

Закономерности проявления разломов Печоро-Колвинского авлакогена в поле радона

Ю. Е. Езимова, В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
Российская Федерация, 167982, Сыктывкар, Первомайская ул., 54

Для цитирования: Езимова, Ю. Е., Удоратин, В. В., Магомедова, А. Ш. (2022). Закономерности проявления разломов Печоро-Колвинского авлакогена в поле радона. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (1), 20–49.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.102>

В статье представлены результаты экспрессной радоновой съемки на территории Печоро-Кожвинского и Колвинского мегавалов, входящих в состав Печоро-Колвинского авлакогена. Радоновые исследования выполнялись по профилям вкрест простирания разломов, перекрытых осадочными породами. Полученные графики изменения объемной активности радона (ОАР) для каждого профиля сопоставлялись с геологическими разрезами. Результаты показали, что разломы сбросово-взбросовой природы в поле радона соответствуют областям с повышенными значениями объемной активности радона. В ходе анализа собранных данных были установлены основные закономерности проявления разломов в поле радона. Разломы могут соответствовать максимумам ОАР на фоне низких значений или попадать в минимумы ОАР. Помимо этого, выявлены участки с аномальными концентрациями радона, не связанные с известными разрывными нарушениями. Максимальная концентрация радона соотносится с разломами, наиболее близко подходящими к поверхности, по которым отмечаются большие амплитуды вертикальных смещений. Большая часть изучаемых разломов согласно относительному показателю радоновой активности относится к группе высокой радоновой активности. Для сбросов и взбросов, перекрытых осадочным чехлом, характерны близкие уровни концентрации радона. Концентрация радона в почвенном воздухе в пределах разломов меняется как в поперечном, так и в продольном направлении, что позволяет выделять в пределах одной разломной зоны блоки, различающиеся по флюидо-геохимическим особенностям. На отдельных участках показатели объемной активности радона в разное время находятся на одном уровне, что доказывает существование постоянного потока радона. Основным источником радона считается байкальский складчатый фундамент, сложенный породами в основном кислого состава. Таким образом, радоновая съемка в качестве дополнительного метода к другим геофизическим методам может использоваться для картирования разломов.

Ключевые слова: Печоро-Колвинский авлакоген, разломы, объемная активность радона, геофизические поля, байкальский фундамент.

1. Введение

Разлом — это объем земной коры, имеющий аномальное строение и повышенную трещиноватость, возникший в результате линейного разрушения среды и представляющий собой область, вмещающую породы с аномальными физико-

механическими, геолого-геофизическими, флюидо-геохимическими и другими характеристиками (Кузьмин, 2007). Точное выделение разломных зон на местности играет важную роль для тектонических и сейсмологических исследований, локализации и миграции природных ресурсов, а также для социально-экономической сферы, а именно, для строительных работ, оценки риска для здоровья населения.

Все разломы делятся на «активные», или «живые», и «неактивные». Практически все активные разломы сосредоточены в подвижных поясах. Однако и равнинные территории также нарушены «живыми» разломами (Трифонов, 2001). В литературе приводятся три основных критерия активности разлома: скорость движения крыльев разлома; интервал времени, в течение которого происходят подвижки; кинематика разлома (Кузьмин, 2016). Для платформенных территорий на современном этапе развития характерны низкие скорости горизонтальных и вертикальных движений и низкая сейсмическая активность (Удоратин и др., 2012; Носкова, 2019). Главная особенность заключается в том, что они перекрыты осадочными образованиями большой мощности. Поэтому трассирование платформенных разломов осуществляется главным образом геофизическими методами, основным из которых является сейсморазведка. Несмотря на высокую точность выделения разломов, применение сейсморазведочных методов ограничено из-за высокой стоимости и направлено в основном на поиски и разведку углеводородов.

Во всем мире радиометрические и газогеохимические исследования совместно с другими геофизическими методами успешно применяются для трассирования и изучения разломов как в пределах активных геодинамических зон, так и на платформенных территориях (King et al., 1993; Рудаков, 2009; Спивак, 2010; Seminsky and Demberel, 2013; Ciotoli et al., 2014; Lopez et al., 2016; Moreno et al., 2016; Sun et al., 2017; Левшенко и Григорян, 2015, 2018; Yang et al., 2018; Микляев и Петрова, 2021). Основной проблемой на сегодняшний день остается то, что перенос радона на большие расстояния не до конца изучен. Существует несколько гипотез о транспортировке радона на большие расстояния. К ним относятся наиболее популярная гипотеза диффузионно-адвективного переноса (King et al., 1996; Ioannides et al., 2003), гипотеза пузырьковой транспортировки (Шулейкин, 2010) и гипотеза супердиффузии во фрактальной среде (Паровик и др., 2008). При радоновых исследованиях платформенных территорий, в отличие от открытых разломных систем, сложнее определить, чем вызвана наблюдаемая аномалия. Причиной могут быть как высокие концентрации радия в верхних слоях осадочного чехла или почве, так и участки с повышенной трещиноватостью или разломные зоны.

Ранее авторами статьи радоновые исследования выполнялись в пределах Кировско-Кажимского авлакогена, Среднего и Южного Тимана, Вычегодского прогиба (Магомедова и др., 2015; Удоратин и др., 2017; Удоратин и Носкова, 2018; Удоратин и др., 2018, 2019, 2020). Настоящая работа посвящена изучению разломов Печоро-Колвинского авлакогена. На его территории известны два землетрясения, очаги которых приурочены к глубинным разломам Припечорской системы разломов (Удоратин и др., 2012).

Цель работы заключается в выявлении закономерностей проявления разломов Печоро-Колвинского авлакогена, перекрытых толщей осадочных образований в поле почвенного радона.

2. Объекты исследования

Печоро-Колвинский авлакоген (ПКА) в пределах суши имеет размеры 700×60 — 20 км, протягивается через центральную часть Тимано-Печорской плиты в северо-западном направлении. По поверхности фундамента представляет собой обширный прогиб, разбитый разломами на ряд ступенчатых блоков, наклоненных к северу (Прищепа и др., 2011). По осадочному чехлу авлакоген состоит из Печоро-Кожвинского (ПКМ) и Колвинского (КМ) инверсионных мегавалов и разделяющего их Денисовского прогиба. На северо-западе и западе граница с Малоземельско-Колгуевской моноклиной и Ижма-Печорской впадиной проходит по Чаркаю-Пылемецкому разлому, входящему в систему Припечорских разломов. На юге и юго-востоке авлакоген граничит со структурами Предуральского краевого прогиба — Верхнепечорской и Большисынинской впадинами, разделенными Среднепечорским поперечным поднятием. На востоке Колвинской системой разломов ПКА отделяется от Хорейверской впадины (рис. 1).

Основным методом для изучения глубинного строения, в том числе и разломной тектоники, является сейсморазведка в различных ее модификациях: метод отраженных волн (МОВ), метод общей глубинной точки (МОГТ), корреляционный метод преломленных волн (КМПВ), глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), метод обменных волн землетрясений (МОВЗ). На территории Тимано-Североуральского региона сейсмические работы, направленные на разведку и поиски углеводородов, планомерно начаты с 1961 г. и продолжаются по настоящее время. Изученность территории ПКА характеризуется как средняя и высокая. Начались сейсмические работы с МОВ 2D, постепенно переходя на МОГТ 3D. Также со временем сгущалась каркасная сеть профилей, плотность которых в основном составляет не менее 2 км между собой (Езимова и др., 2017; Удоратин и др., 2017). Системы наблюдений — фланговые и центральные, кратность суммирования — от 24 до 100, длительность регистрации — в среднем до 10 с.

Основным объектом исследований долгое время являлись структуры осадочного чехла, и практически не уделялось внимание разломным зонам, только в последнее время более пристально стали рассматриваться приразломные структуры. Авторами настоящей статьи для детального выделения и изучения основных структурообразующих разломных зон Печоро-Колвинского авлакогена за основу взята карта строения фундамента Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна (Белякова и др., 2008). Задача заключалась в качественном анализе и переинтерпретации сейсмических данных. Для этого было просмотрено около 2000 временных разрезов, при анализе которых использовались такие критерии, как ширина зоны потери корреляции, временной интервал, динамическое состояние волнового поля, сопряженность отражений по краям зоны, наклон. Итогом исследования стала обновленная схема разломной тектоники фундамента Печоро-Колвинского авлакогена и смежных областей. На схеме вынесены крупные, региональные разломы, длина которых составляет десятки — сотни километров (Езимова и др., 2017; Удоратин и др., 2017). В центральной части ПКМ выделена серия Лыжских разломов сбросо-взбросовой природы, нарушающих породы байкальского фундамента и осадочного чехла, а также уточнено местоположение Чаркаю-Пылемецкого, Подчерем-Каменского и Печорогородско-Переборского и системы Колвинских разломов.

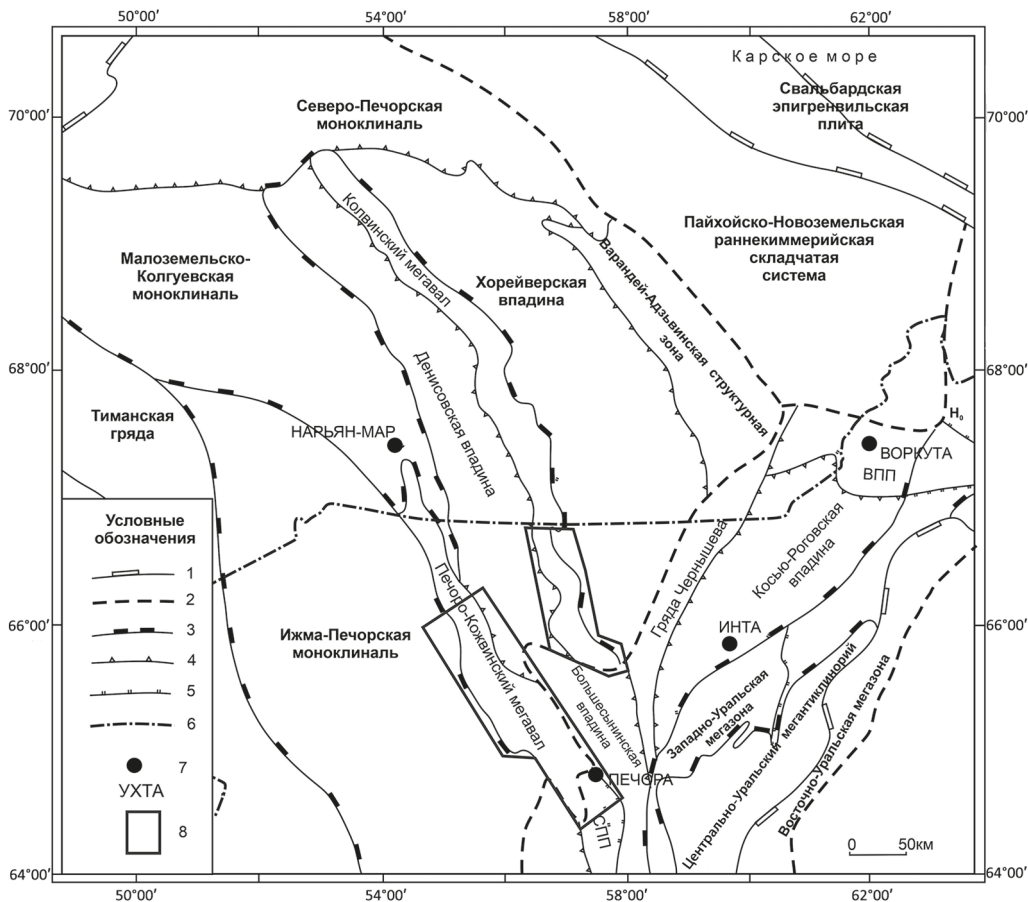


Рис. 1. Карта тектонического районирования осадочного чехла Тимано-Североуральского региона и прилегающих районов Русской плиты (Белякова и др., 2008): 1–5 — границы тектонических элементов: 1 — регионов, плит с различным временем становления континентальной коры, 2 — плит и складчатых систем с единым временем становления континентальной коры, 3 — крупнейших (надпорядковых) структур, 4 — крупных (I порядка) структур, 5 — средних (II порядка) структур, 6 — граница Республики Коми; 7 — населенные пункты, 8 — район исследований

Под разломом понимается геологическое тело, состоящее из ядра или сместителя, зоны дробления и вмещающей породы. Каждый блок имеет различные свойства переноса флюидов. Сместитель — это плоскость скольжения или узкая высококонцентрированная зона разрушенных пород. По сравнению со сместителем зона дробления достаточно велика и может достигать нескольких сотен метров в ширину (Sun et al., 2017). На сейсмических разрезах разломы соответствуют зонам потери корреляции отражающих горизонтов. Ширина разломных зон в пределах авлакогена по сейсмическим данным оценивается в 2–3 км.

2. Особенности геологического строения и проявления в потенциальных полях Печоро-Кожвинского и Колвинского мегавалов

Печоро-Кожвинский мегавал является пограничной структурой между двумя крупными подразделениями континентальной коры (Тиманским и Печороморско-Большеземельским геоблоками) (Довжикова, 2007; Белякова и др., 2008; Дружинин и др., 2013). В связи с таким тектоническим положением ПКМ отличается сложным строением и наличием многочисленных разрывных нарушений как в фундаменте, так и в осадочном чехле, подходящих близко к поверхности (рис. 2).

Колвинский мегавал расположен над Колвинским грабеном, состоящим из дизъюнктивных синклиналей и выдвинутых перемычек. Мегавал на всем протяжении характеризуется ассиметричным строением (Белякова и др., 2008; Прищеп и др., 2011). В строении мегавала принимают участие два разлома.

На территории ПКА байкальский складчатый фундамент вскрыт глубоким бурением только в пределах поднятых блоков, на глубинах от 2–3 км в Печоро-Кожвинском мегавале. Породы фундамента представлены гранитами, туфами основного и кислого состава, кварцевыми порфирами, пирокластическими порода-

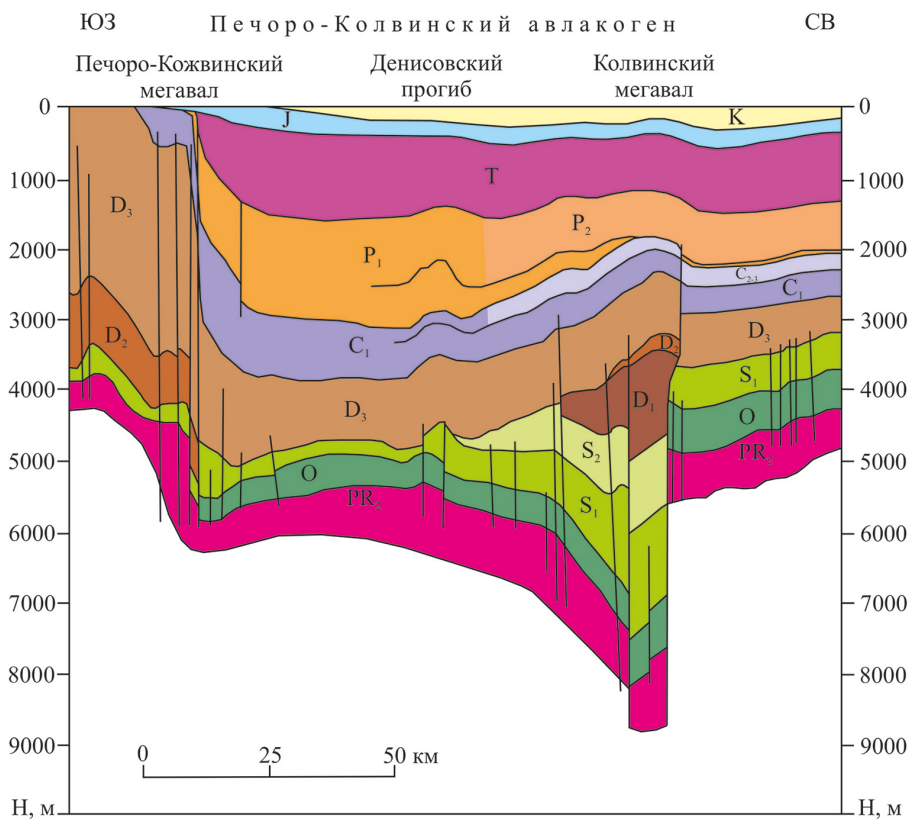


Рис. 2. Фрагмент геологического разреза через центральную часть Печоро-Колвинского авлакогена, составленного по региональному сейсмическому профилю 17 РС (Ступакова, 2017); местоположение профиля показано на рис. 5

ми кислого состава, риолитами, песчаниками, гравелитами. В депрессиях авлакогена глубокие скважины при забоях 6–7 км не пересекли полностью даже отложения нижнепалеозойского карбонатного комплекса (скважина сверхглубокая 1-Колвинская). Глубина кровли фундамента в этих зонах оценивается в 8–9 км (Белякова и др., 2008). Платформенный чехол представлен палеозойскими, мезозойскими карбонатными, терригенными, терригенно-карбонатными толщами, перекрытыми четвертичными отложениями (Тимонин, 1998; Богданов и др., 2002; Белонин и др., 2004).

Печоро-Кожвинский мегавал в магнитном поле выражается как широкая положительная интенсивная полосовая аномалия, которая соответствует простирацию отдельных блоков и ограничивающим зонам тектонических нарушений (рис. 3). Резкое расчлененное магнитное поле говорит о присутствии многочисленных интрузий основного и ультраосновного составов, внедрение которых происходило по разломным зонам (Довжикова, 2007). Граница смены состава фундамента фиксируется по резкой смене спокойного слабомагнитного поля на территории Ижма-Печорской впадины на интенсивное расчлененное поле в пределах ПКМ, которая проходит по Припечорской зоне разломов. В гравитационном поле мегавал соответствует вытянутой положительной аномалии (рис. 4), контуры которой отображают структурные уступы или же поднятия вдоль или по обе стороны границы Тиманского и Печороморско-Большеземельского геоблоков. Разломы западного борта в региональном гравитационном поле соответствуют градиентным зонам. В магнитном поле выделенные нарушения находят меньшее отражение.

Колвинский мегавал не имеет прямого отражения в потенциальных полях. В большей степени аномалии отражают интрузии основного и ультраосновного состава в породах фундамента. Положительные аномалии магнитного поля сопутствуют склонам мегавала. Как и гравитационные, они отражают в основном внутреннее строение фундамента (Белякова и др., 2008).

3. Методика исследований

Исследования объемной активности радона проводились в центральной и южной частях Печоро-Кожвинского и на юге Колвинского мегавалов по профилям в крест простираения крупных разломов. Работы выполнялись в течение трех полевых сезонов. Профильные измерения ОАР проводились на одиннадцати участках: семь — на территории ПКМ и пять — в пределах КМ (рис. 5). Шаг наблюдения составил 2 км по реке и 1 км по автомобильным дорогам.

Измерения ОАР выполнялись при помощи портативного радиометра «РРА-01М-01», предназначенного для экспрессных исследований на открытом воздухе, в воде и в почвенном воздухе. Замеры концентрации радона проводились в сухую погоду в утренние и дневные часы, когда колебания метеопараметров были минимальны. Для каждого измерения бурилась скважина диаметром 0.1 м и глубиной 0.5 м. Бурение скважины способствует вскрытию эманлирующих слоев и высвобождению газа за счет диффузного переноса (Микляев, 2015). Помимо этого, скважина необходима для снижения влияния на концентрацию радона метеопараметров: температуры, влажности, атмосферного давления (Семинский

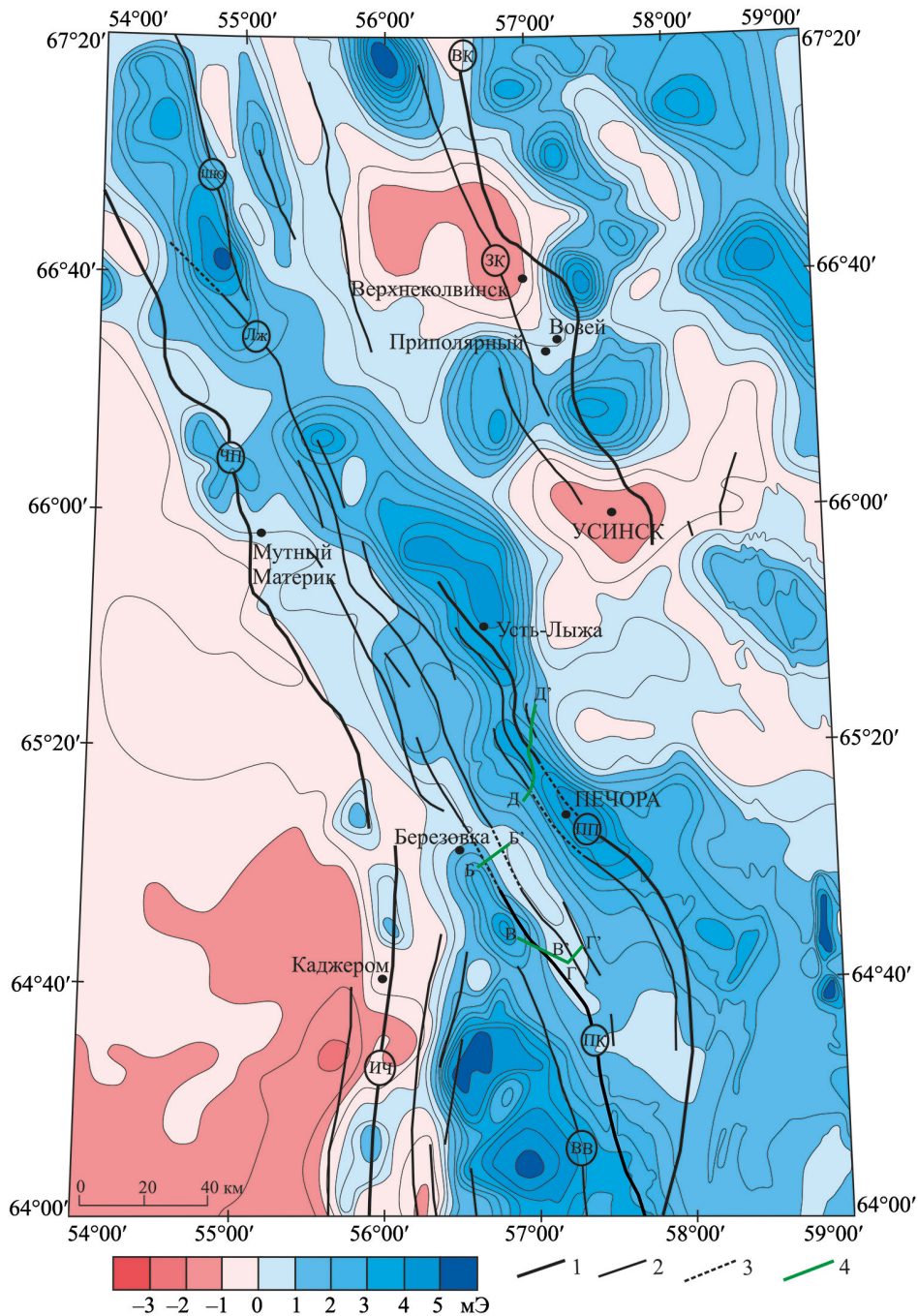


Рис. 3. Карта магнитного поля Печоро-Колвинского авлакогена и прилегающих территорий масштаба 1:1 000 000 (на основе карты, составленной С. М. Кострикиной и Р. М. Антоновичем, 1967): 1 — разломы, ограничивающие надпорядковые структуры: ЧП — Чаркау-Пылемецкий, ИЧ — Илыч-Чикшинский; 2 — разломы, ограничивающие структуры первого и второго порядка: Лж — Лыжский, ЗК — Западно-Колвинский, ВВ — Вуктыльско-Войвожский; 3 — предполагаемые разломы, 4 — профили магнитометрической съемки

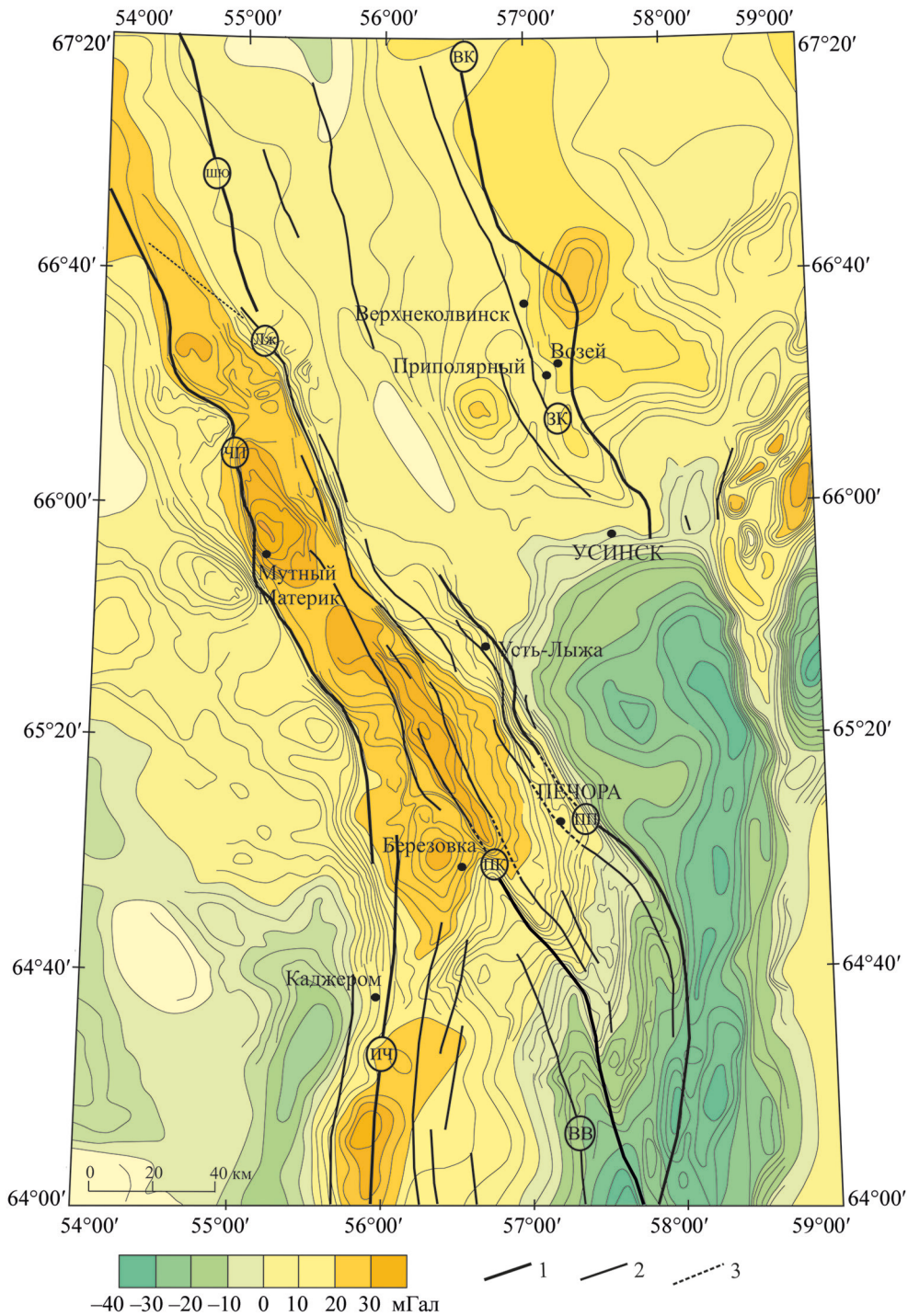


Рис. 4. Карта гравитационного поля в пределах Печоро-Колвинского авлакогена и прилегающих территорий масштаба 1:1 000 000 (на основе карты, составленной под редакцией Н.Б. Сажинной, 1960), условные обозначения см. на рис. 3

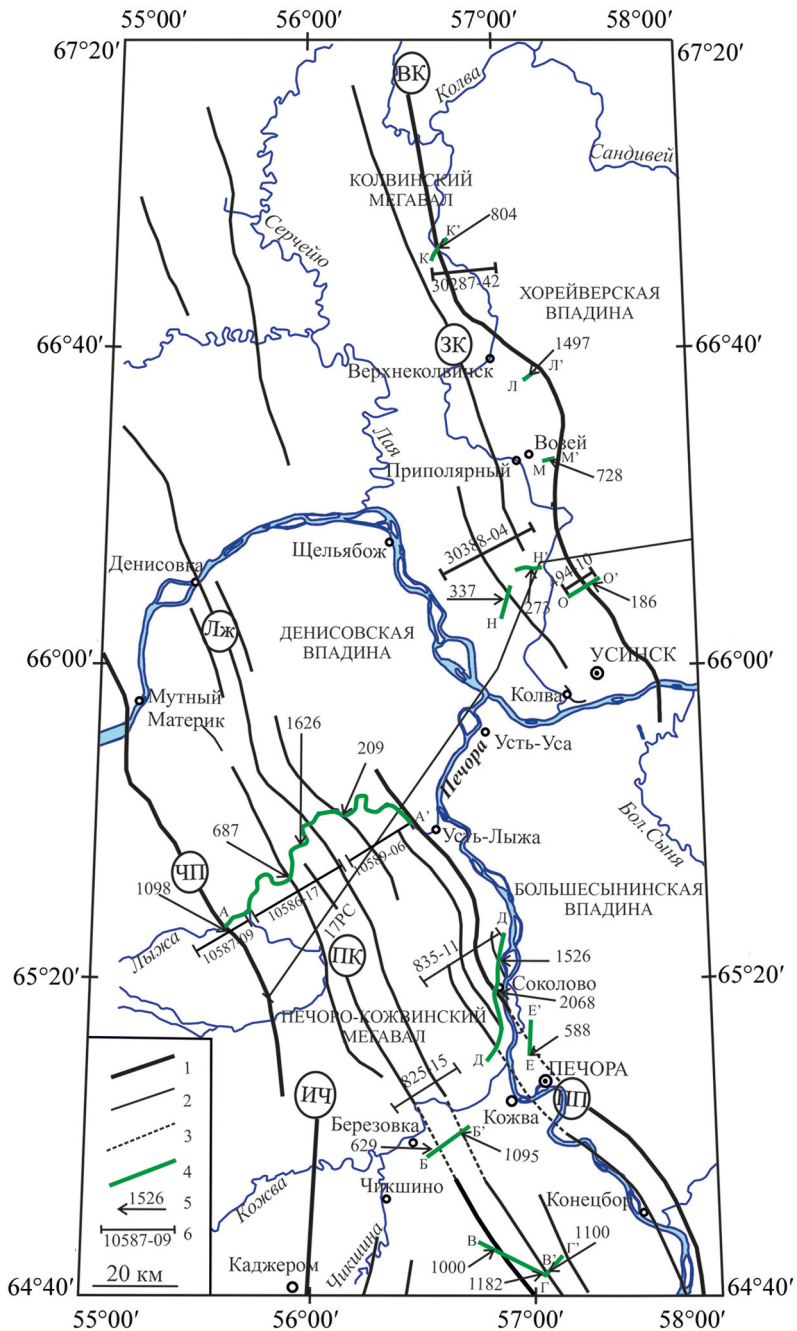


Рис. 5. Схема района работ в пределах Печоро-Колвинского авлакогена: 1–3 — см. обозначения на рис. 3; 4 — профили радоновой съемки; 5 — максимальные значения ОАР по профилю, Бк/м³; 5 — сейсмические профили

и др., 2009). Факторы, влияющие на динамику изменения ОАР в почвенном воздухе, и методика измерений подробно описываются авторами (Udoratin et al., 2020). После бурения проводился отбор пробы воздуха из скважины с последующим измерением ОАР в течение 20 мин. После каждого замера осуществлялась прокачка системы окружающим воздухом в течение 4 мин. На каждом пункте наблюдения помимо ОАР регистрировалось гамма-излучение, фоновые значения которого не превышали 20 мР/ч.

При обработке полученных данных применялись методы, описанные в работах других исследователей (Guerra and Lombardi, 2001; Walia et al., 2008; Al-Hilal and Al-Ali, 2010; Yang et al., 2018 Seminsky and Demberel, 2013; Семинский и др., 2019). Для каждого профиля использовались такие параметры, как среднее значение ОАР по профилю, стандартное отклонение от среднего значения, относительный показатель радоновой активности. Области с аномальными показателями ОАР определялись методом среднего значения с учетом стандартного отклонения (Yang et al., 2018):

$$Q > Q_{\text{cp}} + n\sigma (n = 1/2, 1 \text{ или } 2),$$

где Q_{cp} — среднее значение ОАР по профилю; σ — стандартное отклонение от среднего значения. При $n = 1$ или 2 ширина аномалий крайне узкая или же ее не удается выделить совсем.

Поскольку концентрация радона на разных участках обычно характеризуется высокой изменчивостью, что затрудняет сравнение различных тектонических нарушений, в настоящей работе используется такой параметр, как относительный показатель радоновой активности разломов (Seminsky and Demberel, 2013; Семинский и др., 2019), определяющийся по формуле:

$$K_Q = Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}},$$

где Q_{max} — максимальное значение ОАР в приразломной аномалии; Q_{min} — минимальное значение ОАР за пределами аномалии. Все параметры представлены в табл. 1.

Кроме радоновых исследований, по отдельным профилям проводилась пешеходная магнитометрическая съемка с использованием протонного магнитометра типа МИНИМАГ, предназначенного для измерения модуля геомагнитного поля (ΔT). Предел основной систематической погрешности магнитометра при измерении магнитной индукции не превышает ± 2 нТл. Шаг между пунктами наблюдения составлял 50 м. Одновременно с рядовыми наблюдениями снимались вариации магнитного поля. Магнитометрическая станция устанавливалась в спокойном магнитном поле и вела регистрацию вариаций с шагом 1 мин. Топографическая привязка выполнялась с помощью GPS Garmin 62S, точность привязки при полной видимости горизонта достигала 3 м. Привязка производилась с шагом 100 м.

Таблица 1. Основные параметры профильных радоновых наблюдений в пределах Печоро-Колвинского авлакогена

Профиль	№ ПН	Разлом	Q_{cp} , Бк/м ³	σ , Бк/м ³	min, Бк/м ³	max, Бк/м ³	Q_{max} , Бк/м ³	Q_{min} , Бк/м ³	K_Q
А–А'	л2	ЧП	356	305	110	1555	1098	145	7.5
	л11	Лж	—	—	—	—	687	157	4.3
	л17	Лж	—	—	—	—	1555	157	9.9
Б–Б'	пк4	ПК	491	326	128	1095	1095	139	7.8
В–В	пк19	ПК	395	372	69	1182	1182	157	7.5
Г–Г'	пк28	ПК	618	230	297	1101	1101	571	2.8
Д–Д'	пп17	ПП	594	594	0	2068	2068	29	71
Е–Е'	пп30	ПП	330	164	104	558	558	104	5.3
Ж–Ж'	пп35	ПП	241	179	75	792	792	75	10.5
К–К'	к5	ВК	293	260	52	804	804	110	7.3
Л–Л'	к12	ВК	1075	563	279	1497	1497	279	5.3
М–М'	к15	ВК	406	202	186	728	728	186	3.9
Н–Н'	к20	ЗК	237	77	151	337	337	151	2.2
	к27	ЗК	186	86	52	273	273	52	5.2
О–О'	к35	ВК	95	44	69	186	186	52	3.5

Примечание. В таблице введены следующие обозначения: Q_{cp} — среднее значение ОАР по профилю, min/max — минимальное/максимальное значение ОАР по профилю, Q_{max} — максимальное значение ОАР в приразломной аномалии, Q_{min} — минимальное значение ОАР за пределами аномалии, σ — стандартное отклонение от среднего значения, K_Q — относительный показатель активности радона; разломы: ЧП — Чаркаю-Пылевецкий, Лж — Лыжский, ПК — Подчерем-Каменский, ПП — Печорогородско-Переборский, ВК — Восточно-Колвинский, ЗК — Западно-Колвинский.

4. Результаты исследований

4.1. Радоновые исследования на территории Печоро-Кожвинского мегавала

Профиль А–А' проходит в центральной части ПКМ, пересекая Чаркаю-Пылевецкий и Лыжскую систему разломов. В 2015 г. единичные измерения ОАР проводились по отдельным пунктам наблюдения (ПН) в пределах Лыжской системы разломов. Результаты измерений показаны красным цветом на графике (рис. 6, б). Высокие показатели ОАР (1439–1626 Бк/м³) дали основание для дальнейших исследований. Для детального сопоставления полученный график был совмещен со сводным геологическим разрезом, составленным по отдельным сейсмическим профилям, расположенным наиболее близко к выполняемым исследованиям

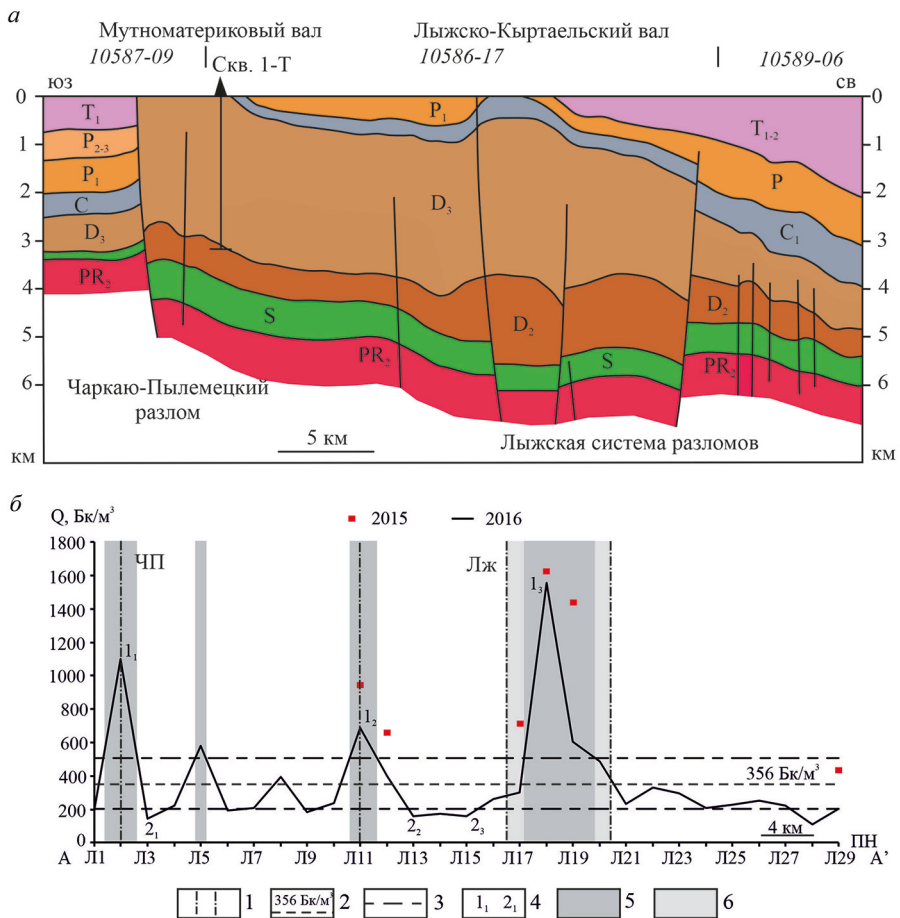


Рис. 6. Сводный геологический разрез через центральную часть Печоро-Кожвинского мегавала (а) (составила Ю. Е. Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности радона по профилю А-А' (б): 1 — разломы, выделенные по сейсмическим данным; 2 — среднее значение ОАР по профилю; 3 — уровни ($Q_{cp} \pm 1/2\sigma$, где σ — стандартное отклонение); 4 — значения ОАР, показывающие главный максимум в аномалии, связанной с разломом и минимум за аномалией; 5 — области профиля с аномальными значениями ОАР в почвенном воздухе ($Q > Q_{cp} \pm 1/2\sigma$); 6 — предполагаемая граница радоновой аномалии, связанная с разломом; местоположение профилей см. на рис. 5

(рис. 6, а). Поскольку профиль радоновой съемки проходит по реке, его сопоставление с сейсмогеологическим разрезом не совсем точное.

Вдоль профиля выделяется четыре области с аномально высокими значениями ОАР (ПН Л2, Л5, Л11, Л17–Л20). Аномалии на графике представлены узкими градиентными зонами с одиночными пиками. Такая форма кривой связывается с крутопадающими сместителями. Первая область (ПН Л1–Л5), связываемая с Чаркаю-Пылевецким глубинным разломом со значением 1098 Бк/м³. Ширина ее достигает 2–2.5 км. Вторая аномалия (ПН Л5), шириной не более 0.5 км, регистрируется на востоке от Чаркаю-Пылевецкого разлома на расстоянии 6 км. Пик не привязыва-

ется к выделенным разломам. Третья область аномально высоких значений ОАР регистрируется в ПН Л11 и привязывается к разлому, ограничивающему Лыжско-Кыртаельский вал на западе (рис. 6, а). Последняя зона (ПН Л17–Л20), шириной 6 км, заключена между разломами Лыжской системы разломов.

Профили Б–Б', В–В' и Г–Г' пересекают Подчерем-Каменский разлом (см. рис. 5). По профилю Б–Б' наблюдения выполнялись два полевых сезона. В 2015 г. вдоль линии профиля выполнены четыре замера. Значения ОАР находятся в интервале 58–716 Бк/м³. В 2019 г. уровень ОАР по профилю изменялся в пределах 128–1095 Бк/м³. Подчерем-Каменский разлом в поле радона соответствует зоне минимальных значений ОАР шириной 4 км (ПН пк3–пк7, пк17–пк21). На востоке от основного сместителя выделяется широкая область повышенных значений ОАР (ПН пк8–пк12), связанная с двумя тектоническими нарушениями. Характер изменения концентрации почвенного радона на участке прерывистый, выделяются два пика. Ширина аномалий составляет 1–1.5 км (рис. 6, б).

По профилю В–В' измерения также проводились в течение двух полевых сезонов (рис. 7, в). В целом за два периода наблюдений концентрация радона вдоль профиля держится на одном уровне. Однако пики ОАР во второй год наблюдений сместились на 2 км. Несмотря на это, зона разлома соответствует, как и по профилю Б–Б', области пониженных значений ОАР (ПН пк17–пк21) (рис. 7, б).

По профилю Г–Г' концентрация радона держится на уровне 300–1100 Бк/м³. (рис. 7, з). Разломная зона отмечается между двумя пиками ОАР. Ширина области, приуроченной к нарушению, составляет 4 км (ПН пк26–пк29).

Профиль Д–Д' пересекает сразу несколько разломов, входящих в Печорогородско-Переборскую систему, отмеченную на сейсмогеологическом разрезе (рис. 8, а). Сейсмический профиль не совпадает с профилем радоновой съемки, что мешает их точному сопоставлению.

По профилю Д–Д' на фоне низких показателей ОАР явно выделяются три радоновые аномалии и только два разлома из четырех отображаются в поле радона высокими значениями ОАР (рис. 8, б). Печорогородско-Переборский разлом соответствует области пониженных значений ОАР (ПН пп16–пп18). По обе стороны от нарушения выделяются радоновые аномалии со значениями 1946–2068 Бк/м³ в пределах висячего плеча (ПН пп14–пп15) и 1043–1526 Бк/м³ — лежащего плеча (ПН пп19–пп22). Разлом, который прослеживается на востоке от основного сместителя, также располагается между двумя аномалиями в области пониженных показателей ОАР (ПН пп23–пп25).

Профиль Е–Е', предположительно, пересекает Печорогородско-Переборский разлом. Вблизи профиля Е–Е' отсутствуют данные сейсморазведки. Поэтому невозможно определить точное местоположение разлома. Профиль Е–Е' расположен на расстоянии 6–7 км от Д–Д'. Поскольку по профилю Д–Д' разлом в поле радона соответствует зоне пониженных значений ОАР, можно говорить о том, что на участке Е–Е' нарушение также попадает в область минимума (ПН пп29–пп31). Зона повышенных значений ОАР шириной 1.5 км (ПН пп28–пп29) регистрируется южнее предполагаемого разлома (рис. 9).

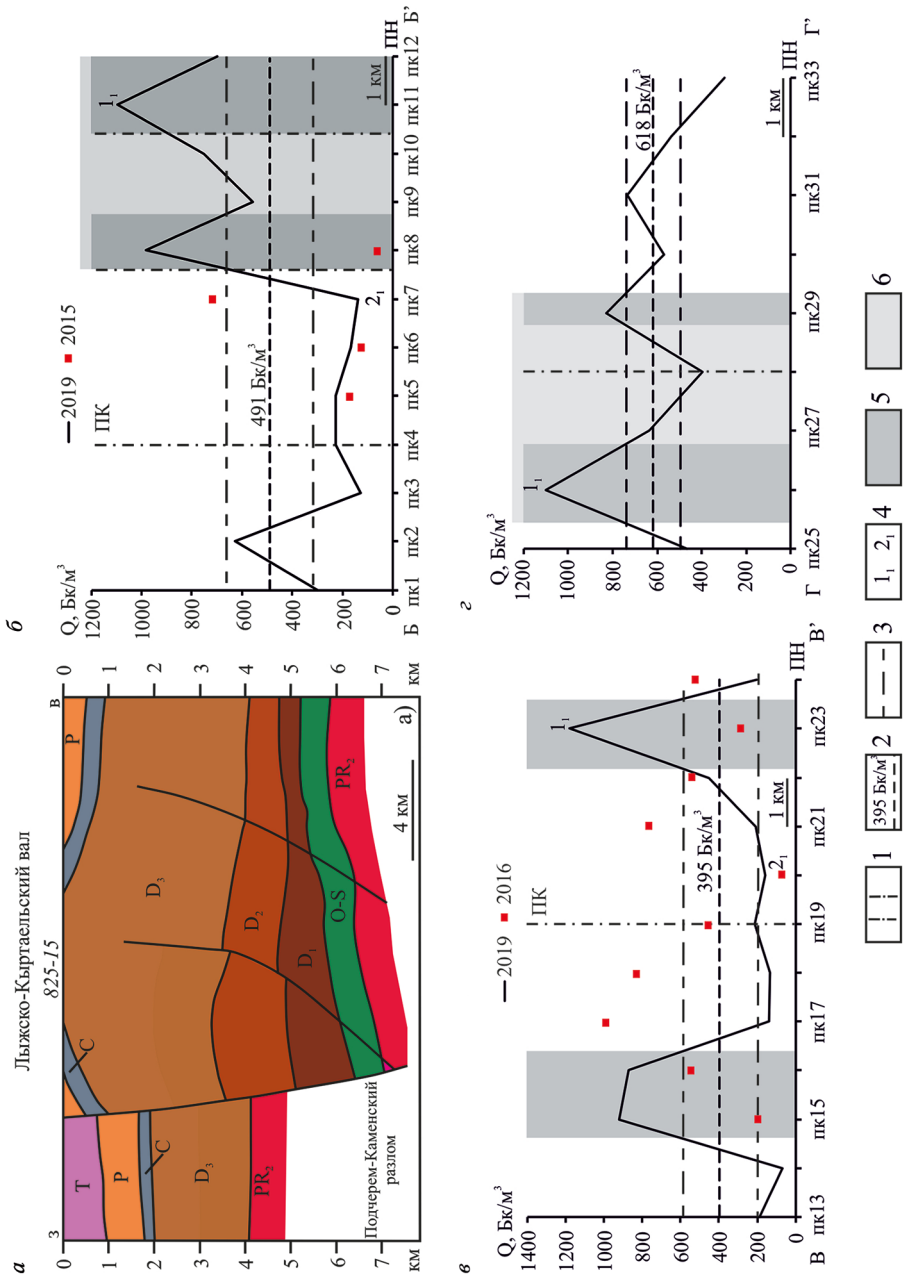


Рис. 7. Схематический геологический разрез через Подчерем-Каменский разлом (а) (составила Ю.Е. Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности района по профилю: Б-Б'(б), В-В'(z); условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профилей см. на рис. 5

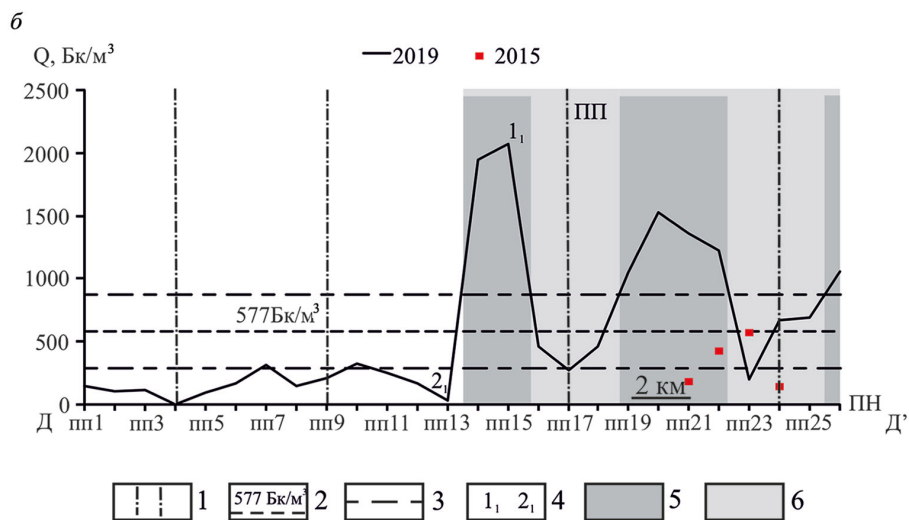
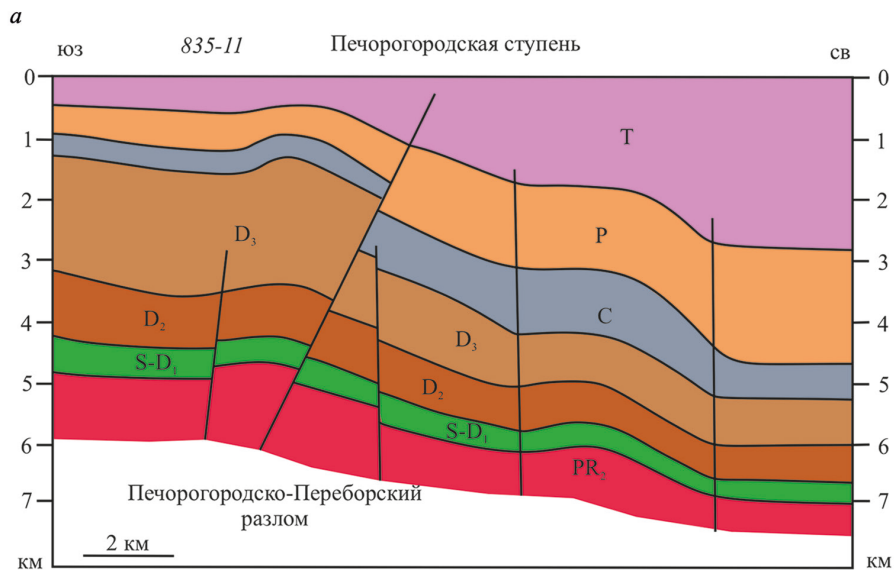


Рис. 8. Схематический геологический разрез через Печорогородско-Переборский разлом (а) (составила Ю.Е.Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности радона по профилю Д-Д' (б); условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профилей см. на рис. 5

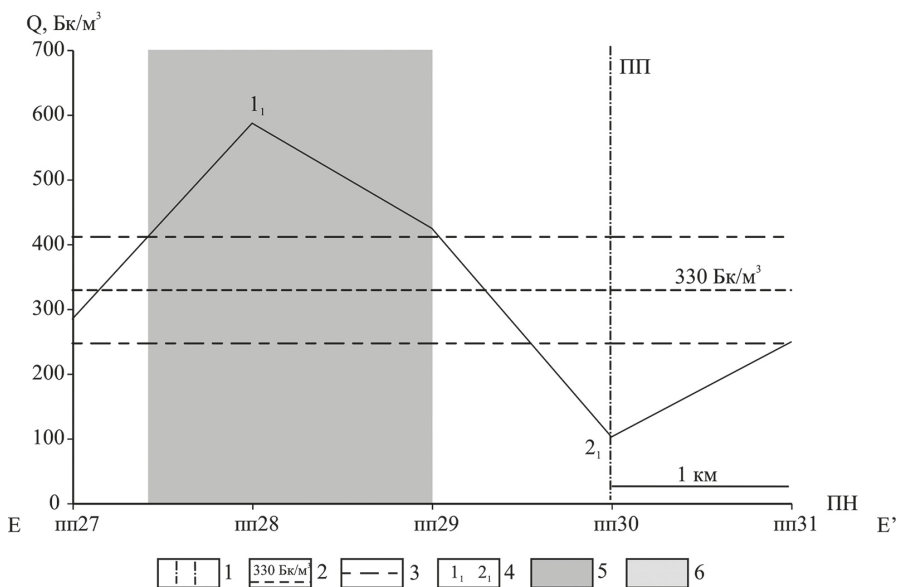


Рис. 9. График изменения объемной активности радона по профилю Е-Е'; условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профиля см. на рис. 5

4.2. Профильные радоновые исследования через разломы Колвинского мегавала

Район исследований на территории КМ располагается в зонах массивно-островного и островного распространения многолетнемерзлых пород (Осадчая и Хохлова, 2013). Многолетнемерзлые породы выступают в качестве покрывки и осложняют выход газов на поверхность. Кроме этого, на проведение радоновой съемки влияют повсеместное распространение болот и активная разработка месторождений углеводородов, которая мешает свободному проезду к намеченным участкам исследований.

В ряде работ упоминается положительная корреляция между накоплением радиоактивных газов и залежами углеводородов в приразломных антиклинальных структурах. Для поиска таких ловушек применяют радоновые, радоново-гелиевые методы. Главную роль в формировании радоновых аномалий над залежами играют газы, переносящие радон к поверхности (Киляков, 2013; Fernandez et al, 2016; Kuntoro et al, 2018).

Профиль К-К' пересекает Восточно-Колвинский разлом. На этом участке разлом ограничивает Возейский вал, который является достаточно пологим с минимальными амплитудами вертикальных смещений по фундаменту (рис. 10, а).

В поле радона разлом попадает в область аномально высоких значений ОАР (ПН к5-к6) шириной 2 км (рис. 10, б). Максимальное значение ОАР в разломе достигает 804 Бк/м^3 .

Единичные измерения ОАР выполнялись недалеко от Возейского месторождения углеводородов по профилям Л-Л' и М-М'. Профили радоновой съемки расположены вблизи Восточно-Колвинского разлома, но не пересекают его. По каждому

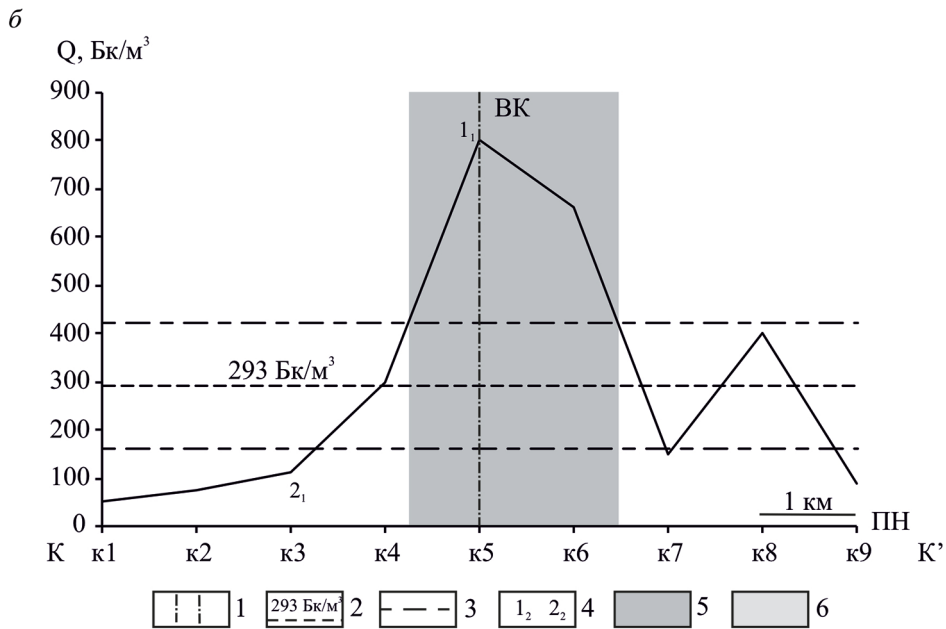
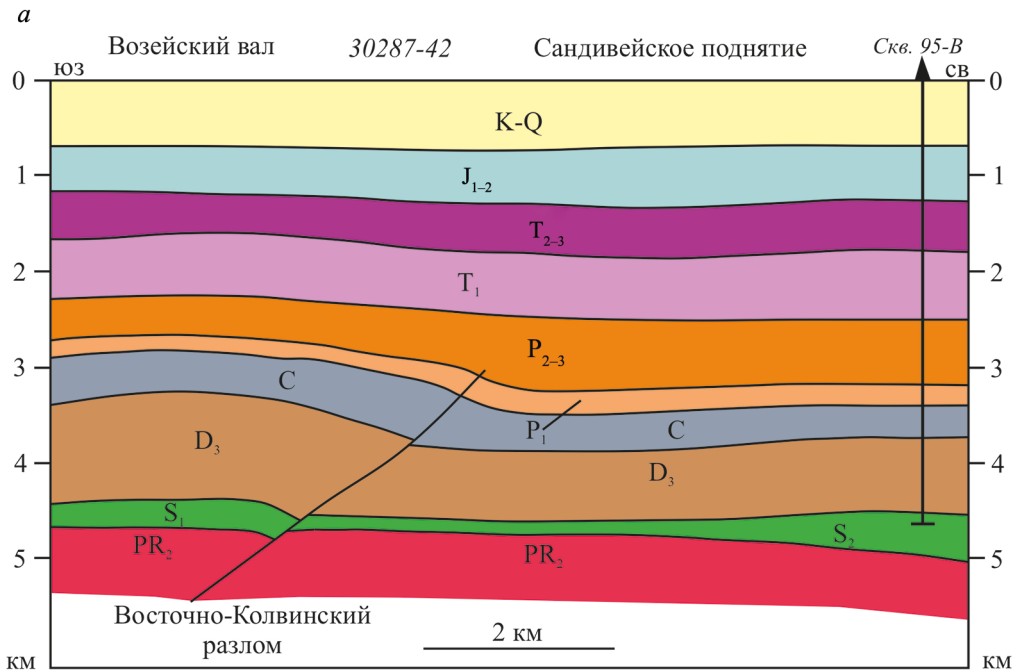


Рис. 10. Схематический сейсмогеологический разрез через Восточно-Колвинский разлом (*a*) (составила Ю.Е.Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности радона по профилю К-К' (*б*); условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профилей см. на рис. 5

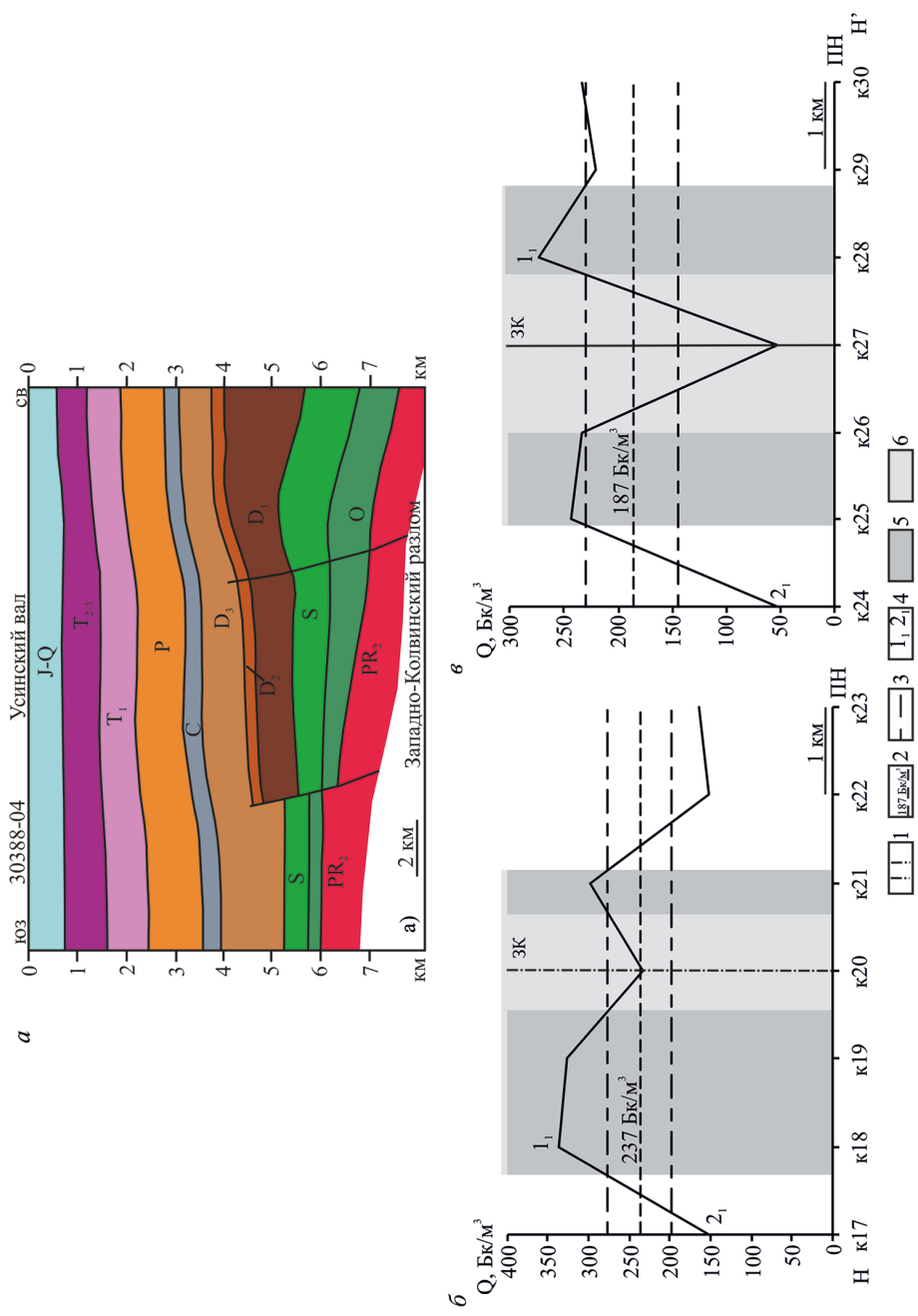


Рис. 11. Схематический геологический разрез через Западно-Колвинский разлом (а) (составила Ю. Е. Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности радона по профилю Н-Н' (б, в); условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профилей см. на рис. 5

профилю выполнены четыре измерения ОАР. По профилю Л–Л' максимальная концентрация радона достигает 1500 Бк/м³, по профилю М–М' — 730 Бк/м³. Поскольку под разломом понимается достаточно широкая зона, есть вероятность, что пункты наблюдения все-таки попали в разломную зону или же в ней показатели ОАР будут еще выше.

Профиль Н–Н' состоит из двух частей, расстояние между которыми 8 км, и пересекает сразу две ветви Западно-Колвинского разлома, представленные сбросами, достигающими толщи среднего и верхнего девона (рис. 11, а). Несмотря на низкие значения ОАР, разломы соответствуют градиентным зонам, где наблюдается резкий спад ОАР (рис. 11, б, в).

Профиль О–О' отработан на востоке от Н–Н' через Восточно-Колвинский разлом. Кроме основного сместителя, в нижнепалеозойской толще отмечаются второстепенные разрывные нарушения (рис. 12, а). Несмотря на наличие нескольких разломных зон, вдоль линии профиля О–О' отмечаются самые низкие показатели ОАР. На фоне крайне низких значений ОАР можно отметить условный пик ОАР (ПН к35) на востоке от выделенного разлома (рис. 12, б).

4.3. Магнитометрические исследования на территории Печоро-Кожвинского мегавала

В пределах исследуемой площади магнитное поле напрямую связано с составом пород фундамента, поскольку осадочные породы платформенного чехла практически немагнитны. Породы фундамента, в свою очередь, характеризуются различной намагниченностью. Максимальной намагниченностью обладают туфы основного и кислого состава, кварцевые порфиры и пирокластические породы. Их намагниченность составляет 13–38, 29–50 и 21–147 · 10⁻⁶ эрг · Гс⁻¹ · см⁻³ в системе СГС соответственно (Белякова и др., 2008, Удоратин и Носкова, 2018). Помимо пород фундамента, в магнитном поле отчетливо отображаются интрузии основного и ультраосновного составов. На территории мегавала в раннефранское время проявились процессы вулканизма. Отдельными скважинами зафиксированы внедрения диабазов и габбро-диабазов в нижние (доверхнедевонские) горизонты платформенного чехла (Богданов и др., 2002). Намагниченность этих интрузивных пород составляет 50–1000 · 10⁻⁶ эрг · Гс⁻¹ · см⁻³ в системе СГС.

Пешеходные профильные магнитометрические исследования масштаба 1:5000 выполнялись по профилям Б–Б', В–В', Г–Г' и Д–Д'. В ходе выполнения исследований перед авторами стояла задача проверить, как проявляются отдельные разломы западного борта в локальном магнитном поле. Результаты представлены на рис. 13, где разломы, выделенные по сейсмическим данным, отмечены пунктирной линией. На графиках видно, что отдельно взятые разломы не имеют отражения в локальном магнитном поле, несмотря на отчетливое проявление западного борта в региональных потенциальных полях.

5. Обсуждение

Данные радоновой съемки, полученные на территории Печоро-Колвинского авлакогена, подтверждают результаты исследований, проведенных ранее на терри-

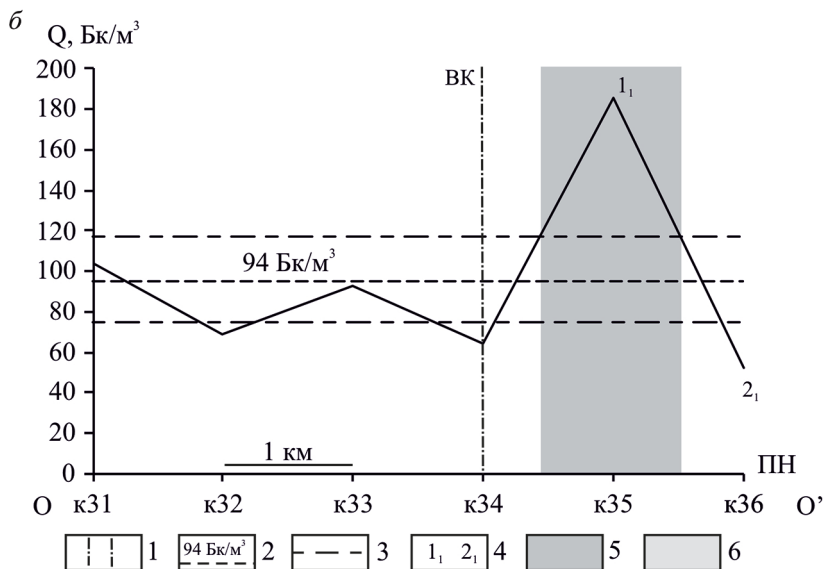
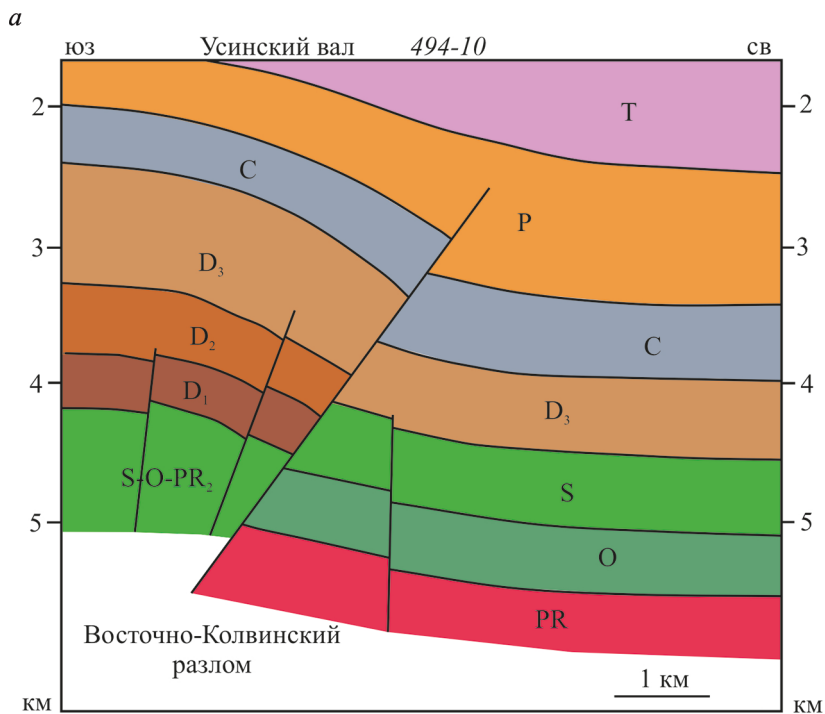


Рис. 12. Схематический геологический разрез через Восточно-Колвинский разлом (*a*) (составила Ю.Е.Езимова по материалам ПГО «Печорагеофизика»), график изменения объемной активности радона по профилю О-О' (*б*); условные обозначения см. на рис. 6; местоположение профилей см. на рис. 5

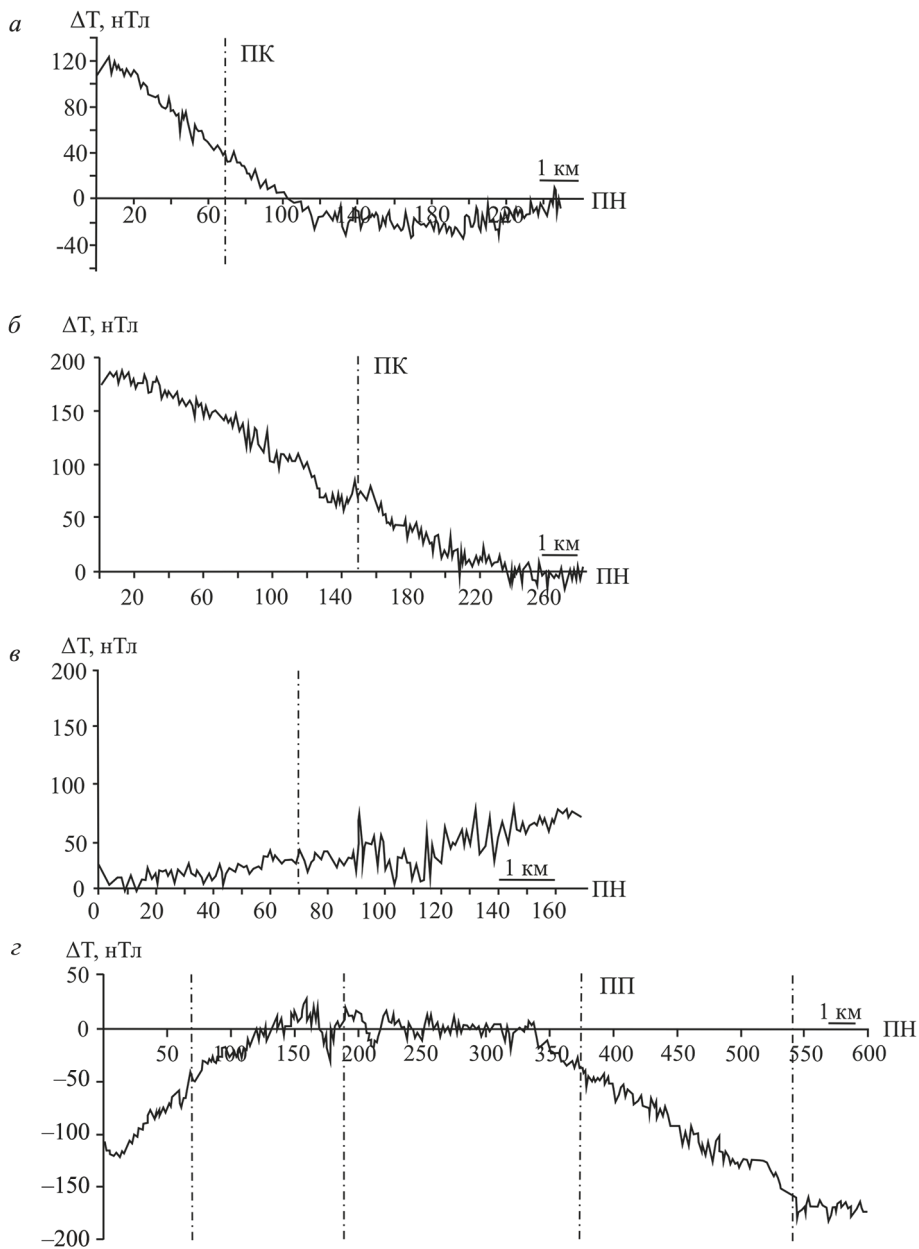


Рис. 13. Результаты магнитометрической съемки через разломы Печоро-Кожвинского мегавала по профилю: Б-Б' (а), В-В' (б), Г-Г' (в), Д-Д' (з); местоположение профилей см. на рис. 3

тории Кировско-Кажимского авлакогена, Тимана и Вычегодского прогиба (Магомедова и др., 2015; Удоратин и др., 2017, 2018, 2019) и дополняют их.

Разломные зоны авлакогена в поле радона соответствуют областям повышенных значений ОАР, достигающим 2000 Бк/м³ на территории западного борта, который характеризуется многочисленными разрывными нарушениями, подходящими близко к поверхности, и повышенной сейсмической и тектонической активностью. В пределах восточного борта авлакогена, где разломы перекрыты осадочными отложениями мощностью 2–4 км, показатели ОАР не превышают 1500 Бк/м³. Все разломы, согласно относительному показателю радоновой активности (Семинский и др., 2019), были распределены на четыре группы. К первой группе *сверхвысокой радоновой активности* относится главный Печорогородско-Переборский разлом. Вторая группа — *высокой радоновой активности*, куда попали Чаркаю-Пылевецкий, два нарушения из Лыжской серии и Подчерем-Каменский разлом, еще разлом, входящий в серию Печорогородско-Переборского, а также Восточно-Колвинский на территории Возейского вала и южное окончание Западно-Колвинского разлома. Третья группа — это крайний западный разлом Лыжской серии *с повышенной радоновой активностью*. И последняя группа — *с низким уровнем радоновой активности*. К ней относятся разломы Колвинской системы на территории Усинского вала.

Концентрация радона в почвенном воздухе в пределах разломных зон варьируется как в поперечном, так и в продольном направлениях, что позволяет выделять отдельные блоки в пределах одного разлома, характеризующиеся различной степенью раздробленности, флюидопроницаемости пород.

В пределах одного участка исследований показатели в разное время находятся на одном уровне, что подтверждает наличие постоянного потока радона. В отличие от открытых систем, где разломы выходят на поверхность (Семинский и др., 2009; Seminskiy and Demberel, 2013; Sun et al., 2017), для сбросов и взбросов, перекрытых осадочным чехлом, характерны близкие уровни концентрации радона в почвенном воздухе.

Из полученных результатов радоновой съемки выделяются три случая соотношения радоновых аномалий и разломных зон. В первом случае дизъюнктивы соответствуют максимумам ОАР. Такие аномалии объясняются наличием густой сети трещин и разрывов и слабо выраженным сместителем разлома, а также присутствием конвективного переноса радона с более глубоких пород, в составе которых отмечается повышенное содержание радия или радона (King et al., 1996).

Во втором случае разрывные нарушения не имеют отображения в поле радона. Согласно (Annunziatellis et al., 2008), такое распределение радона указывает на то, что разлом является достаточно зрелым с хорошо развитым ядром, ограниченной зоной дробления с высокой степенью трещиноватости. В таком случае над ядром наблюдается низкий уровень радона, а максимумы регистрируются по обеим сторонам от него. Низкую проницаемость ядра разлома можно объяснить несколькими причинами. На проницаемость разрывных нарушений для транспортировки газов оказывает сильное влияние состав и особенности пород, заполняющих трещины, пропускная способность поверхностных отложений и грунтов, наличие современных тектонических движений (Miklyayev et al., 2020). Дополнительное влияние на динамику радона могут оказывать залежи углеводородов в пределах раз-

ломных зон или вблизи них, а также многолетнемерзлые породы, заболоченные участки. К менее значимым факторам, влияющим на изменения концентрации радона на локальных участках в короткие промежутки времени, относятся метеорологические параметры, которые можно исключить при краткосрочных профильных измерениях.

В третьем случае по профилю выделяется область повышенных значений ОАР, не связанных с известными разломами. Такие аномалии, возможно, не имеют отношения к разломным зонам, а вызваны повышенным содержанием радия в почве и верхних горизонтах осадочного чехла. В другом случае аномалии могут указывать на мелкие разрывные нарушения, которые ранее не были выделены. Чередование максимумов и минимумов ОАР по профилю указывает на сложное строение разломной зоны или присутствие серии разломных зон.

Согласно представленной классификации, к зрелым разломам с хорошо выраженным ядром можно отнести Подчерем-Каменский, Печергородско-Переборский и Западно-Колвинский разломы.

Сложно однозначно сказать, что является источником радона на изучаемой территории. Исходя из данных опубликованной и фондовой литературы, на территории авлакогена залежей радиоактивных элементов или участков с повышенным радиоактивным фоном ранее не выявлено.

Концентрация радона в почвенном воздухе зависит от многих факторов. Радон, который измеряется на поверхности, можно представить в виде суммы радона глубинного и радона грунтового (Матвеев и др., 2014). Глубинный радон поступает в приповерхностные грунты из нижележащих пород вместе с легкими попутными газами.

Радон производится в разной степени всеми типами пород и на разных глубинах. Больше всего радона производят породы с повышенным содержанием урана, тория или радия, к которым в первую очередь относятся кислые магматические и метаморфические породы (Kemski et al., 1992; Xuan et al., 2020). Среди осадочных пород наибольшей радиоактивностью обладают глины, глинистые сланцы, калийные соли и фосфориты (Уткин, 2000). Кроме этого, повышенной радиоактивностью характеризуются подземные воды радиоактивных месторождений и вод сульфидно-бариевого и хлоридно-кальциевого типов (Березина, 2014). В нашем случае основным источником радона считаются породы байкальского складчатого фундамента, представленного гранитами, туфами основного и кислого составов, пирокластическими породами кислого состава, риолитами и др.

Миграция и вынос радона на поверхность происходит за счет двух основных процессов — диффузии и адвекции. Расстояние, на которое может мигрировать радон благодаря диффузии, ограничивается несколькими метрами через сухую почву с нормальной пористостью. В процессе адвекции газы выносятся на поверхность за счет градиента давления и могут преодолевать огромные расстояния. Поскольку радон в восемь раз тяжелее воздуха, он транспортируется благодаря потокам других более легких газов. В этом случае разломные зоны являются оптимальными путями для транспортировки радона к поверхности (Al-Tamimi and Abumurad, 2001; Ciotoli et al., 2007; Al-Hilal and Al-Ali, 2010; Chenhula et al., 2016; Davidson, 2016).

Результаты профильной магнитометрической съемки масштаба 1:5000 показали ее неэффективность при выделении разломов Печоро-Колвинского авлакогена.

Отдельно взятые дизъюнктивы западного борта авлакогена не проявляются в локальном магнитном поле, что говорит об однородности состава пород в зоне разломов.

6. Заключение

Радоновая съемка может быть полезна для уточнения местоположения погрешенных платформенных разломов на участках, где отсутствуют данные других геофизических методов, таких как сейсморазведка, магниторазведка, гравиразведка и др., или их недостаточно. Помимо картирования радоновый мониторинг позволяет определять особенности внутреннего строения разломных зон.

Результаты проделанных исследований могут быть полезны для планирования и размещения строительных сооружений и для оценки экологической ситуации в населенных пунктах, расположенных вблизи района работ.

Литература

- Белонин, М. Д., Буданов, Г. Ф., Данилевский, С. А., Прищеп, О. М., Теплов, Е. Л. (2004). *Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения*. СПб.: Недра.
- Белякова, Л. Т., Богацкий, В. И., Богданов, Б. П., Довжикова, Е. Г., Ласкин, В. М. (2008). *Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна*. Киров: Кировская областная типография.
- Березина, Е. В. (2014). *Приземные концентрации и потоки радона-222 на территории России и оценки биогенных эмиссий углекислого газа, метана и сухого осаждения озона*. Диссертация... канд. физ.-мат. наук.
- Богданов, М. М., Корюкина, Н. Г., Лапкина, Н. С. (2002). Палеотектонические и термобарические предпосылки формирования УВ скоплений в карбонатном нижнепалеозойском комплексе Печоро-Колвинского авлакогена Тимано-Печорского бассейна. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 10, 28–35.
- Довжикова, Е. Г. (2007). *Позднекембрийский магматизм Припечорской зоны разломов (центральной части Печорской плиты)*. Диссертация... канд. геол.-минерал. наук.
- Дружинин, В. С., Мартышко, П. С., Начапкин, Н. И., Осипов, В. Ю., Удоратин, В. В. (2013). Модель докембрия Тимано-Печорского геоблока. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 19, 1–8.
- Езимова, Ю. Е., Удоратин, В. В., Магомедова, А. Ш. (2017). Локализация тектонических нарушений Печоро-Колвинского авлакогена по сейсмическим данным и их проявление в поле радона. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 9, 23–29. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-9-23-29>
- Киляков, А. В. (2013). История развития эманационных методов и их роль в нефтяной геологии. *Известия Саратовского университета. Нов. сер. Серия. Науки о Земле*, 2, 57–60.
- Кузьмин, Ю. О. (2007). Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 1, 33–40.
- Кузьмин, Ю. О. (2016). Современная динамика опасных разломов. *Физика Земли*, 5, 87–101.
- Левшенко, В. Т., Григорян, А. Г. (2015). Использование данных комплексных исследований при определении положения разломов в платформенных районах (на примере Рославльского разлома). *Геофизические исследования*, 16 (3), 55–62.
- Левшенко, В. Т., Григорян, А. Г. (2018). Определение положения сейсмически активных разломов в платформенных регионах на основе комплексных профильных наблюдений. *Физика Земли*, 2, 25–32.
- Магомедова, А. Ш., Удоратин, В. В., Езимова, Ю. Е. (2015). Отражение разломных зон и трубок взрыва Среднего Тимана в геофизических полях. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 10, 28–34. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2015-10-28-34>

- Матвеев, А. В., Автушко, М. И., Карабанов, А. К., Нечипоренко, Л. А., Плюснин С. М. (2014). Влияние зон разрывных нарушений на концентрацию радона в почвенном воздухе на территории Беларуси, *Геохим. та рудоутв*, 34, 69–77.
- Микляев, П. С. (2015). *Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий*. Диссертация... д-ра геол.-минерал. наук.
- Микляев, П. С., Петрова Т. Б. (2021). Исследования аномальных сезонных вариаций плотности потока радона в зоне разлома. *Геохимия*, 66 (4), 364–378. <https://doi.org/10.31857/S001675252104004X>
- Носкова, Н. Н. (2019). Сейсмичность территории Республики Коми за 2000–2018 гг. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIV международной сейсмологической школы. Республика Молдова*. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН».
- Осадчая, Г. Г., Хохлова, Е. С. (2013). Оптимизация природопользования при освоении территориальных ресурсов южной криолитозоны Большеземельской тундры. *Криосфера Земли*, 17 (3), 35–43.
- Паровик, Р. И., Шевцов, Б. М., Фирстов, П. П. (2008). Модель переноса радона в режиме супердиффузии во фрактальной среде. *Доклады Адыгской (Черкесской Международной академии наук*, 10 (2), 79–85.
- Прищепа, О. М., Богацкий, В. И., Макаревич, В. Н., Чумакова, О. В., Никонов, Н. И., Куранов, А. В., Богданов, М. М. 2011. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 6 (4), 1–34.
- Рудаков, В. П. (2009). *Эманиционный мониторинг геосред и процессов*. М.: Научный мир.
- Семинский, К. Ж., Черемных, А. В., Бобров, А. А., Кожевников, Н. О. (2009). Разломные зоны Прибайкалья: внутренняя структура и геофизические поля. *Тектонофизика и актуальные вопросы о Земле*, 2, 151–156.
- Семинский, К. Ж., Бобров, А. А., Дэмбэрэл, С. (2019). Соотношение радоновой и тектонической активности разломов центральной Монголии. *Доклады Академии наук*, 487 (5), 538–542. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652487538-542>
- Спивак, А. А. (2010). Особенности геофизических полей в разломных зонах. *Физика Земли*, 4, 55–66.
- Ступакова, А. В. (2017). Тимано-Печорский бассейн. Строение и основные этапы развития. *Георесурсы. Спецвыпуск*, 1, 56–64. <http://doi.org/10.18599/grs.19.7>
- Тимонин, Н. И. (1998). *Печорская плита: история геологического развития в фанерозое*. Диссертация... д-ра геол.-минерал. наук.
- Трифонов, В. Г. (2001). Живые разломы земной коры. *Соровский образовательный журнал*, 7 (7), 66–74.
- Удоратин, В. В., Мартышко, П. С., Овчаренко, А. В., Угрюмов, И. А. (2012). Сейсмичность европейского северо-востока России и методика геодинимического мониторинга для изучения ее природы. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 10, 8–13.
- Удоратин, В. В., Езимова, Ю. Е., Магомедова, А. Ш. (2017). Объемная активность радона в пределах разломных зон Кировско-Кажимского и Печоро-Колвинского авлакогенов. *Литосфера*, 17 (6), 136–152.
- Удоратин, В. В., Магомедова, А. Ш., Езимова, Ю. Е. (2018). Комплексные геофизические исследования разломных зон Вычегодского прогиба. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 12, 3–11. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-12-3-11>
- Удоратин, В. В., Носкова, Н. Н. (2018). *Глубинное строение и сейсмичность Кировско-Кажимского авлакогена*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН.
- Удоратин, В. В., Магомедова, А. Ш., Езимова, Ю. Е. (2019). Локальная радоновая аномалия в зоне Вычегодско-Локчимского разлома. *Известия Коми научного центра УрО РАН*, 1(37), 76–82. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2019-1-76-82>
- Удоратин, В. В., Магомедова, А. Ш., Езимова, Ю. Е. (2020). Результаты геофизических исследований Западно-Тиманского разлома. *Известия Коми НЦ УрО РАН*, 1(41), 55–68. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-55-68>
- Уткин, В. И. (2000). Радоновая проблема в экологии. *Соровский образовательный журнал*, 6 (3), 73–80.
- Шулейкин, В. Н. (2010). Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация Земли. *Георесурсы, геознергетика, геополитика*, 1, 1–13.

- Al-Hilal, M. and Al-Ali, A. (2010). The role of soil gas radon survey in exploring unknown subsurface faults at Afamia B dam, Syria. *Radiation measurements*, 45, 219–224.
- Al-Tamimi, M. H. and Abumurad, K. M. (2001). Radon anomalies along faults in North of Jordan. *Radiation Measurements*, 34, 397–400.
- Annunziatellis, A., Beaubien, S. E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M. and Lombardi, S. (2008). Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Laters caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage. *International journal of greenhouse gas control*, 2, 353–372.
- Chenhua Li, Hejun Su, Hui Zhang and Huiling Zhou (2016). Correlation between the spatial distribution of radon anomalies and fault activity in the northern margin of West Qinling Fault Zone, Central China. *Journal Radionalytical and Nuclear Chemistry*, 308 (2), 679–686.
- Ciotoli, G., Bigi, S., Tartarello, C., Sacco, P., Lombardi, S., Ascione, A. and Mazzoli, S. (2014). Soil gas distribution in the main coseismic surface rupture zone of the 1980, M_s=6.9, Irpinia earthquake (southern Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 2440–246. <https://doi.org/10.1002/2013JB010508>
- Ciotoli, G., Lombardi, S. and Annunziatellis, A. (2007). Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy. *J. Geophys. Res.*, 112 (B05407). <https://doi.org/10.1029/2005JB004044>
- Davidson, J., Fairley, J., Nicol, A., Gravley, D. and Ring, U. (2016). The origin of radon anomalies along normal faults in an active rift and geothermal area. *Geosphere*, 12(5), 1657–1669. <https://doi.org/10.1130/GES01321.1>
- Fernandez, D., Fusella, E., Avila, Yi., Salas, Jh, Neixeira, D, Fernandez, G, Sajo Bohus L., Greaves E., Barros H., Bolivar M. and Regalado J. (2016). Soil gas radon and toron measurement in some Venezuelan oilfields. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307, 801–810. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4354-4>
- Guerra, M. and Lombardi, S. (2001). Soil-gas method for tracing neotectonics faults in clay basins: the Pistitici field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339, 511–522.
- Ioannides, K., Papachristodoulou, C., Stamoulis, K., Karamanis, D., Pavlides, S., Chatzipetros, A. and Karakala, E. (2003). Soil gas radon: a tool for exploring active faults zones. *Applied radiation and isotopes*, 59, 205–213.
- Kemski, J., Klingel, R., Schneiders, H., Siehl, A. and Wiegand, J. (1992). Geological structure and geochemistry controlling radon in soil gas. *Radiation protection dosimetry*, 45 (1/4), 235–239.
- King, C., King, B. and Evans, W. C. (1996). Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 11, 497–510.
- King, C., Zhang W. and King, B. (1993). Radon anomalies on three kinds of faults in California. *Pure and applied geophysics*, 141, 111–124.
- Kunturo, Yu., Setiawan, H., Wijayanti, T. and Haerudin, N. (2018). The correlation between radon emission concentration and subsurface geological condition. *41st HAGI Annual convention and Exhibition 2016. 26–29 September 2016, Lampung, Indonesia*, 132, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/132/1/012020>
- Lopez, J., Dena Ornelas, O., Sajo-Bohus, L. and Rodriguez, G. (2016). Correlation between underground radon gas and dormant geological faults. *Journal of Nuclear Physics. Material Sciences, Radiation and Applications*, 4 (1), 265–275. <https://doi.org/10.15415/jnp.2016.41025>
- Miklyayev, P. S., Petrova, T. B., Marennyy, A. M., Scchitov, D. V., Sidyakin, P. A., Murzabekov, M. A. and Lopatin, M. N. (2020). High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions). *Journal of Environmental Radioactivity*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106271>
- Moreno, V., Bach, J., Font, Ll., Baixeras, C., Zarroca, M., Linares, R. and Roque, C. (2016). Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 293–303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.018>
- Seminsky, K. Zh. and Demberel, S. (2013). The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia. *Radiation Measurements*, 49, 19–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.12.013>
- Sun, X., Yang, P., Xiang, Y., Si, X. and Liu, D. (2017). Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments. *Geosciences Journal*, 22 (2), 227–239. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0028-2>
- Udoratin, V. V., Ezimova, Yu. Ye. and Magomedova, A. Sh. (2020). Technique for measuring radon volumetric activity in platform region. *Izvestiya, physics of the solid Earth*, 56 (4), 558–569.

- Walia, V., Mahajan, S., Kumar, A., Singh, S., Bajwa, B. S., Dhar, S. and Yang, T. F. (2008). Fault delineation study using soil-gas method in the Dharamsala area NW Himalayas, India. *Radiation Measurements*, 43, 337–342.
- Xuan, P. T., Duong, N. A., Chinh, V. V., Dang, P. T., Qua, N. X. and Pho, N. V. (2020). Soil gas radon measurements for indentifying active faults in Thua Thien Hue (Vietnam). *Journal of environment protection*, 8, 44–64. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.87003>
- Yang, Y., Li, Y., Guan, Z., Chen, Z., Zhang, L., Chao, Jia Lv and Sun, F. (2018). Correlation between the radon concentration in soil gas and the activity of Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China. *Applied Geochemistry*, 89, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.11.006>

Статья поступила в редакцию 13 января 2021 г.
Статья рекомендована к печати 6 декабря 2021 г.

Контактная информация:

Езимова Юлия Евгеньевна — ezimova89@mail.ru
Удоратин Валерий Вячеславович — udoratin@geo.komisc.ru
Магомедова Александра Шамильевна — asmagomedova@geo.komisc.ru

Patterns of manifestation of faults of the Pechora-Kolvinsky aulacogen in the radon field

Yu. E. Ezimova, V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova

Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
54, Pervomayskaya ul., Syktyvkar, 167982, Russian Federation

For citation: Ezimova, Yu. E., Udoratin, V. V., Magomedova, A. Sh. (2022). Patterns of manifestation of faults of the Pechora-Kolvinsky aulacogen in the radon field. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (1), pp. 20–49. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.102> (In Russian)

The article presents results of an express radon survey on the territory of the Pechora-Kozhvin'sky and Kolvinsky megswells, which are part of the Pechora-Kolvinsky aulacogen. Radon studies were carried out along profiles across the large structure-forming faults, identified on the basis of seismic data. The results show that faults in the radon field correspond to areas with increased values of the radon volumetric activity. In the course of radon studies, main patterns of the manifestation of faults in the radon field were established. The faults may correspond to the maxima of volume activity of radon against the background of low values or to zones with a minimum concentration of radon. In addition, areas with abnormal radon concentrations not associated with known fractures were identified. The systems faults are characterized by wider radon anomalies or alternation of maxima and minima of radon volumetric activity along the profile. The maximum radon concentration is recorded in the fault zones that are closest to the surface, as well as in faults along which large amplitudes of vertical displacements are noted. Similar levels of radon concentration are observed within the normal faults and thrust faults, covered by sedimentary rocks. Most of the studied faults, according to the relative indicator of radon activity, belong to the group of high radon activity. The concentration of radon in the soil air within the faults varies both in the transverse and longitudinal directions. In some areas, the radon volumetric activity of at the same level at different times. This proves the existence of a constant radon flux. The main factors affecting the formation, transport to the surface, and accumulation of radon in the soil are the composition and depth of the basement, the internal structure of fault zones, the degree of porosity and fracturing of rocks and modern geodynamics of the region. Thus, radon survey as an additional method to other geophysical methods can be used to map faults and identify various blocks that differ in fluid-geochemical features.

Keywords: Pechora-Kolvinsky aulacogen, faults, radon volumetric activity, geophysical fields, Baikal basement.

References

- Al-Hilal, M. and Al-Ali, A. (2010). The role of soil gas radon survey in exploring unknown subsurface faults at Afamia B dam, Syria. *Radiation measurements*, 45, 219–224.
- Al-Tamimi, M. H. and Abumurad, K. M. (2001). Radon anomalies along faults in North of Jordan. *Radiation Measurements*, 34, 397–400.
- Annunziatellis, A., Beaubien, S. E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M. and Lombardi, S. (2008). Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Laters caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage. *International journal of greenhouse gas control*, 2, 353–372.
- Belonin, M. D., Budanov G. F., Danilevsky S. A., Prishchepa, O. M. and Teplov, E. L. (2004). *Timano-Pechora province: geological structure, oil and Gas and development prospects*. St Petersburg: Nedra Publ., 396 p. (In Russian)
- Belyakova, L. T., Bogatskiy, V. I., Bogdanov, B. P., Dovzhikova, E. G. and Laskin, V. M. (2008). *The foundation of the Timan-Pechora oil and gas basin*. Kirov: Kirovskaia oblastnaia tipografiya Publ, 228 p. (In Russian)
- Berezina, E. V. (2014). *Ground-level concentrations and fluxes of radon-222 in Russia, and estimates of biogenic emissions of carbon dioxide, methane, and dry deposition of ozone*. PhD of Physical and Mathematical Sciences. (In Russian)
- Bogdanov, M. M., Koryukina, N. G. and Lapkina, N. S. (2002). Paleotectonic and thermobaric preconditions for the formation of hydrocarbon clusters in the carbonate lower paleozoic complex of Pechoro-Kolvinsky aulocogen Timano-Pechora basin. *Geology, geophysics and oil and gas development*, 10, 28–35 (In Russian)
- Chenhua Li, Hejun Su, Hui Zhang, huiling Zhou (2016). Correlation between the spatial distribution of radon anomalies and fault activity in the northern margin of West Qinling Fault Zone, Central China. *Journal Radionalytical and Nuclear Chemistry*, 308 (2), 679–686.
- Ciotoli, G., Bigi, S., Tartarello, C., Sacco, P., Lombardi, S., Ascione, A. and Mazzoli, S. (2014). Soil gas distribution in the main coseismic surface rupture zone of the 1980, M_s=6.9, Irpinia earthquake (southern Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 2440–246. <https://doi.org/10.1002/2013JB010508>
- Ciotoli, G., Lombardi, S. and Annunziatellis, A. (2007). Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy. *J. Geophys. Res.*, 112 (B05407). <https://doi.org/10.1029/2005JB004044>
- Davidson, J., Fairley, J., Nicol, A., Gravley, D. and Ring, U. (2016). The origin of radon anomalies along normal faults in an active rift and geothermal area. *Geosphere*, 12 (5), 1657–1669. <https://doi.org/10.1130/GES01321.1>
- Dovzhikova, E. G. (2007). *Late Cambrian magmatism of the Pechora fault zone (central part of the Pechora plate)*. PhD of Geological and Mineralogical sciences. (In Russian)
- Druzhinin, V. S., Martyshko, P. S., Nachapkin, N. I., Osipov, V. Yu. and Udoratin, V. V. (2013). Precambrian model of the Timan-Pechora geoblock. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 19, 1–8. (In Russian)
- Ezimova, Yu. E., Udoratin, V. V. and Magomedova, A. Sh. (2017). Localization of tectonic disturbances of Pechora-Kolvinsky aulacogen according to seismic data and their manifestation in the radon field. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 9, 23–29. (In Russian)
- Fernandez, D., Fusella, E., Avila, Yi., Salas, Jh, Neixeira, D, Fernandez, G, Sajo Bohus L., Greaves E., Barros H., Bolivar M. and Regalado J. (2016). Soil gas radon and toron measurement in some Venezuelan oilfields. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307, 801–810. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4354-4>
- Guerra, M. and Lombardi, S. (2001). Soil-gas method for tracing neotectonics faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339, 511–522.
- Ioannides, K., Papachristodoulou, C., Stamoulis, K., Karamanis, D., Pavlides, S., Chatzipetros, A. and Karakala, E. (2003). Soil gas radon: a tool for exploring active faults zones. *Applied radiation and isotopes*, 59, 205–213.
- Kemski, J., Klingel, R., Schneiders, H., Siehl, A. and Wiegand, J. (1992). Geological structure and geochemistry controlling radon in soil gas. *Radiation protection dosimetry*, 45 (1/4), 235–239.
- Kilyakov, A. V. (2013). The history of the development of emanation methods and their role in oil geology. *Saratov University Bulletin. New ser. Ser. Earth Sciences*, 2, 57–60. (In Russian)
- King, C., King, B. and Evans, W. C. (1996). Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 11, 497–510.

- King, C., Zhang W. and King, B. (1993). Radon anomalies on three kinds of faults in California. *Pure and applied geophysics*, 141, 111–124.
- Kunturo, Yu., Setiawan, H., Wijayanti, T. and Haerudin, N. (2018). The correlation between radon emission concentration and subsurface geological condition. *41st HAGI Annual convention and Exhibition 2016. 26–29 September 2016, Lampung, Indonesia*, 132, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/132/1/012020>
- Kuz'min, Yu. O. (2007). Modern fault geodynamics and environmental and industrial safety of oil and gas facilities. *Geology, geophysics and development of oil and gas deposits*, 1, 33–40. (In Russian)
- Kuz'min, Yu. O. (2016). Modern geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 5, 87–101. (In Russian)
- Levshenko, V. T. and Grigoryan A. G. (2015). Using the data of complex studies in determining the position of faults in platform areas (on the example of the Roslavl fault). *Geophysical Research*, 16 (3), 55–62. (In Russian)
- Levshenko, V. T. and Grigoryan A. G. (2018). Determination of the position of seismically active faults in platform regions based on complex profile observations. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2, 25–32 (In Russian)
- Lopez, J., Dena Ornelas, O., Sajo-Bohus, L. and Rodriguez, G. (2016). Correlation between underground radon gas and dormant geological faults. *Journal of Nuclear Physics. Material Sciences, Radiation and Applications*, 4 (1), 265–275. <https://doi.org/10.15415/jnp.2016.41025>
- Magomedova, A. Sh., Udoratin, V. V. and Ezimova, Yu. E. (2015). Reflection of fault zones and explosion tubes of the Middle Timan in geophysical fields. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 10, 28–34. (In Russian)
- Matveev, A. V., Avtushko, M. I., Karabanov, A. K., Nechiporenko, L. A. and Plyusnin, S. M. (2014). The influence of zones of discontinuous disturbances on the concentration of radon in the soil air on the territory of Belarus, *Geohim. ta rudoutv*, 34, 69–77. (In Russian)
- Miklyayev, P. S. (2015). *Scientific basis for assessing the potential radon hazard of platform areas*: PhD of Geological and Mineralogical Sciences. (In Russian)
- Miklyayev, P. S., Petrova, T. B., Marennyy, A. M., Scchitov, D. V., Sidyakin, P. A., Murzabekov, M. A. and Lopatin, M. N. (2020). High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions). *Journal of Environmental Radioactivity*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106271>
- Miklyayev, P. S. and Petrova, T. B. (2021). Studies of anomalous seasonal variations in radon flux density in the fault zone. *Geochemistry*, 66 (4), 364–378. (In Russian)
- Moreno, V., Bach, J., Font, Ll., Baixeras, C., Zarroca, M., Linares, R. and Roque, C. (2016). Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 293–303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.018>
- Noskova, N. N. (2019). Seismicity of the territory of the Komi Republic for 2000–2018. *Modern methods of processing and interpretation of seismological data, materials of the XIV International Seismological School of the Republic of Moldova*. Obninsk: Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”, 72. (In Russian)
- Osadchaya, G. G. and Hohlova, E. S. (2013). Optimization of nature management in the development of territorial resources of the southern permafrost zone of the Bolshezemelskaya tundra. *Earth cryosphere*, 17 (3), 35–43. (In Russian)
- Parovik, R. I., Shevtsov, B. M., and Firstov, P. P. (2008). A model of radon transfer in the superdiffusion mode in a fractal medium. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*, 10 (2), 79–85. (In Russian)
- Prishchepa, O. M., Bogatskiy, V. I., Makarevich, V. N., Chumakova, O. V., Nikonov, N. I., Kuranov, A. V. and Bogdanov, M. M. (2011). New ideas about tectonic and oil and gas geological zoning of the Timan-Pechora oil and gas province. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 6 (4), 1–34. (In Russian)
- Rudakov, V. P. (2009). *Emanation monitoring of geo-environments and processes*. Moscow: Nauchny mir Publ., 176 p. (In Russian)
- Seminskiy, K. Zh., Cheremnyh, A. V., Bobrov, A. A. and Kozhevnikov, N. O. (2009). Fault zones of the Baikal region: internal structure and geophysical fields. *Tectonophysics and current issues about the Earth*, 2, 151–156. (In Russian)
- Shuleykin, V. N. (2010). Radon of soil and atmospheric air and degassing of the Earth. *Georesources, geo-energy, geopolitics*, 1, 1–13. (In Russian)

- Seminsky, K. Zh. and Demberel, S. (2013). The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia. *Radiation Measurements*, 49, 19–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.12.013>
- Sun, X., Yang, P., Xiang, Y., Si, X. and Liu, D. (2017). Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments. *Geosciences Journal*, 22 (2), 227–239. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0028-2>
- Seminskiy, K. Zh., Bobrov, A. A. and Demberel, S. (2019). Ratio of radon and tectonic activity of faults in central Mongolia. *Reports of the Academy of Sciences*, 487 (5), 538–542. (In Russian)
- Spivak, A. A. (2010). Features of geophysical fields in fault zones. *Izvestiya, physics of the solid Earth*, 4, 55–66. (In Russian)
- Stupakova, A. V. (2017). Timan-Pechora basin. The structure and main stages of development. *Georesources. Special issue*, 1, 56–64. (In Russian)
- Sun, X., Yang, P., Xiang, Y., Si, X. and Liu, D. (2017). Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments. *Geosciences Journal*, 22 (2), 227–239. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0028-2>
- Timonin, N. I. (1998). *Pechora plate: history of geological development in the Phanerozoic*. PhD of Geological and Mineralogical Sciences. (In Russian)
- Trifonov, V. G. (2001). Living faults of the earth's crust. *Soros educational journal*, 7 (7), 66–74. (In Russian)
- Udoratin, V. V., Martyshko, P. S., Ovcharenko, A. V. and Ugryumov, I. A. (2012). Seismicity of the European North-East of Russia and the method of geodynamic monitoring to study its nature. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 10, 8–13. (In Russian)
- Udoratin, V. V., Ezimova, Yu. E. and Magomedova, A. Sh. (2017). Volume radon activity within the fault zones of the Kirov-Kazhim and Pechora-Kolvich aulacogens. *Lithosphere*, 17 (6), 136–152. (In Russian)
- Udoratin, V. V. and Noskova, N. N. (2018). *The deep structure and seismicity of the Kirov-Kazhim aulacogen*. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS Publ., 208 p. (In Russian)
- Udoratin, V. V., Magomedova, A. Sh. and Ezimova, Yu. E. (2018). Complex geophysical studies of fault zones of the Vychegda depression. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 12, 3–11. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-12-3-11> (In Russian)
- Udoratin, V. V., Magomedova, A. Sh., Ezimova, Yu. E. (2019). Local radon anomaly in the zone of the Vychegda-Lokchim fault. *Izvestiya Komi SC UB RAS*, 1 (37), 76–82. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2019-1-76-82> (In Russian)
- Udoratin, V. V., Ezimova, Yu. Ye. and Magomedova, A. Sh. (2020). Technique for measuring radon volumetric activity in platform region. *Izvestiya, physics of the solid Earth*, 56 (4), 558–569. <https://doi.org/10.1134/S1069351320040096>
- Udoratin, V. V., Magomedova, A. Sh. and Ezimova, Yu. E. (2020). Results of geophysical studies of the West Timan fault. *Izvestiya Komi SC UB RAS*, 1 (41), 55–68. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-55-68> (In Russian)
- Utkin, V. I. (2000). Radon problem in ecology. *Sorovsky educational journal*, 6 (3), 73–80. (In Russian)
- Walia, V., Mahajan, S., Kumar, A., Singh, S., Bajwa, B. S., Dhar, S. and Yang, T. F. (2008). Fault delineation study using soil-gas method in the Dharamsala area NW Himalayas, India. *Radiation Measurements*, 43, 337–342.
- Xuan, P. T., Duong, N. A., Chinh, V. V., Dang, P. T., Qua, N. X. and Pho, N. V. (2020). Soil gas radon measurements for indentifying active faults in Thua Thien Hue (Vietnam). *Journal of environment protection*, 8, 44–64. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.87003>
- Yang, Y., Li, Y., Guan, Z., Chen, Z., Zhang, L., Chao, Jia Lv and Sun, F. (2018). Correlation between the radon concentration in soil gas and the activity of Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China. *Applied Geochemistry*, 89, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.11.006>

Received: January 13, 2021
Accepted: December 6, 2021

Contact information:

Yuliya E. Ezimova — yeezimova@geo.komisc.ru
Valeriy V. Udoratin — udoratin@geo.komisc.ru
Aleksandra Sh. Magomedova — asmagomedova@geo.komisc.ru