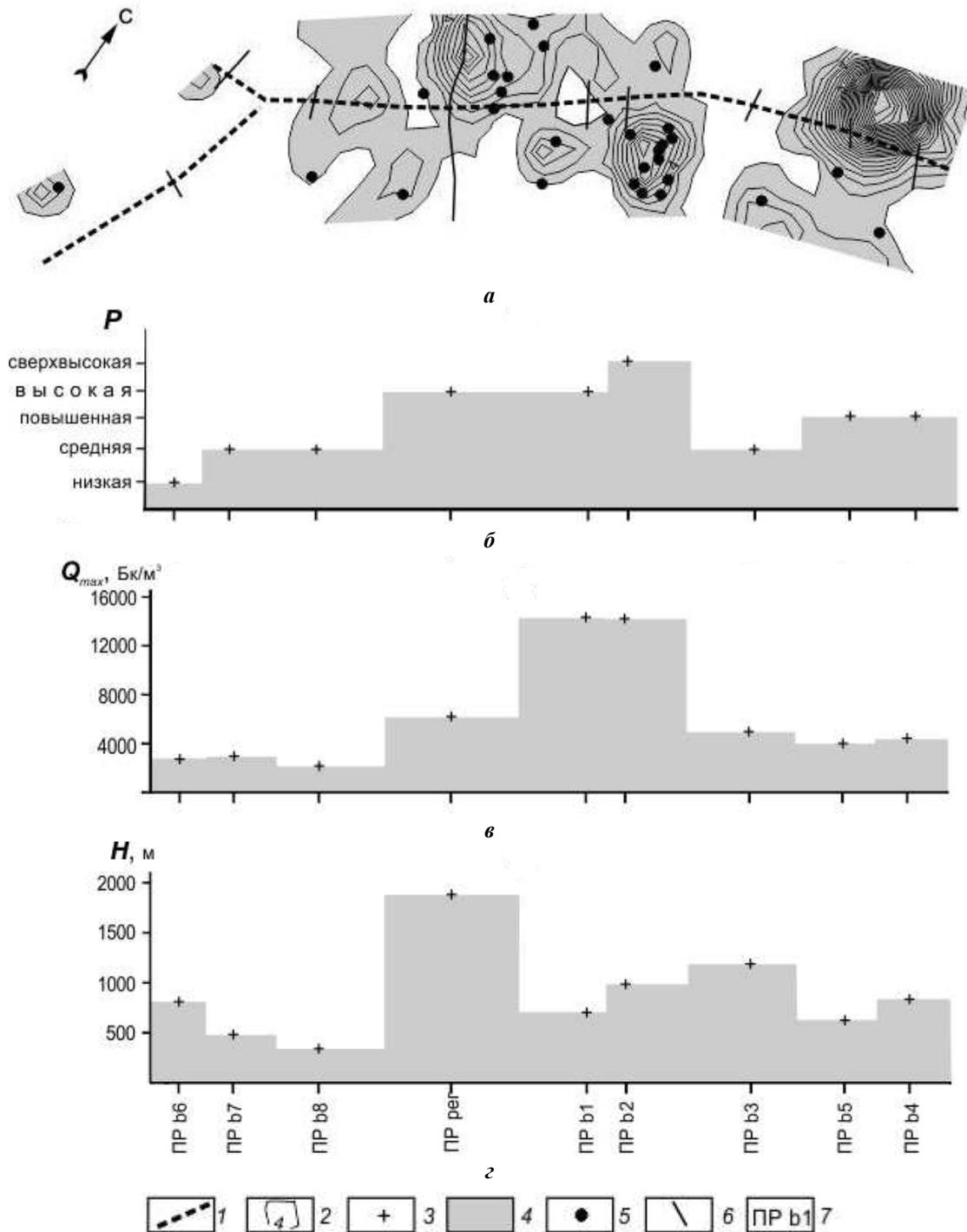


Рис. 4. Изменение характера сейсмической и радоновой активности вдоль зоны влияния главного сместителя Хустайского разлома:

а – распределение плотности эпицентров землетрясений с $M \leq 4,5$, произошедших в период 2000–2014 гг. в полосе шириной 20 км, протягивающейся вдоль сместителя Хустайского разлома; *б–г* – изменение вдоль простираения зоны влияния сместителя Хустайского разлома параметров радоновой активности, полученных при обработке профилей эманацционной съемки: *б* – вариации степени радоновой активности P , *в* – вариации интенсивности эманацционной аномалии, *г* – вариации ширины эманацционной аномалии.

1 – положение линии главного сместителя Хустайского разлома; 2 – изолинии плотности эпицентров землетрясений (серый цвет – области с количеством эпицентров больше 1 в единице площади $2,8 \times 2,8$ км); 3 – точка графика, для которой получено значение параметра (на схеме местности соответствует точке пересечения профиля и сместителя разлома); 4 – сегментированный график, при построении которого значение параметра с точки измерения перенесено на половину расстояния до смежной точки; 5 – положение эпицентра землетрясения, произошедшего на площади исследования в 2013–2014 гг.; 6 – положение профилей эманацционной съемки, для которых определены параметры радоновой аномалии, представленные на графиках *б–г*; 7 – индексы профилей

Количественные параметры радоновой аномалии, изученной вдоль профилей, пересекающих зону главного сместителя Хустайского разлома (Центральная Монголия)

Название профиля	Q_{max} , Бк/м ³	K_Q	Степень радоновой активности	Q_{cp} , Бк/м ³	H , м
ПР рег. 0	6340	5,1	высокая	2243	1924
ПР b1	14400	8,6	высокая	2560	708
ПР b2	14300	12,5	сверхвысокая	1888	1000
ПР b3	5040	2,4	средняя	2871	1200
ПР b4	4380	3,5	повышенная	1904	837
ПР b5	4050	4,1	повышенная	1513	636
ПР b6	2730	1,9	низкая	1840	821
ПР b7	2980	2,4	средняя	2151	477
ПР b8	2150	2,8	средняя	2189	350

Примечание: Q_{max} – максимальная величина активности почвенного радона в пределах приразломной аномалии (интенсивность аномалии); K_Q – показатель радоновой активности разлома (контрастность аномалии); Q_{cp} – среднее арифметическое величин Q , измеренных по профилю; H – ширина радоновой аномалии, ассоциирующейся с зоной главного сместителя и измеренная вдоль профиля.

Интенсивность аномалии почвенного радона (см. таблицу) изменяется в пределах 2150–14400 Бк/м³, причем две почти равные наибольшие величины параметра Q_{max} определены на смежных профилях b1 и b2 в центральной части разлома Хустай (рис. 4, в). Рядом, на региональном профиле, интенсивность приразломной аномалии уменьшается до 6340 Бк/м³, а на дистальных окончаниях зоны главного сместителя – практически не превышает 5000 Бк/м³.

Показатель радоновой активности, отражающий контрастность аномалии почвенного радона, на всех профилях был определен достаточно достоверно (см. таблицу), так как хотя бы одна из границ зоны главного сместителя устанавливалась однозначно (см. рис. 3, б). Полученные оценки свидетельствуют о том, что радоновая активность разлома Хустай крайне неравномерна. На его разных сегментах K_Q меняется от 1,9 до 12,5, что, согласно принятой классификации, отражает все пять градаций степени активности: от низкой до сверхвысокой. Сверхвысокая и высокая активности характерны для центрального сегмента зоны главного сместителя разлома (объединяет профили ПР рег., b1 и b2), повышенная и средняя свойственны северо-восточному (объединяет профили b3, b4, b5), а средняя и низкая – юго-

западному (объединяет профили b6, b7 и b8) сегментам изучаемого дизъюнктива. Таким образом, формы продольного распределения интенсивности Q_{max} и контрастности K_Q аномалии почвенного радона у разлома Хустай в первом приближении подобны (рис. 4, б, в), что отражает их достаточно тесную взаимосвязь.

В целом проведенный анализ свидетельствует о возможности разделения радоновой аномалии, связанной с главным сместителем Хустайской разломной зоны, на три сегмента, отличающиеся по совокупности значений главных количественных характеристик. Центральный сегмент выделяется в целом большими поперечными размерами, высокой интенсивностью и контрастностью аномалии. Радоновая активность ее дистальных окончаний существенно меньше, причем по комплексу изученных показателей юго-западный сегмент несколько уступает северо-восточному. Границы сегментов по предварительным оценкам проходят между профилями b8 и ПР рег., а также профилями b2 и b3, хотя последняя выделяется менее отчетливо. Причиной отмеченной продольной неравномерности, по видимому, является геодинамический фактор, поскольку выявленная на профилях поперечная неоднородность в

распределении параметра Q определяется степенью нарушенности субстрата разломной зоны.

Характерные особенности аномалии почвенного радона, связанной с Хустайской разломной зоной. Интерпретации эманационных данных обычно осуществляется с учетом той группы факторов, которая играет определяющую роль в формировании поля почвенного радона. В случае представленных выше результатов исследования Хустайской разломной зоны таким фактором является геодинамический. Во-первых, это предопределено объектом исследования, отчетливо выраженным в современном рельефе и являющимся результатом воздействия на земную кору эндогенных сил и процессов. Во-вторых, другие факторы, согласно принятой системе измерений и обработки данных, а также характеру полученных результатов, не могут считаться значимыми при их интерпретации.

Так, привлечение для оценки радоновой активности относительного показателя K_Q существенным образом сгладило на этапе обработки воздействие варьирующих во времени метеорологических факторов (в частности, атмосферного давления), а также изменяющегося в пространстве геохимического фактора, связанного с различием содержания урана в породах, пересекаемых разломом. Более того, суточные вариации метеопараметров нивелировались интегральной (за двое суток) оценкой величины Q , а несущественная роль геохимического фактора в формировании поля радона была показана на примере низких содержаний урана в материнских породах у самой интенсивной приразломной аномалии радона. Кроме рассмотренных выше для выявления закономерностей распределения радона важен еще один фактор: выходу газа в почвенный слой препятствуют тонкодисперсные осадки. Этот фактор осложняет исследование, но, как правило, не является определяющим, так как мощность слабопроницаемых осадков

не меняется вдоль профилей настолько часто, чтобы сформировать аномалии прерывистого типа, выявленные при изучении Хустайской разломной зоны.

Воздействие геодинамического фактора проявляется через изменение напряженного состояния верхней части коры, разрывообразование и перемещения по разломам. Происходит общее увеличение проницаемости субстрата и общей поверхности эманирования (вследствие дробления). Это, в свою очередь, влечет за собой возрастание концентраций почвенного радона, выделяющегося из пород, вследствие распада урана, который в минимальных количествах присутствует в любой горной породе. Важной в контексте полученных результатов является неравномерность процесса преобразования структуры земной коры под действием геодинамических сил, что априори предполагает существование неоднородности распределения радона при общей тенденции увеличения эманаций в зонах разломообразования. Как следствие, состоянием внутренней структуры разломной зоны успешно объяснялись неоднородные аномалии почвенного радона, выявленные в различных регионах мира [5, 7, 9, 14 и др.]. Аналогичный подход к интерпретации эманационных данных во многом эффективен и для Хустайской разломной зоны.

Действительно, поперечная прерывистость аномалий, выявленная для всех профилей (см. рис. 2, 3), объясняется существованием в ее пределах участков земной коры с разной степенью нарушенности. При этом сравнительно монолитные блоки уступают по размерам участкам с повышенной плотностью разрывов – зонам 2-го порядка, – что и позволяет выделять единую аномалию 1-го порядка. Приуроченность большей части аномалии радона к одному из крыльев (рис. 2, 3) объясняется асимметрией, характерной для разломных зон земной коры. Так, главная поверхность смещения обычно ограничивает зону разрывообразования с од-

ного края, что известно не только для природных дизъюнктивов [12], но и для структур разрушения, воспроизводимых в аналоговых моделях [1]. Совпадение главного сместителя с узким минимумом концентрации почвенного радона и, как следствие, смещение в крыло максимума с Q_{max} , установленное для Хустайского разлома на некоторых профилях, объясняется глиной трения, которая заполняет сместитель и является слабо проницаемой для газа [2, 9, 14, 15]. Широкие участки минимальных значений параметра Q , пространственно связанные с уступом главного сместителя, скорее всего, обусловлены наличием в осевой части разломной зоны тонкодисперсных продуктов выветривания. Они препятствуют эманации газа, так как заполняют интенсивно нарушенный массив, что было зафиксировано в скальных породах рядом с некоторыми точками измерений. Таким образом, принадлежность разрывов к минимумам параметра Q , прерывистость и асимметричность аномалий, выявленных для разлома Хустай при профильных исследованиях с разным уровнем детальности, объясняются сложностью структуры разломных зон, которая является следствием динамики их формирования.

Продольная неравномерность радоновой активности разлома Хустай, отражающаяся в различии величин Q и K_Q на его отдельных сегментах (см. рис. 4), может являться следствием их неодинаковой геодинамической активности. Для проверки справедливости данного тезиса было проанализировано распределение эпицентров землетрясений с $M \leq 4,5$ на полосовидном участке (см. рис. 4, а), который по ширине (20 км) заведомо перекрывает зону проявления главного сместителя в поле эманаций радона. Эти слабые сейсмические события произошли с 2000 по 2014 гг. и, таким образом, для данного периода времени отражают распределение активности подвижек по разрывам. Из рис. 4, а отчетливо видна простран-

ственная неравномерность данного распределения, которая по большому счету соответствует продольной сегментации разлома Хустай, установленной при анализе вариаций его радоновой активности (см. рис. 4, б, в). Участки проявления землетрясений, закрашенные серым цветом, приурочены к северо-восточной и центральной частям разлома, тогда как юго-западный сегмент асейсмичен. Если судить по интенсивности максимумов плотности эпицентров, северо-восточная часть территории характеризуется большей геодинамической активностью, чем центральная, хотя для радоновой активности наблюдается обратная тенденция. Однако это несоответствие исчезает, если рассматривать распределение только тех землетрясений (черные кружки), которые произошли за последние два года (2013–2014 гг.), т.е. в период проведения эманационной съемки. За это время в северо-восточной части территории произошло только три сейсмических события. Данный сегмент разлома был существенно менее активен, чем центральный, что и отразилось в результатах радоновой съемки. Таким образом, слабая сейсмичность и эманации радона характеризуются на изучаемой территории вполне определенной аналогией проявлений в пространстве и времени, поскольку для обоих процессов определяющим фактором служит геодинамическая активность.

Заключение. Хустайская разломная зона, протягивающаяся почти на 100 км от г. Улан-Батора в юго-западном направлении, была исследована методом эманационной съемки на девяти профилях с расстояниями между пунктами опробования на их краях и в центре, равными 500 и 20 м, 40 и 20 м соответственно. В результате интерпретации определений объемной активности почвенного радона Q установлено, что разломная зона создает эманационную аномалию, у которой форма, размеры, интенсивность и контрастность меняются в пространстве вследствие неравномер-

ной активности на современном этапе тектогенеза. Ширина области аномальных значений объемной активности почвенного радона по предварительным оценкам на региональном пересечении может достигать более двух десятков километров. По форме поперечного профиля аномалия имеет прерывистое строение, обусловленное существованием сближенных в пространстве субпараллельных зон с высокой плотностью разрывов, каждой из которых соответствует пропорциональная по ширине полоса аномальных концентраций почвенного радона. Самая крупная из этих аномалий, связанная с главным сместителем Хустайской разломной зоны, была изучена вдоль восьми профилей эманационной съемки, обработка которых в оригинальном методическом ключе обеспечила возможность более детально охарактеризовать радоновую активность данного тектонического нарушения.

На всех изученных пересечениях аномалия радона у главного сместителя Хустайского разлома имеет прерывистый вид, обусловленный различием в проницаемости массива горных пород, отдельные участки которого раздроблены до глинки трения, а также в большей или меньшей степени нарушены оперяющими разломами и трещинами. Сочетание таких участков и небольших слабо нарушенных блоков, а значит, и форма поперечного профиля у аномалии, выявленной на отдельных, даже близко расположенных пересечениях, различна. Среди наиболее часто встречающейся на профилях особенностей строения аномалии выделяется ее асимметрия. Большая часть участка аномальных значений объемной активности почвенного радона практически всегда находится в юго-восточном крыле разлома, где, по-видимому, имеет место плотная сеть открытых разрывов и трещин. Кроме того, на большинстве длинных и коротких профилей главный разломный сместитель, отчетливо выделяющийся уступом в рельефе, маркируется минимумом параметра Q . Это обусловлено наличием заполнителя в виде

глинки трения или/и продуктов выветривания, слабопроницаемых для радона.

Основные количественные характеристики аномалии – интенсивность, контрастность и поперечный размер – меняются вдоль простирания главного сместителя Хустайского разлома в широких пределах, что связано с различием в степени геодинамической активности его отдельных частей. Из трех крупных отрезков наиболее активен центральный сегмент, простирающийся в северо-восточном направлении, у которого параметры эманационной аномалии достигают наибольших значений: интенсивность $Q_{max} - 14400$ Бк/м³, контрастность $K_Q - 12,5$, ширина (H) – 1924 м. Юго-западный и северо-восточный сегменты, ориентированные на северо-северо-восток и востоко-северо-восток соответственно, существенно уступают центральному, так как степень их радоновой активности лишь кое-где может считаться повышенной ($K_Q = 3,5-4,1$). Приведенные оценки соответствуют периоду эманационных измерений и отчетливо связаны со степенью геодинамической активности, отражающейся для окрестностей Хустайского разлома в виде землетрясений с $M \leq 4,5$, произошедших в 2013–2014 гг.

Пространственная неравномерность строения радоновой аномалии, выявленная для зоны Хустайского разлома в Монголии, свойственна любому активному дизъюнктиву земной коры. Она может существенно осложнять поиски урановорудных тел, контролируемых разломами, а также урановых месторождений иного типа, локализующихся в геодинамически активных регионах. Повышение эффективности эманационной съемки, применяемой при поисковых работах, связано с исследованием и систематизацией первичных аномалий, а также использованием данного вида работ в комплексе с другими методами прикладной геофизики.

Авторы благодарны научному сотруднику Исследовательского центра астрономии и геофизики академии наук

Монголии Д. Ганзоригу и кандидату геолого-минералогических наук, доценту Иркутского государственного технического университета М.А. Тугариной за участие в проведении радоновой съемки и первичной обработки ее результатов. Кроме того, авторы выражают благодарность заведующему лабораторией изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН, профессору С.В. Рассказову и кандидату геолого-минералогических наук Т.А. Ясныгиной за помощь в проведении анализов скальных образцов методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрографии и интерпретации полученных результатов.

Библиографический список

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
2. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разломов (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика. 2009. № 8 (50). С. 881–896.
3. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Вариации объемной активности радона в разломных зонах земной коры: пространственные особенности // Физика Земли. 2014. № 6. С. 80–98.
4. 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.
5. Al-Bataina B.A., Al-Taj M.M., Atallah M.Y. Relation between radon concentrations and morphotectonics of the Dead Sea transform in Wadi Araba, Jordan // Radiat. Meas. 2005. V. 40. P. 539–543.
6. 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.
7. Interpretation of radon anomalies in seismotectonic and tectonic-gravitational settings: the south-eastern Crati graben (Northern Calabria, Italy) / C. Tansi, A. Tallarico, G. Iovine, M. Folino Gallo, G. Falcone // Tectonophysics. 2005. V. 396. P. 181–193.
8. 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.
9. Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges / P. Richon, Y. Klinger, P. Tapponnier, C.-X. Li, J. Van Der Woerd, F. Perrier // Radiat. Meas. 2010. V. 45. P. 211–218.
10. On a More Precise Assessment of Seismic Hazards for the City of Ulaanbaatar, Mongolia / S. Demberel, V.S. Imaev, E.A. Rogozhin, O.P. Smekalin, M. Ulziibat, A.V. Chipizubov // Seismic Instruments. 2014. V. 50. I. 2. P. 85–96.
11. One Century of Seismicity in Mongolia (1/2,500,000 Map). Coord: T. Dugarmaa, A. Schlupp. / M. Adiya, D. Ankhtsetseg, T. Baasanbat, G. Bayar, C. Bayarsaikhan, D. Erdenezul, D. Mungunsuren, A. Munkhsaikhan, D. Munkhuu, R. Narantsetseg, C. Odonbaatar, L. Selenge, D.B. Tsembeel, M. Ulziibat, K. Urtnasan. Research Center of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Science and Department Analyse Surveillance Environnement, CEA-France. 2003.
12. Paleoseismology / ed. J.P. McCalpin. 2^d edition. San Diego, California: Academic Press, 2009.
13. Seminsky K. Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // Radiation measurements. 2013. V. 49. P. 19–34.
14. Spatial radon anomalies on active faults in California / C.-Y. King, B.-S. King, W.C. Evans, W. Zhang // Appl. Geoch. 1996. V. 11. P. 497–510.
15. Wiersberg N., Erzinger J. Origin and spatial distribution of gas at seismogenic depths of the San Andreas Fault from drill-mud gas analysis // Applied Geochemistry. 2008. V. 23. P. 1675–1690.

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