

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Кемеровский государственный университет

На правах рукописи

ЛЕШУКОВ Тимофей Владимирович

РАДОНОВАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ
ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ (НА ПРИМЕРЕ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО
БАССЕЙНА)

Специальность 25.00.36 –Геоэкология (науки о Земле)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Кемерово

2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ РАДОНОВОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ.....	10
1.1. Радон и его влияние на человека.....	10
1.2. Оценка радоновой опасности естественных ландшафтов.....	11
1.3. Оценка радоновой опасности техногенных ландшафтов, связанных с добычей полезных ископаемых	20
1.4. Выявление потенциальных естественных и техногенных источников радоновой опасности в Ленинск-Кузнецком районе.....	26
ГЛАВА 2. ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДОНОВОЙ ОПАСНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ	34
2.1. Методика территориальной оценки	34
2.2. Пространственная оценка потенциальных источников радоновой опасности	37
2.3. Территориальная оценка жилых строений с учетом потенциальных источников радоноопасности геологической среды	42
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ НА ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА РАДОНА ИЗ ГРУНТА.....	49
3.1. Методика оценки ППР и формирование групп Case и Control	49
3.2. Характеристика фоновой ППР.....	52
3.3. Характеристика ППР на территории шахтных полей	58
3.4. Оценка влияния шахтных полей на радоновую опасность геологической среды.....	65
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ НА РАДОНООПАСНОСТЬ ЖИЛЫХ СТРОЕНИЙ.....	69
4.1. Методика оценки радоновой опасности помещений	69

4.2. Характеристика ЭРОА в жилых строениях.....	73
4.3. Связь параметров ЭРОА в жилых строениях и радоноопасностью геологической среды.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень разработанности проблемы. Радон в медицинской геологии и географии рассматривается как один из важнейших факторов геологической среды, определяющий рост канцерогенного риска [74, 82, 88, 95, 109], в том числе в бытовых условиях [92, 109, 147, 158].

Естественным источникам радоновой опасности посвящены работы отечественных [11, 35, 38, 54, 60, 121, 127] и зарубежных исследователей [103, 124, 125, 139, 145], при этом изучены механизмы изменения концентрации радона в грунтах, пространственное распределение и связь с тектоническим строением. Антропогенные источники радоновой опасности территории в основном связывают с районами отработки высокорadioактивных руд, где обнаружены изменения радиоактивного фона всех компонентов окружающей среды [64, 66, 71, 104]. При разработке слаборадиоактивных руд, в том числе и угля, существенного изменения радиологических показателей на поверхности, как правило, не фиксируется.

При подземном способе происходит формирование новейших зон трещиноватости пород, которым сопутствуют современные геодинамические процессы. Также к отрабатываемым пространствам на поверхности часто приурочены обильные выходы различных газов, в том числе метана, водорода, радона, угарного, углекислого и др. [117, 146, 154, 155]. На таких территориях радон обычно рассматривается в качестве опасного компонента для работников шахтной выработки [15, 16, 22]. Также он применяется в качестве индикатора подземного горения пластов угля либо выявления зон обрушения кровли отработанного пространства [108, 151, 152], но значительно реже учитывается его влияние на жилые строения на поверхности.

В регионах давно действующих угледобывающих предприятий жилые дома часто располагаются в окрестностях выработок, что может увеличивать

воздействие радона на человека. На таковых территориях Великобритании, Германии, Польши и Украины были зафиксированы высокие концентрации радона в почвенном воздухе во всех исследованиях, при этом для жилых строений получены не одинаковые закономерности [79, 101, 148]. В одних случаях превышение зафиксировано только в подвальных помещениях строений, а в других – и для жилых частей зданий.

В настоящее время отсутствуют работы по выявлению радоновой опасности грунтов в местах интенсивной добычи угля подземным способом в Кузнецком угольном бассейне, что определяет необходимость проведения данного исследования. В Кузбассе большое количество поселений располагается на или в непосредственной близости к территориям добычи угля, что может приводить к повышенному канцерогенному риску, связанному с радоном. Выяснение соотношения высокой плотностью потока радона и подземных выработок необходимо для определения областей, где в зданиях должны быть приняты профилактические меры против радона. Особенно это актуально для старопромышленных регионов с исторически сформированными особенностями расположения районов частной жилой застройки. Ленинск-Кузнецкий район Кемеровской области является одним из старейших и глубоко специализированных территорий добычи угля со значительными площадями шахтных полей, что делает его приемлемым для изучения данных зависимостей с целью их последующей экстраполяции на схожие поселения [30].

Целью работы является выявление радоновой опасности территорий добычи угля подземным способом в Кузнецком угольном бассейне.

Объект исследования – радоновая опасность территорий Кузнецкого угольного бассейна;

Предмет исследования – связь радоновой опасности территорий с добычей угля подземным способом.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих **задач**:

1. Выявить потенциальные естественные и техногенные объекты радоновой опасности;
2. Определить долю территории и жилых строений, расположенных в пределах разных геологических условий эманаций радона на поверхность;
3. Установить влияние подработанных пространств на радоновую опасность грунтов;
4. Выявить изменение объемной активности радона жилых помещений, расположенных в пределах шахтных полей.

Материалы и методы исследования. В диссертационной работе применялись картографический, геоинформационный, сравнительно-географический, статистический методы исследования. Измерение плотности потока радона (ППР) и объемной активности радона (ОАР) осуществлялись автором совместно с сотрудниками Института биологии, экологии и природных ресурсов (ИБЭиПР КемГУ). Измерения ОАР и ППР были произведены с помощью поверенного прибора Камера-01. Статистическая обработка данных осуществлялась с применением программ Microsoft Excel, Statistica. Картографические работы осуществлялись в ArcGIS.

Степень достоверности обеспечена достаточно большим массивом измерений ППР и ОАР. Измерения производились с помощью поверенного прибора Камера-01. В работе проводился внутренний и внешний контроль путем повторного измерения показателей в 10 % точек наблюдения, погрешность определения показателей не выходила за погрешность измерения прибора.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Основной причиной потенциальной радоновой опасности в Кузбассе является активизация разрывных нарушений горных пород в связи с добычей угля подземным способом и появление зон повышенной проницаемости для эманаций, в том числе для радона;
2. Грунты, находящиеся в пределах шахтных полей, характеризуются более высокими показателями плотности потока радона

(среднее - $181,59 \pm 13,32$ мБк/м²*с, максимальное - 3310 мБк/м²*с), чем за их пределами (среднее - $33,07 \pm 1,78$ мБк/м²*с, максимальное - 260 мБк/м²*с);

3. Влияние подземных выработок на радоноопасность жилых строений выражается в более высоком среднем показателе ($168,57 \pm 20,66$ Бк/м³) и росте пиковых значений эквивалентно равновесной объемной активности радона в пределах шахтного поля (1715 Бк/м³) по сравнению с остальной территорией (среднее - $120,97 \pm 14,79$ Бк/м³, максимальное - $304,25$ Бк/м³).

Научная новизна заключается в следующем:

- впервые для территории старопромышленного угледобывающего района в пределах Кузнецкого угольного бассейна выделены потенциальные источники радоновой опасности и обозначена существенная роль в них антропогенных на участках добычи угля подземным способом;

- обнаружено влияние подземного способа добычи угля на радоновую опасность грунтов Кузнецкого угольного бассейна, которое выражается в росте плотности потока радона;

- установлен рост концентрации радона в жилых строениях в пределах шахтных полей для территории Кузнецкого угольного бассейна и доказана его геогенность.

Теоретическая и практическая значимость. Материалы диссертационной работы могут быть использованы при разработке областных и муниципальных программ по охране окружающей среды, градопланировании территорий индивидуальной жилищной застройки в Кемеровской области, особенно в районах развития или планирования угледобычи подземным способом; при изучении в высших учебных заведениях дисциплин, связанных с влиянием внешней среды на человека, а также с описанием качества окружающей среды в Кемеровской области, экологической демографии, безопасности жизнедеятельности, медицинской географии и медицинской геологии.

Теоретические и практические рекомендации используются Институтом биологии, экологии и природных ресурсов КемГУ при чтении курсов «Экология Кемеровской области», «Геоэкология», «Экологическая геология».

Апробация работы. Результаты докладывались и обсуждались на международных и региональных конференциях: Конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения", г. Юрга (2018 г.); IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле, г. Новосибирск (2018 г.); II-я Всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные аспекты устойчивого развития ресурсных регионов", г. Новокузнецк (2019 г.); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения», г. Юрга (2019 г.); III Симпозиум «Междисциплинарные подходы в биологии, медицине и науках о Земле: теоретические и прикладные аспекты», г. Кемерово (2020 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в Web of Science.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основное содержание работы изложено на 105 страницах. Включает 19 таблиц и 25 рисунков. Список литературы состоит из 158 наименований, из них 85 на иностранном языке.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в сборе, анализе, статистической обработке и обобщении результатов исследований по взаимосвязи подработанных пространств и радоновой опасности территорий, а также построении картографических материалов в среде ArcGIS.

Выражаем благодарности научному руководителю, профессору, д.т.н. Лесину Ю.В.; сотрудникам ИБЭиПР КемГУ доценту, к.б.н. Ларионову А. В., старшему преподавателю Легощину К. В.

Исследование выполнялось в рамках научного проекта РФФИ № 18-35-00390, в котором автор выступал в качестве руководителя.

ГЛАВА 1. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ РАДОНОВОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

1.1. Радон и его влияние на человека

Радон и его дочерние продукты распада (ДПР) являются одними из главных естественных источников облучения человека [78, 82]. Радон за счет преимущественно ингаляционного поступления, которое осуществляется в основном внутри помещений, определяет от 60 до 80 %, в зависимости от региона, дозу природного облучения человека [7, 21].

Всемирная организация здравоохранения определяет радиационную нагрузку, связанную с радоном и его ДПР, как ключевую для рака легких, после употребления табака [67, 158]. Радон в медицинской геологии и географии рассматривается как один из важнейших факторов геологической среды, существенно определяющих заболеваемость населения, имеющий достаточную доказательную базу [23, 112]. Например, для отдельных территорий Алтайского края со средней концентрацией радона от $27,3 \pm 2,4$ Бк/м³ до $68,8 \pm 6,3$ Бк/м³ и максимальными значениями до $532 \pm 47,3$ Бк/м³ оценка при облучения ДПР радона показала, что пожизненный риск появления рака легкого для населения составляет 11,8 % для мужчин и 9,7 % для женщин [52], что подчеркивает значимость учета данного фактора на таких административных образованиях.

Рассмотрение низкодозового бытового облучения радоном в качестве фактора канцерогенеза началось после масштабных исследований проведенных на целевых группах шахтеров [92, 109, 147]. Был зафиксирован прирост риска развития рака легких в этой профессии.

На основе изучения влияния низкодозового бытового облучения населения, которое заметно ниже радиационной нагрузки на шахтеров, в 9 Европейских странах были определены заметные увеличения риска рака легких. Для некурящих, живущих в строениях с концентрацией радона от 0

до 400 Бк/м³, он оценивался в 0,4-0,7 % к 75-летнему возрасту, а для курящих от 10 до 16 % [88].

По материалам Noh J. и соавторов [115] индекс EBD (Environmental Burden of Disease), который оценивает радон в жилых помещениях, является важным для снижения радиационного воздействия на человека в бытовых условиях. Также в этой работе произведена оценка индекса «потерянных лет жизни» (DALY) для Нидерландов, которая составляла от 1000-14000 DALY, для курящего населения этот показатель в три раза выше. На популяционном уровне данный показатель может существенно снижать продолжительность и качество жизни населения, вызывая дополнительные случаи рака легкого.

Изучение риска развития рака легкого на территории Канады с использованием популяционного исследования «случай-контроль» в многомерных моделях показало, что увеличение радона в жилых строениях на 50 Бк/м³ было связано с увеличением вероятности этого новообразования на 7 % (95 %, ДИ 6-21 %). За каждые 10 лет проживания на территории определенных геологических комплексов, связанных с высоким выходом радона, вероятность развития рака легких увеличивалась на 11 % (95 % ДИ 1-23 %) [98].

В настоящее время радон в жилых строениях рассматривается как важный фактор облучения населения, при защите от которого можно снизить популяционную радиационную нагрузку и, соответственно, уменьшить риски развития рака легких [95].

1.2. Оценка радоновой опасности естественных ландшафтов

Радон, в силу своего малого периода существования, может создавать проблемы для человека в условиях интенсивного накопления, которое осуществляется, как правило, в жилых помещениях [74]. В связи с этим радоновую опасность обычно рассматривают в совокупности с возможностью поступления данного газа в жилище.

Жилые частные дома будут достаточно изотермическими объектами и от этого менее подверженными флуктуациям в отношении поступления радона в жилище [120], что связано с термодинамическими особенностями эманации радона из грунта. Это объясняется температурным оптимумом для человека, соблюдаемым в жилище, создавая пониженное давление, которому соответствует процесс нагнетания радона из грунта в помещение. Это предопределяет большую радиационную опасность данных строений особенно в зимнее время. Наиболее радоноопасными жилищами будут являться одноэтажные частные строения с неизолированным грунтом, что объясняется особенностями вертикальной градиции концентрации радона, которая характеризуется снижением с высотой по логарифмическому закону [140]. Данные обстоятельства, наибольшей радиационной опасности частных жилых строений, подтверждены и достаточно обоснованы во многих работах как в России [5, 36, 37], так и за рубежом [41, 89, 103]. Радоновая опасность жилых строений также зависит и от климатических условий, что связано с конструктивными особенностями зданий и образом жизни населения. Например, в научной работе Kobeissi М.А. и коллег на территории южного Ливана продемонстрировано умеренное сезонное изменение показателей ОАР в жилых строениях [102]. Очевидно предположить, что для территорий большей части России, особенно континентального и резкоконтинентального климата, сезонная амплитуда ОАР, связанная с изоляцией помещения, будет значительно возрастать. Значимость оценки радоноопасности грунтов возрастает с континентальностью климата, прибрежные территории будут более безопасными, в силу большей конвективной и адвективной динамики атмосферы [91]. На территории Оренбургской области ни в одном из обследованных строений в летнее время не было зафиксировано превышения ОАР, а в зимнее время средняя концентрация радона увеличилась в 7 раз [4], очевидно, за счет снижения количества проветриваний.

На сегодняшний день существует тенденция улучшения энергосбережения строений. Но данная закономерность приводит к

увеличению концентрации радона внутри помещения из-за уменьшения естественного обмена внутреннего воздуха с наружным [77].

Скорость выхода радона на поверхность из грунта зависит от температурно-барических условий обеих сред [126]. Модельные исследования, проведенные Kamra L. [99] на скважине с радоновым детектором, показали сильную положительную связь между плотностью потока радона и повышением температуры воздуха в атмосфере, и обратную связь в отношении давления. В работе Сметановой И. и коллег подтверждены связи концентрации радона в скважинном воздухе и температуры воздуха и давления [134].

В естественных условиях выход радона будет иметь суточную, многодневную и годовую изменчивость. Таким образом, колебания плотности потока радона (ППР) будут связаны с естественной динамикой солнечной радиации и давления в атмосфере [6, 13]. Температурные инверсии в атмосфере способны приводить к некоторому изменению концентрации радона в приземном воздухе [139]. Исследования Tchorz-Trzeciakiewicz D.E. и Solecki A.T. [140] также подтвердили сезонность хода радона, где пиковое значение выхода радона регистрировалось осенью, а минимальное зимой, что очевидно объясняется снижением температуры воздуха, увеличением давления и промерзанием грунта. В экспериментальной работе Климшина А. В. по изучению взаимосвязи ОАР грунта и ППР из него были обнаружены сезонные увеличения радона в почвенном воздухе и уменьшение его выхода на поверхность по мере промерзания грунта [19]. Данная особенность может быть связана с постоянным притоком радона из нижележащих горизонтов, но снижением выхода его на поверхность в следствии промерзания грунта. Для жилых строений данная особенность потенциально может не соблюдаться в следствии малого промерзания грунтов под ними, что не препятствует проникновению радона в помещение.

Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В. и Харламов В.А. в своей работе объясняют суточную и сезонную вариацию эманаций радона влиянием деформаций в горных породах, которые под их действием изменяют свои фильтрационные свойства в целом, формируя циклы выхода радона в почвенный воздух [59]. Немного позднее Сухоруков М.В. и Спивак А.А. в экспериментальном исследовании доказывают синхронность временных вариаций на разных глубинах массива горных пород, что подтверждает значимое влияние деформационных процессов на миграцию радона [62]. Центральные участки блоков земной коры в этом случае будут наиболее безопасными. Данные закономерности вариации эманаций радона легли в основу поиска подходящих моделей для прогноза землетрясений [114, 129, 142].

Радоновую опасность естественных ландшафтов и геологической среды длительное время изучают в различных странах, результатом чего являются тематические карты и атласы с оценками территорий и рекомендациями по снижению ионизирующего воздействия данного газа и его ДПР на человека [11, 76, 94, 125]. В масштабном исследовании ППР из грунта в Китае были обнаружены достаточно значимые региональные отличия в уровне радоноопасности территории, который зависели от состава рыхлых отложений, климатических условий региона, увлажненности грунтов и других параметров [156]. Вклад перечисленных факторов в итоговые показатели эманации радона из грунта и его концентрации в помещении в разных странах и их частях отличается, что создает необходимость создания региональных карт и моделей радоновой опасности [90, 124].

Результаты этих работ позволили сформировать представление о радоновой опасности геологической среды, естественных ландшафтов и их компонентов. К радоноопасным территориям относятся урановые металлогенические провинции, где имеются собственно месторождения и рудопроявления урана, геологические формации с повышенным

содержанием урана и радия, связанные с ними подземные воды и тектонические нарушения [40, 60].

Одним из факторов определяющих радоновую опасность является химический состав горных пород [107]. Радон является продуктом серии радиоактивных распадов, начальными элементами которой являются U и Th, которые находятся преимущественно в рассеянном состоянии в земной коре, а непосредственным предшественником является Ra [82, 100]. В исследованиях продемонстрировано, что ППР и ОАР в помещении, имеют прямую связь с петрографическим и петрохимическим составами подстилаемых толщ [87, 97]. Высокая концентрация материнских, по отношению к радону, химических элементов является важным индикатором для определения радоновой опасности территории, что часто используется при составлении тематических картосхем [12, 31, 121]. В этом случае границы выявленных участков с повышенным уровнем опасности в отношении радона могут быть сведены к сменам геологических комплексов пород (свит, серий, комплексов) [80, 86], но ситуацию часто усложняют дополнительные факторы: уровень эксхалляции радона из горной породы, водонасыщенность грунтов, наличие нарушений и другие факторы [35, 137].

Степень целостности породы влияет на уровень эксхалляции радона, что было выявлено на значительном количестве исследований. В работах выявлено, что при измельчении породы происходит значительное увеличение эксхалляции радона, таким образом, при значительной степени естественной раздробленности породы, а геологическая среда, сложенная ей, будет более радоноопасной. Степень целостности породы закономерно возрастает с глубиной и по направлению от зон тектонической нарушенности. Таким образом, это, в общем случае, выражается в виде закономерного снижения радоновой опасности платформ, перикратонных прогибов и других тектонических структур с осадочным чехлом, и увеличению эманации радона на территориях складчатых структур и щитов [8, 73]. Например, в исследовании Marenny A.M. и коллег приведены данные

о значительно большей концентрации радона в жилых помещениях территории Алтая (г. Белокуриха) и Северного Кавказа (г. Лермонтов), по сравнению с центральной Россией (г. Брянск, г. Москва) [110]. Они согласуются с данными масштабного исследования проведенного Федеральным Медико-Биологическим Агенством (ФМБА) на территории России, где города с наиболее высокими показателями ОАР в жилых строениях, в основном одноэтажных, располагались преимущественно в пределах складчатых областей Урала (г. Усть-Катав, г. Снежинск и др.) и Кавказа (г. Лермонтов) [38]. При значительной глубине залегания пород, с высокой концентрацией материнских в отношении радона элементов, при отсутствии транспортных каналов для радона и наличии массивных перекрывающих пород, территория будет относительно безопасна в отношении радона [51, 65]. В продолжении данных работ Микляев П.С. указал на отсутствие поступления радона из глубинных горизонтов в пределах платформенных территорий. В их пределах радиоактивность определяется наличием геодинамически активных зон и содержанием радия [40].

В отдельных работах было выявлено, что разные генетические типы тектонических нарушений, их пространственная характеристика и степень активизации также влияют на их радоновый потенциал. Дизъюнктивные нарушения могут служить транспортными каналами для радона, образованного в местах залегания высокордиоактивных и даже малордиоактивных пород. Также увеличение эманации радона связано с увеличением площади пород, с которых происходит эксхалация газа за счет самого нарушения и часто сопутствующей ему зоне повышенной трещиноватости пород.

Исследования, проведенные на территории разрывных нарушений республики Беларусь, показали, что увеличение почвенного газа радона фиксируется в нарушениях, имеющих современную активность (см. рис.1.) [39].

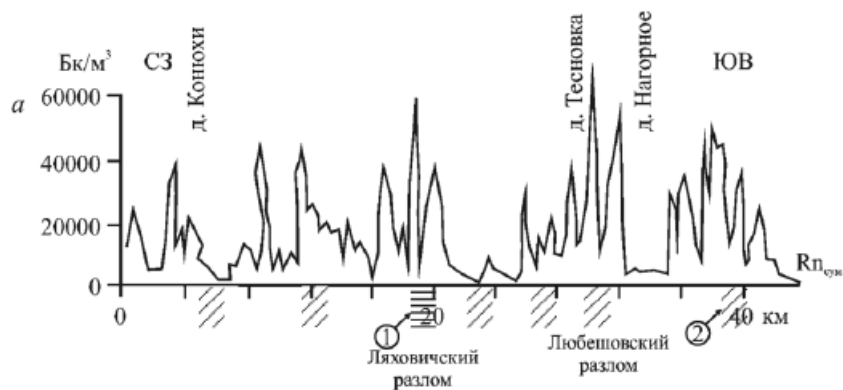


Рис. 1. График изменения концентрации радона в почвенном воздухе в разломах (из материалов статьи Матвеева А.В. и соавторов [39])

В профиле нарушение обычно выражено не точкой с высоким значением ОАР почвенного воздуха, а некоторой областью, что объясняется сложным строением данного участка земной коры, связанного с наличием сопутствующей зоны повышенной трещиноватости пород. Пиковые значения обычно интерпретируется как зона повышенной проницаемости нарушения с тектонической брекчией, а зона минимумов как цельный массив или нарушение, заполненное глиной трения [127, 128]. Форма аномалии может зависеть от степени «залеченности» нарушения. В осевой части ныне активного нарушения формируется один пик, а в «залеченном» глиной трения нарушении пики будут фиксироваться в сопутствующей зоне дробления, но с меньшей выраженностью в ОАР в почве [128]. Поле аномалий радона при этом может выходить за пределы тектонической нарушенности пород.

Нарушения, связанные с зонами растяжения (сбросы), ассоциированы с более высокими значениями выхода радона, чем нарушения зон сжатия (взбросы, надвиги), сдвиги при этом занимают промежуточное положение [143]. Очевидно, что данные закономерности также участвуют в формировании радоновой опасности зон современной складчатости или рифтогенеза [136], одновременно с этим нарушения в фундаменте платформ и участков древней складчатости имеют меньший потенциал для

формирования транспортных путей радона. Несомненно, при анализе радоновой опасности дизъюнктивов необходимо также учитывать состав пород, по которым данное нарушение было сформировано.

В отдельных случаях нарушения способны создавать большую радоновую опасность геологической среды, чем грунты, имеющие повышенные концентрации материнских по отношению к радону элементов, что было показано Астаховым Н.Е. и коллегами в своем исследовании на территории современных нарушений в республике Бурятия [2, 50].

Нарушения могут увеличивать интенсивность миграции радона в глубоких горизонтах подземных вод, что показано в работе Tsunomori F. и соавторов на разломной зоне Тачикава [141]. Также данные особенности миграции радона с водами разломных зон были прослежены для Байкальской рифтовой системы в диссертационной работе Семинского А. К., где концентрация этого газа снижалась вкост простирания главных нарушений, а также имели сезонную выраженность, когда в межень происходит рост растворенного газа, а в паводок – его снижение [54]. Также в инженерных сооружениях или жилых домах концентрации радона могут повышаться в результате проникновения в них вод с большим количеством растворенного радона, которые перемещаются по зонам нарушенности пород [49, 53].

Описанные выше обстоятельства связи роста эманации радона и тектонических нарушений позволило использовать радоновую съемку для картирования разломов самых разных рангов. Карты радоновой опасности в этом случае используют линии дизъюнктивов, при этом, безопасность грунта возрастает перпендикулярно простиранию нарушений.

Сложность при оценке радоновой опасности территорий также связана с влиянием поверхностных рыхлых отложений на выход радона [119, 123]. Важными детерминантами в этом случае называют гранулометрический состав, водонасыщенность, мощность и другие характеристики поверхностных отложений. В работах Shweikani R. и др. [131], Zhuo V. и др. [157] отмечается корреляционная связь между пористостью,

влажностью и гранулометрическим составом. Например, увеличение влаги в период выпадения осадков приводит к снижению потока радона из грунта за счет уменьшения свободных пор, через которые может осуществляться диффузия газа. Процессы инфильтрации подземных вод могут выносить радиоактивное вещество в зону окисления, что приводит к увеличению плотности потока радона. Размерность обломочного материала определяет размеры пор, которые влияют на содержание в почвенном воздухе радона и его плотность потока с поверхности почвы. Таким образом, в местах залегания глинистых грунтов, плотность потока и объемная активность радона в почве значительно ниже, чем в песках, при условии отсутствия значительного количества ранее адсорбированных радиоактивных элементов, материнских по отношению к радону.

В работе Szabo K.Z. и соавторов по картированию геогенных факторов радоновой опасности на территории Венгрии было показано их пространственная неоднородность [138]. Наибольшая концентрация радона фиксировалась в пролювиально-делювиальных отложениях на склонах гор и холмов. Среди флювиальных отложений выделялись аллювий межгорных впадин, а для равнинных территорий характерны низкие показатели. На территории Швеции было обнаружено, что почвенный радон в основном производится частицами самого грунта, а транспортировка газа с глубины происходит в исключительных случаях, которым, например, является геодинамически активное нарушение [75]. Также плотность потока радона может возрасти с увеличением мощности зоны выветривания в интрузивных телах, что связано с увеличением площади частиц элювия для эксхалации [12, 144].

Снижение мощности рыхлого материала и его водонасыщенности в горных системах приводит к упрощению построения схем радоновой опасности, при этом в местах распространения равнинных рек со значительными наносами данные схемы могут значительно усложняться. Большое количество факторов, определяющих радоновую опасность, часто

создает проблемы в анализе данных [83] и построении прогнозных карт [93, 113].

Многие страны уже содействовали проведению исследований радоновой опасности территорий, с целью определения географических районов, где можно с высокой вероятностью обнаружить опасные концентрации радона в помещении [118, 145]. Таким образом, правила оценки радоновой опасности естественных ландшафтов, в зависимости от территории, будут отличаться выделением ключевых и второстепенных факторов, что и делается в мире для стран [76, 83, 84] и регионов [14, 34, 56, 135].

1.3. Оценка радоновой опасности техногенных ландшафтов, связанных с добычей полезных ископаемых

Естественные факторы радоновой опасности могут значительно дополняться антропогенными, при этом происходит усложнение территориальных особенностей аномальных зон.

Техногенные ландшафт и геологическая среда, образуемые в местах добычи полезных ископаемых, в отдельных случаях характеризуются изменениями радиационных параметров территории, в том числе и эманации радона. Эти преобразования связаны с различными процессами изменения компонентов естественных ландшафтов и геологической среды, главными из которых являются:

- пространственное изменение геохимического фона;
- локальное изменение геодинамической и тектонической характеристики блоков земной коры.

Пространственное изменение геохимического фона происходит по причине загрязнения различных компонентов окружающей среды в местах добычи полезного ископаемого, его складирования и транспортировки. Данные закономерности достаточно хорошо изучены на территориях

предприятий по добыче радиоактивных руд как ныне действующих, так и законсервированных или закрытых [32, 104, 111].

Локальное изменение геодинамической и тектонической характеристики блоков земной коры, которое сопровождается образованием дополнительной трещиноватости в горных породах, которая в этом случае будет являться транспортной системой для радона. Ведение горных работ сопровождается значительным дроблением горного массива, что приводит к увеличению эманации радона с горных пород за счет увеличения площади эксхалляции. Это утверждение подтверждается в работе Rout R.P. и соавторов [122] по оценке эксхалляции радона из обломков, которые предварительно разделили на фракции, в которой была получена отрицательная корреляционная связь выхода радона в пространство между зернами с крупностью обломков. Геодинамическая активность формируется по причине возрастания и изменения направления внутриблокового давления в геологической среде, которое часто сопровождается техногенными землетрясениями, просадками грунта и другими явлениями. По аналогии с исследованиями проведенными на естественных массивах горных пород, при процессе подготовки землетрясения, радон стремится на поверхность в зону более низкого давления [153].

Главенствующее влияние приведенных факторов изменения радиационных параметров территории не однородно для всех отработываемых месторождений. Для территорий с добычей радиоактивных руд будет фиксироваться множество путей существенного распространения радиоактивного вещества. В пос. Октябрьский Краснокаменского района Читинской обл., располагающегося на территории промышленной зоны уранового горнорудного управления ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО), были зафиксированы множественные пути распространения радиоактивного вещества, с возникновением целого ряда радоноопасных зон [66, 70, 71]. Одна из зон связана с участками выноса радиоактивного вещества с шахтными водами,

где с некоторой периодичностью происходили аварийные ситуации, приводящие к созданию радоновой аномалии на площади затопления этими водами. Вторым путем повышения радонового фона был связан с рассеиванием пылевой фракции в технологическом процессе добычи урана. Третий путь был связан с возникновением трещиноватости в грунтах над шахтной выработкой в процессе горных работ, что приводило к формированию новых транспортных путей для радона. Расположенные жилые строения в пределах данного производственного комплекса характеризовались высоким показателем ЭРОА. 39 % жилого фонда имели показатель ЭРОА выше 200 Бк/м³, 30 % находились в пределах 100-200 Бк/м³, а 30 % имели концентрацию радона ниже 100 Бк/м³. В данном случае при большом наборе факторов антропогенного происхождения большая часть жилых домов стала крайне опасной для населения. На производственном комплексе ЛПО «Алмаз» на законсервированном производстве рост эманации радона фиксировался лишь на выходах вентиляционных каналов и штолен для шахты [64].

При добыче слаборадиоактивных полезных ископаемых, таких как уголь, главным фактором будет изменение геодинамических и тектонических параметров обрабатываемого горного массива. Изменение геохимического фона при использовании угля, в части изменения плотности потока радона, связано со складированием, транспортировкой и промышленной переработкой [96]. В исследованиях Singh L.M. и соавторов [132], и Сидорова Г.П., Крылова Д.А. [57] были изучены золы, получаемые в результате сжигания угля, которые показали значительное количество радиоактивных компонент в этих продуктах, что в перспективе может влиять на изменение радонового фона. В исследовании Арбузова С.И. и коллег было представлено, что накопление урана в торфе и углях - это закономерный процесс, который сопровождается аккумуляцией этого элемента в органическом веществе (в сорбированном виде и других гуматных комплексах), а также в виде минеральных форм [1]. Подтверждением этому

является исследование концентрации материнских по отношению к радону радионуклидов в углях, шлаках и летучей золе топливных электростанций [58]. Соответственно, при всех технологических процессах, радиоактивные компоненты, входящие в состав углей, рассеиваются от первоначального местонахождения, либо концентрируются в золах и рассеиваются уже в более высоких значениях, что может изменять радоновый фон в местах расположения производственных комплексов.

При добыче угля подземным способом, как правило, изменение радиационных показателей происходит в пределах обрабатываемого пространства под землей и давно уже стало контролироваться службами предприятий и нормативами [61, 133]. Например, в шахтах Подмосковского бурогоугольного бассейна повышение концентрации радона связано с перекрывающими толщами с повышенным содержанием урана, угольными пластами и подземными водами [15, 16]. Также опасными источниками радиационного загрязнения являются отвалы, концентрация урана в которых может превышать фоновые [55]. В шахтах Кемеровской области зафиксированы превышения ЭРОА от 410 Бк/м³ до 6000 Бк/м³ [22]. В данном случае этому фактору подвержены работники предприятия, что увеличивает индивидуальный профессиональный риск.

В пределах шахтных полей может происходить увеличение эманации радона вследствие подземного горения пластов угля в обрабатываемых или старых выработках. Данные закономерности хорошо изучены на материалах предприятий Австралии [151, 152] и Китая [108].

Более значительным и мало оцененным в отношении радоновой опасности для всего населения угледобывающих поселений является фактор изменения тектонической и геодинамической характеристики горного массива при подземной отработке, и последующий за ним рост эманации радона на поверхность. Это касается жилых строений, над отработанным полем, в которых может проживать существенное количество людей.

Для вновь образованных выработок были проведены исследования на территории месторождения, находящегося в автономном регионе Внутренней Монголии Китайской народной республики. Получены данные об увеличении плотности потока радона на дневную поверхность в пределах территории неглубоко залегающих к поверхности угольных пластов, которые в настоящее время обрабатываются [146, 154, 155]. Рост эманации радона был приурочен к зонам проседания, которым сопутствовали трещины растяжения в области выработки угольных пластов.

На территории Донецкого угольного бассейна были обнаружены повышенные потоки метана на поверхность по трещинам, сформированным в результате добычи угля в шахтах [117]. Данные трещины могут служить транспортными каналами для радона согласно исследованиям Клещенко А.В. [18], в которых приводится доказательство связи современных геодинамически активных зон с аномалии газов радона, метана и водорода.

На территории Германии было проведено исследование влияния вновь и недавно образованных (спустя 2 года со дня начала отработки) подземных выработок угля на содержание радона, метана в почвенном воздухе и жилых строениях (подвальных и первых этажах зданий), расположенных над ними [101]. В работе были обнаружены достоверные превышения содержания радона в грунте в пределах обрабатываемых пространств по отношению к фоновым значениям. Согласно полученным данным была предложена модель влияния шахт на выход радона на поверхность (см. рис.2.). Повышенные потоки радона будут фиксироваться по краям обрабатываемого пространства и снижаться к зоне сжатия.

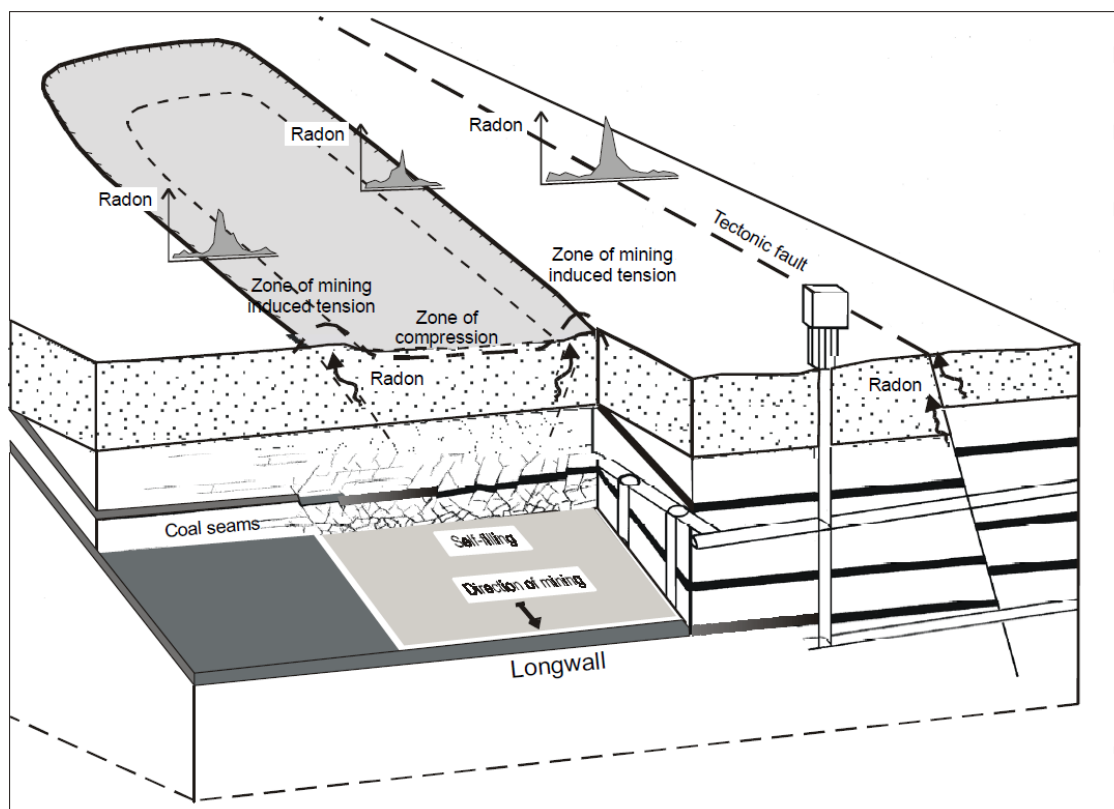


Рис. 2. Пространственные закономерности влияния шахтных выработок на радоновую опасность ландшафтов и геологической среды (по R. Klingel, J. Kemski [101])

Ключевым фактором радоновой опасности будет оставаться геодинамическая устойчивость блоков над отработанным пространством. Можно предположить, что в пределах шахтного поля закономерно формируются несколько систем трещин по своей протяженности, одни из которых будут следовать от поверхности до зоны выработки пласта, а остальные прослеживаться лишь в перекрывающих толщах, при этом в обоих случаях за счет увеличения площади эксхалляции радона потоки радона будут увеличены относительно фонового. Похожие исследования на территории Великобритании и Польши (район Верхняя Силезия) и Китая [130] продемонстрировали необходимость учета данного фактора при оценке радоновой опасности территорий с шахтными выработками, поскольку был получен аналогичный рост эманации радона [79, 148, 150].

Очевидно, что вышележащие горные породы, подверженные процессам проседания, тектонического дробления, процессы отработки угля и возраст шахтных выработок имеют региональную специфику, которая может отразиться на итоговой радоновой опасности территории, которую необходимо оценить в Кузнецком угольном бассейне. Важным становится радиационная оценка территорий, значительное время назад отработанных шахтных выработок, с целью оценки их возможного возвращения в земельный фонд. В работе Wysocka M. и коллег были произведены исследования радоноопасности территории (грунта и жилых строений) в процессе закрытия предприятий, которые продемонстрировали рост показателей ОАР в домах и почве [149].

Таким образом, на основании исследований проведенных на территории Германии, Великобритании и Польши [79, 148, 150], влияние добычи угля подземным способом, может потенциально влиять на радоновую опасность территории, что необходимо исследовать. Современные геодинамические процессы способствуют выходу радона на поверхность и могут быть индуцированы подземными отработками угля [48].

Кроме того, в процессе изучения потенциально радоноопасных зон могут решаться обратные задачи, например, по выяснению геодинамически активных зон в пределах отработанного пространства [33] и зон подземных пожаров [151, 152]. Также анализ потока радона из грунта может быть использован при прогнозировании оползневых процессов естественной и техногенной природы [42], что очень важно для Кемеровской области особенно в отношении последней.

1.4. Выявление потенциальных естественных и техногенных источников радоновой опасности в Ленинск-Кузнецком районе

Потенциальные источники радиоактивной опасности необходимо выявлять при определении назначения категорий земель (под

индивидуальное жилищное строительство, сельское хозяйство и т.п.). Также выделение потенциальных факторов необходимо на первичных этапах организации регионального мониторинга района с целью обеспечения безопасности населения [43].

Естественные источники радоновой опасности в Ленинск-Кузнецком районе. Потенциальные источники естественной радоновой опасности ландшафтов Ленинск-Кузнецкого района связаны с геологическим и тектоническим строением территории. Геологическое строение Ленинск-Кузнецкого района отражено на рисунке 3 (составлено автором по [24, 25]).

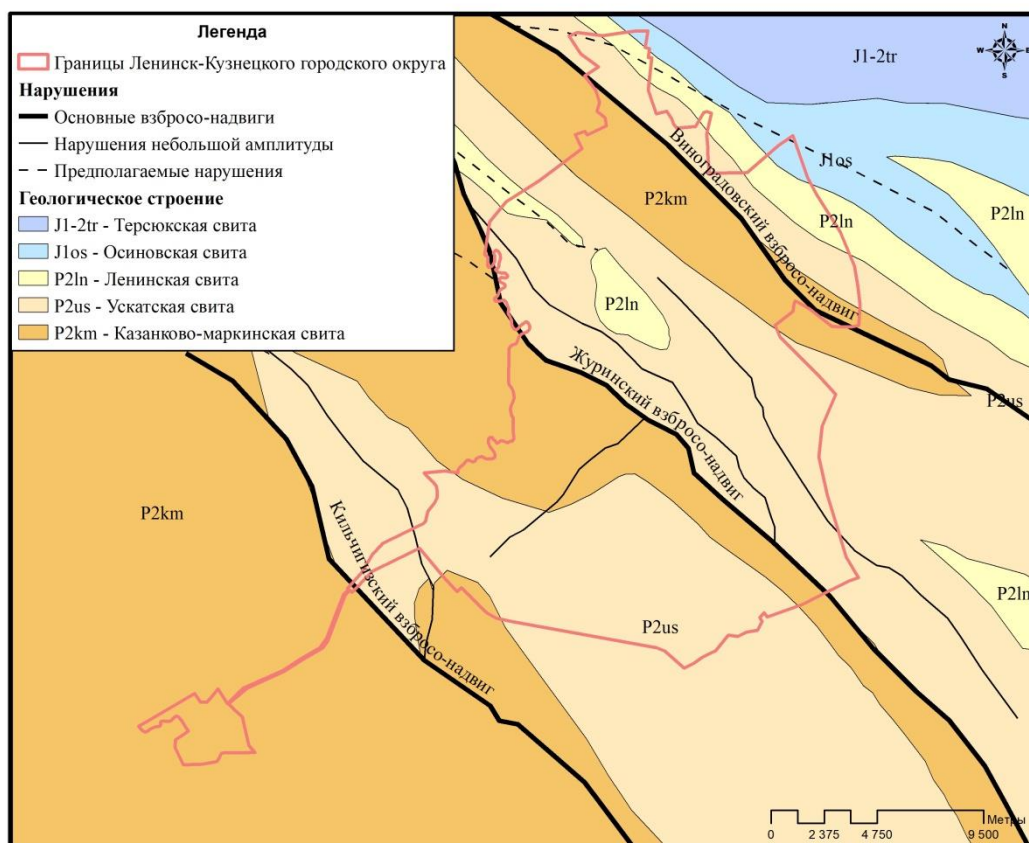


Рис. 3. Геологическое строение района исследований

Территория района исследований сложена комплексами пород Кольчугинской серии, а именно Ильинской и нижней части Ерунаковской подсерий. Ильинская подсерия представлена казанково-маркинской (P_{2km}) и ускальской (P_{2us}) свитами, которые сложены циклитами разной длительности.

Циклиты состоят из переслаивающихся алевролитов, песчаников, аргиллитов и каменных углей. Их мощность в P_2km составляет 9-14 м, что меньше вышележащей P_{2us} – 20-25 м. Увеличение мощности циклов в ускатской свите приводит к формированию пластов угля большей рабочей мощности (Байкаимский и Польшаевский до 6 м). Состав вмещающих пород P_{2us} по своему петрографическому составу достаточно идентичен P_2km .

Нижняя часть Ерунаковской подсерии сложена Ленинской (P_2ln) свитой, в пределах исследуемой территории ее состав также представлен циклитами с переслаиванием алевролитов, песчаников, аргиллитов и каменных углей. Размеры ритмов осадконакопления варьируются от мелкой до крупной.

Крайнюю северную часть территории исследования занимает осиновская свита (J_{1os}). Состав свиты представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов, конгломератов и бурых углей.

При геологосъемочных и поисковых работах на территории Кузнецкого угольного бассейна фиксировались радиоактивные аномалии разной интенсивности. В пределах исследуемого участка располагается ускатская свита, к выходам которой под покровные отложения приурочены фиксируемые аномалии радиоактивного фона. Глубина залегания аномалий 26-55 метров с мощностью от 1 до 5 метров. Содержание урана обычно менее 0,001 %, редко 0,0015-0,003 %, тория – от 0,0008 % до 0,0012 %. Генезис аномалий необходимо связывать с инфильтрационными окислительно-восстановительными процессами в зоне гипергенеза. Аномалии повышения гамма-фона фиксировались в окисленных углистых аргиллитах и углях. Все аномалии имели локальный характер и не прослеживались на площади [24], что может формировать локальные опасные зоны.

Территория исследований лежит в Присалаирской тектонической зоне, что и предопределяет характерные черты строения Ленинск-Кузнецкого района, которое представлено пликативными и дизъюнктивными структурами. «Присалаирская зона представлена областью распространения

полной и гребневидной складчатости, которая возникала под действием взаимосвязанных блоковых перемещений фундамента и западных тангенциальных движений» [9]. «Все основные структуры ориентированы параллельно границе Салаира и Кузбасса, в результате чего формируется главная отличительная черта зоны: отчетливо выраженное блоковое строение, которое обусловлено серией субпараллельных взбросов с амплитудой до 2000 м, многие из которых прослеживаются по всей зоне» [9]. По мере удаления от Салаирского кряжа расстояния между этими нарушениями, взбросо-надвигового типа, увеличиваются, а складчатость упрощается [9, 10, 28].

Район находится в северной части Ленинской подзоны, которая представлена преимущественно пологой линейной складчатостью. Территория расчленена Кильчигизским, Журинским и Виноградовским взбросо-надвигами (см. рис. 2.) на 4 тектонических блока: Беловский, Ленинский, Грамотеинский и Уропский. Блоки представлены преимущественно кулисообразно расположенными крупными синклиналями, оси которых ориентированы на север-северо-запад. Их протяженность до 15-25 км, в ширину 5-8 км и в высоту 0,9-1,5 км. Углы падения варьируются от 10 до 40 градусов. Замки широкие и округлые [25]. Западные крылья складок круче восточных, что связано с движениями Салаирского кряжа и предопределило способы и пространственные характеристики отработок месторождений угля. Антиклинальные структуры встречаются в восточных краевых частях тектонических блоков, где прослеживается их связь с крупными разломами.

В отношении оценки радоноопасности территории, представляем более детальную характеристику крупных разломов. Кильчигизский, Журинский и Виноградовский взбросо-надвиги характеризуются меньшей амплитудой по сравнению с разломами расположенными западнее, ближе к Салаирской тектонической зоне. Азимут падения сместителя на юго-запад, а угол падения не постоянен и варьируется по падению от 20 до 85 градусов.

Кильчигизский взбросо-надвиг имеет амплитуду смещения 1,2-1,4 км, а угол падения сместителя 65-70 градусов, который уменьшается за пределами исследуемой территории в районе Касьминской синклинали до 30 градусов. Выход на поверхность Журинского взбросо-надвига располагается в центральной части района исследований, где нарушение имеет пологое падение сместителя – 20-35 градусов, а амплитуда смещения равна 1,2-1,3 км. Южнее данный разлом называется Соколовским и изменяет свои конфигурации как по падению сместителя, так и по амплитуде. Также Журинский разлом характеризуется коленообразными изгибами изменения углов падения и простирания. Виноградовский взбросо-надвиг в пределах Ленинск-Кузнецкого района имеет амплитуду смещения от 0,1 до 0,6 км, а углы падения сместителя варьируются от 30 до 70 градусов. Крупные разломы исследуемой территории сопровождаются мощными зонами смятия и дробления породы от 10-20 м до 100-300 м, а иногда и более. Также часто в пределах зоны влияния крупных разломов располагаются сингенетические и более мелкие нарушения преимущественно взбросового и надвигового типов с сопутствующей им зоной нарушенности пород от 10 до 60 м.

Тектоническая нарушенность района предопределяет наличие транспортирующих каналов для радона и его ДПР в скальных горных породах, поэтому данный фактор стоит рассматривать в качестве потенциального фактора риска формирования радоновой опасности.

Согласно материалам различных исследований [24, 25, 47, 68], новейшие тектонические нарушения с большой амплитудой и зоной трещиноватости соответствуют Присалаирской и Приалатаусской зонам Кузнецкого прогиба.

Таким образом, основным потенциальным естественным фактором радоновой опасности на территории Ленинск-Кузнецкого района является наличие тектонических нарушений с их зонами тектонической нарушенности.

Техногенные источники радоновой опасности в Ленинск-Кузнецком районе. Техногенные источники могут быть связаны с загрязнением территории района угольной пылью, золой, после сжигания топлива, и областями шахтных выработок, образуемых в результате добычи угля.

Согласно запискам к государственным геологическим картам радиационная обстановка, оцененная с помощью аэрогаммо-спектрометрических съемок масштаба 1:10000, территория исследования лежит в области с нормальным гамма-фоном – 8-20 мкР/ч, который соответствует естественному фону Кузнецкого угольного бассейна. Несколько повышенный фон до 20-26 мкР/ч фиксируется на карьерах, шлаковых и породных отвалах, естественных горельниках, расположенных южнее территории исследования. Данные уровни являются безопасными для человека, согласно нормам радиационной безопасности. Таким образом, пылевая нагрузка, связанная с открытой добычей, транспортировкой и сжиганием угля не приводит к формированию значительной радоновой опасности. Также в пределах Ленинск-Кузнецкого района отсутствуют открытые горные работы.

Подземный способ добычи угля характеризуется меньшим отрицательным воздействием на природные компоненты. Одной из экологических функций литосферы, подверженной воздействию добычи угля подземным способом, является геодинамическая, которая связана с процессом мобилизации тектонических блоков и которая сопровождается образованием значительных провалов и просадок на дневной поверхности в результате выемки угля под землей. Данные процессы наблюдаются и на территории исследований. Изменение геодинамической функции приводит к формированию дополнительной трещиноватости пород и активизации естественных нарушений, что сопровождается выходом газов из шахтных выработок и вмещающих пород по этим вновь образованным каналам. В результате на поверхности территории Ленинск-Кузнецкого района происходит изменение геодинамической и геохимической функций

литосферы, например, в окрестностях с. Байкаим [25] и районах 4 и 10 участков Ленинск-Кузнецкого городского округа. Безопасность данных процессов ранее оценивалось только с точки зрения геодинамических процессов, которые могут повлиять на инженерные сооружения.

Ленинск-Кузнецкий район является одной из самых старых территорий угледобычи в Кузбассе. Отработка ведется подземным (шахтным) способом, что привело к формированию значительных площадей выработок, территории которых обозначены на рисунке 4 (составлено автором по данным [72]).

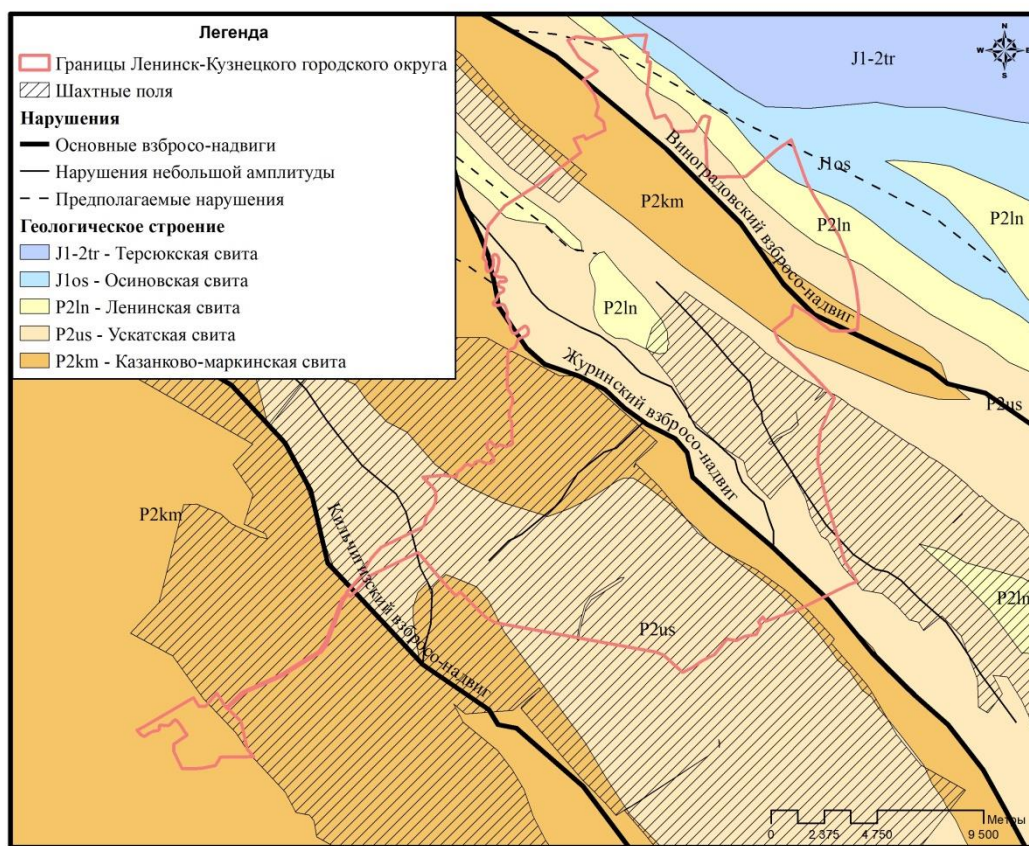


Рис. 4. Шахтные поля на территории исследований

Таким образом, подземный способ добычи привел к формированию нового источника радоновой опасности геологической среды на территории Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области.

1.5. Выводы по главе

Приведенный выше обзор научных источников литературы, касаемых геоэкологических основ изучения радоновой опасности объектов, продемонстрировал достаточно высокую степень разработанности данного вопроса в отношении естественных причин формирования данной радиационной проблемы. Изучены факторы, определяющие эксхалляцию и эманацию радона, установлена приуроченность высоких потоков радона к естественным тектоническим нарушениям. Также подчеркнута связь эманации этого газа с термобарическими условиями сред. Недостаточным в настоящее время является изучение и оценка радоновой опасности геологической среды, подверженной горнодобывающей деятельности, в частности добыче угля подземным способом. Для монопрофильного Кузбасса данная проблема затрагивает достаточно существенные территории поселений, специализирующихся на данном секторе экономики.

В результате анализа, посвященного выявлению потенциальных источников радоноопасности, из доступных в настоящее время данных, для Ленинск-Кузнецкого района можно предложить в качестве ключевого шахтные выработки, которые могут существенно изменять поток радона на поверхность и жилые дома.

ГЛАВА 2. ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДОНОВОЙ ОПАСНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

2.1. Методика территориальной оценки

Геологическая среда представляет собой достаточно неоднородный объект в отношении содержания радиоактивных элементов, в том числе радона. Это обстоятельство может приводить к формированию разных по своему масштабу и интенсивности влияния зон повышенной потенциальной радоновой опасности, которые необходимо выявлять и территориально оконтуривать [30, 31].

Предварительная территориальная оценка потенциальных источников радоноопасности геологической среды производится с целью их ранжирования по степени распространенности на территории и выяснения возможного риска для населения. Также данная оценка может быть использована при принятии решения о назначении земель под индивидуальное жилищное строительство (ИЖС) [30, 31], либо мерах радонозащиты, необходимых при строительстве, что, например, сделано для территории Волгограда [69].

Наиболее подходящим средством для пространственной оценки выступают геоинформационные системы [26]. В работе использовалась среда ArcGIS 10.3.1., в которой были созданы слои атрибутивной и пространственной информации: жилые строения, геологическая карта района исследований, шахтные поля и др. Также данная система позволяет оперативно обновлять данные по территориальной оценке по мере поступления новых данных [30, 31].

Пространственная оценка потенциальных источников радоноопасности геологической среды основана на установленных ранее фактах их взаимосвязи. Для каждой территории могут быть выбраны ключевые

источники и оценена их площадная доля (F) в территории региона по формуле [30, 31]:

$$F_i = \frac{S_i}{S} * 100 \%,$$

где F_i – площадная доля потенциального источника радоноопасности в районе, S_i – площадь территории с потенциальным источником радоноопасности, S – общая площадь территориального образования.

По своей сути, для составления предварительной схемы оценки, мы используем ранжирование по площади распространения того или иного источника потенциальной радоноопасности геологической среды [30, 31].

Со стороны *естественных потенциальных источников радоноопасности* были выбраны [30, 31]:

- состав пород (при составлении мелкомасштабной и среднемасштабной карты ограничиваются выходами границ свит (для стратифицируемых толщ) или комплексов пород (для плутонических комплексов));

- тектоника (дизъюнктивные нарушения и сопутствующая им зона дробления и трещиноватости). Границами воздействия источника считалась линия выхода на поверхность потенциального окончания зоны трещиноватости нарушений. Данные по нарушениям взяты из материалов геологических отчетов.

Среди *антропогенных потенциальных источников радоноопасности*:

- загрязнение радиоактивными элементами, материнскими по отношению к радону (выемка, взрывы, транспортировка и иные действия, которым сопутствует рассеивание загрязняющих веществ (ЗВ)). В работе данный источник не рассматривался;

- формирование или регенерация трещиноватости пород в результате ведения горных работ (границы воздействия данного источника определены шахтным полем).

Территориальная оценка размещения жилых строений с учетом потенциальных источников радоноопасности геологической среды производится с целью уточнения возможных рисков для уже проживающего населения и производится по формуле [30, 31]:

$$A_f = \frac{N_i}{N} * 100 \%,$$

где A_f –доля жилых строений на территории потенциального источника радоноопасности в районе, N_i – число жилых строений на территории потенциального источника радоноопасности, N – общее число строений.

Оценка сводится к определению доли жилых строений, расположенных на территории проявления того или иного потенциального источника радоноопасности, ко всем частным жилым строениям. Из изучения целенаправленно были исключены многоэтажные жилые строения, поскольку по материалам ранее проведенных исследований они являются безопасными в отношении радона [63].

Жилые дома получены из базы данных NextGIS [17] и обработаны с помощью функции «clip» с целью выбора строений, находящихся в пределах административных границ исследуемой территории. Далее ручным способом были исключены многоэтажные строения, производственные здания и иные хозяйственные объекты (гаражи, склады и т.п.).

Подсчет жилых строений для дальнейшего вычисления по вышеприведенной формуле производился с помощью функции «выборка в пределах границ», позволяющая подсчитать количество объектов в пределах полигонов, которыми были ранее выделенные потенциальные источники радоноопасности геологической среды.

2.2. Пространственная оценка потенциальных источников радоновой опасности

Геологическая среда территории Ленинск-Кузнецкого района, как уже было представлено ранее, является достаточно неоднородной, что предопределило необходимость территориальной оценки распространенности тех или иных источников потенциальной радоновой опасности геологической среды (см. табл. 1. и рис. 4.).

Таблица 1. Пространственная оценка потенциальных естественных источников радоноопасности геологической среды Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный источник радоноопасности	Доля территории, %
Состав пород (свиты)	
Казанково-маркинская свита (P_2km)	29,98
Ускальская свита (P_{2us})	63,63
Ленинская свита (P_{2ln})	5,83
Осиновская свита (J_{1os})	0,61
Тектоника (крупные тектонические нарушения)	
Виноградовский взбросо-надвиг	2,67
Журинский взбросо-надвиг	3,38
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,05
Нарушения мелкой амплитуды	1,50
В целом территория нарушений	7,58
Тектонические нарушения в пределах свит	
Казанково-маркинская свита (P_2km)	3,65
Ускальская свита (P_{2us})	3,91

Большую часть территории Ленинск-Кузнецкого района занимает ускальская свита (P_{2us}) – 63,63 %, располагаясь в юго-западной и центральной части района. В связи с обнаруженными ранее аномалиями гамма-фона локального характера, с превышениями концентрации урана относительно фонового, необходимо более детально изучить частоту встречаемости данных аномалий и их влияние на плотность потока радона из грунта на территории распространения данной свиты. Казанково-маркинская свита (P_2km) занимает 29,98 % территории города, выходя на поверхность в северо-

восточной, юго-западной и отчасти центральной частях, где она перекрыта отложениями более молодых свит P_{2us} и P_{2ln} . В целом, по данной свите, а также по ленинской (P_{2ln}) и осиновской свитам (J_{1os}), нет данных о повышенном радиоактивном фоне, что делает их территории потенциально безопасными по естественным причинам.

Главные тектонические нарушения делят территорию на систему блоков и простираются с северо-запада на юго-восток. В ранее проведенных работах, как было отмечено в первой главе, именно тектонические нарушения являлись основными радоноопасными участками геологической среды, что позволяет считать нарушения Ленинск-Кузнецкого района также относящимся к потенциальным зонам высоких эманаций радона. Как правило, крупные тектонические нарушения имеют сопутствующую зону тектонического дробления, по которой также происходит миграция радона на поверхность, либо под рыхлые отложения. В этом случае потенциальная зона радоновой опасности будет иметь сильно вытянутый по простиранию нарушения прямоугольник, а узкая его часть будет определяться шириной сопутствующей тектонической нарушенности пород. В Ленинск-Кузнецком районе тектонические нарушения с сопутствующей им зоной нарушений занимают 7,58 % территории. Главными нарушениями являются Журинский (3,38 %) и Виноградовский (2,67 %) взбросо-надвиги, пересекающие район в центральной и северо-восточной частях соответственно. Зона тектонической нарушенности данных разломов достигает 300 метров [24, 25]. Также некоторую часть территории (1,5 %) занимают нарушения более мелкой амплитуды с зоной тектонической нарушенности до 60 м. Кильчигизский взбросо-надвиг определяет потенциальную радоновую опасность в районе Никитинского поселения, занимая малую часть территории Ленинск-Кузнецкого района (0,05 %). Нарушения на поверхности в основном фиксируются по ускатской свите (P_{2us}) – 3,91 %, и казанково-маркинской свите (P_{2km}) - 3,65 % от территории района исследований.

Главным антропогенным источником потенциальной радоновой опасности является горнодобывающая деятельность, осуществляющая выемку угля подземным способом, приводя к формированию полостей, трещин в горных породах, которые являются зонами эксхалации радона и транспортными каналами для поступления его на поверхность. Пространственная оценка представлена в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Пространственная оценка потенциальных антропогенных источников радоноопасности геологической среды Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный фактор радоноопасности	Доля территории Ленинск-Кузнецкого, %
Шахтные поля в пределах свит	
Все	47,72
P ₂ km	11,34
P ₂ us	36,07
P ₂ ln	0,31
J ₁ os	0
Шахтные поля в пределах тектонических нарушений	
Виноградовский взбросо-надвиг	0
Журинский взбросо-надвиг	0,21
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,05
Нарушения мелкой амплитуды	0,81
В целом территория нарушений	1,06
Шахтные поля в пределах свит в зонах их тектонической нарушенности	
P ₂ km	0,42
P ₂ us	0,64

Шахтные поля занимают 47,72 % территории Ленинск-Кузнецкого района, располагаясь в юго-западной, южной, юго-восточной и, в меньшей степени, в северной частях. Очевидно, в силу глубокой специализации района на добыче угля, данный показатель будет расти, что предопределяет острую необходимость оценки радоновой опасности данных участков геологической среды.

Площади распространения шахтных полей совпадают с территориями наиболее благоприятных участков месторождений для добычи угля. Наибольшая доля шахтных полей располагается в пределах ускатской свиты

(P_{2us}) – 36,07 % и казанково-маркинской свиты (P_{2km}) – 11,34 %. Остальные свиты затронуты выработкой незначительно (0,31 % - P_{2ln} и 0 % - J_{1os}).

Естественные тектонические нарушения, как было отмечено ранее, являются зонами повышенной эманации радона, но при этом степень их потенциальной опасности также связана с современной геодинамической активностью, при снижении которой поток радона закономерно снижается. В отдельных работах отражается закономерность влияния горнодобывающей деятельности на регенерацию движений внутри естественных нарушений, что позволяет предположить и увеличение транспортной способности для радона и, соответственно, радоновой опасности таких участках земной коры. В пределах Ленинск-Кузнецкого района шахтные поля в пределах зон крупных нарушений занимают 1,06 % от всей территории района или примерно 14 % от всей площади распространения нарушений. Главным образом это нарушения более мелкой амплитуды с зоной тектонической нарушенности до 60 м (0,81 %) и Журинский взбросо-надвиг – 0,21 %. Превышение доли шахтных выработок на нарушениях с меньшими амплитудами и малой зоной тектонической нарушенности объясняется их внутриблоковым расположением и меньшими технологическими проблемами при отработке угля. На Виноградовский и Кильчигизский приходится малая доля шахтных полей и составляет 0,05 % от всей территории исследования. Данные участки располагаются в пределах двух свит: казанково-маркинской (P_{2km}) – 0,42 % и ускатской (P_{2us}) – 0,64 %. Таким образом, данные участки можно считать наиболее потенциально опасными и связанными одновременно как с естественными источниками потенциальной радоноопасности геологической среды, так и антропогенными.

По полученным закономерностям на картосхеме геологического строения были выделены зоны с источниками потенциальной радоноопасности (см. рис.5.).

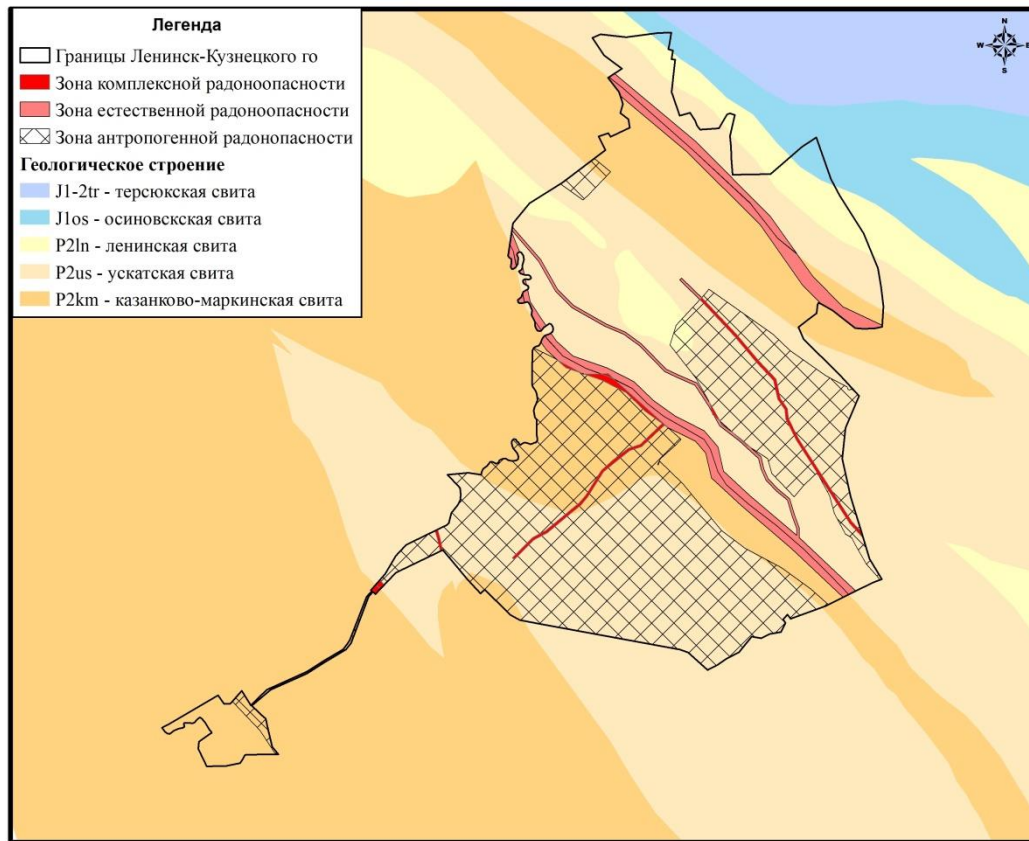


Рис. 5. Картограмма потенциальной радоноопасности территории Ленинск-Кузнецкого городского округа (масштаб 1:200000)

Картограмма позволяет определить методику изучения данных потенциальных источников и рационально распределить участки исследований на установление естественной и антропогенной радоноопасности. Зона комплексной радоноопасности располагается в пределах естественных нарушений, которые располагаются в шахтном поле, соответственно, данные зоны будут наиболее потенциально радоноопасными. Зоны естественной радоноопасности соответствуют основным тектоническим нарушениям и методы установления их опасности хорошо известны в науке, когда профили изучения ППР закладывают вкост простирания. Наиболее объемной задачей стоит выяснение закономерностей расположения зон радоноопасности в пределах шахтных полей, так как эти области могут располагаться весьма разнообразно, что связано с большим

количеством факторов (динамичности блоков, возраста обработки, степени заполнения трещин вторичными минералами и т.п.). Для каждой из зон могут быть определены пределы колебания ППР и предложены необходимые меры по защите жилых строений согласно НРБ. Кроме того, реализация данного проекта в среде ArcGIS позволяет оперативно вносить коррективы и актуальные данные по плотности потока радона из грунта.

2.3. Территориальная оценка жилых строений с учетом потенциальных источников радоноопасности геологической среды

Создание территориальной схемы потенциальной радоноопасности направлено на составление рекомендаций по улучшению ситуации с резидентным облучением. Для оценки потенциальных рисков для населения необходимо учитывать размещение жилых строений на разных по своей безопасности участках геологической среды. Для этого было оценено размещение жилых строений (см. табл.3.).

Таблица 3. Территориальная оценка радоноопасности жилых строений с учетом потенциальных естественных источников радоноопасности геологической среды Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный источник радоноопасности	Доля от всех ИЖС, %
Состав пород (свиты)	
Казанково-маркинская свита (P ₂ km)	64,47
Ускатская свита (P ₂ us)	35,56
Ленинская свита (P ₂ ln)	0,58
Осиновская свита (J ₁ os)	0,00
Тектоника (крупные тектонические нарушения)	
Виноградовский взбросо-надвиг	2,82
Журинский взбросо-надвиг	8,71
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,00
Нарушения мелкой амплитуды	1,88
В целом территория нарушений	13,33
Тектонические нарушения в пределах свит	
Казанково-маркинская свита (P ₂ km)	9,10
Ускатская свита (P ₂ us)	4,59

В пределах казанково-маркинской свиты (P_2km) располагается 64,47 % ИЖС Ленинск-Кузнецкого района, что делает большую часть домов потенциально безопасными, если учитывать данные геологических отчетов. На территории ускатской свиты (P_2us) располагается 35,56 % частного жилого фонда, расположенного в потенциально опасной зоне, где могут быть радиоактивные аномалии, согласно геологическим отчетам по данной территории. Остальные строения располагаются в границах Ленинской свиты (P_2ln).

В пределах естественных тектонических нарушений, в силу пространственных особенностей, создаваемых ими радоноопасных зон, как правило, располагается значительно меньшее количество строений, но при этом они часто характеризуются более высокими объемными активностями радона внутри помещения. На территории Ленинск-Кузнецкого района в пределах всех крупных нарушений располагается 13,33 % всех жилых строений, из них на Журинский взбросо-надвиг приходится 8,71 %, на Виноградовский - 2,82 % и остальные - 1,88 % на нарушения более мелкой амплитуды. Все эти строения относятся к потенциально опасным строениям, которые необходимо исследовать на ОАР. В зоне тектонической нарушенности пород Кильчигизского взбросо-надвига жилых строений не зафиксировано. Распределение жилых строений в зонах тектонической нарушенности разных свит неодинакова, так в пределах казанково-маркинской свиты (P_2km) располагается 9,10 % жилых строений Ленинск-Кузнецкого района, а в пределах усинской свиты (P_2us) – 4,59 %.

Большая площадь распространения шахтных полей на территории Ленинск-Кузнецкого района и связанная с ними потенциальная радоновая опасность определяют необходимость изучения доли строений расположенных в их пределах. По данным территориальной оценки нами была составлена табл. 4.

Таблица 4. Территориальная оценка радоноопасности жилых строений с учетом потенциальных антропогенных источников радоноопасности геологической среды Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный источник радоноопасности	Доля от всех ИЖС, %
Шахтные поля в пределах свит	
Все свиты	48,06
P ₂ km	35,58
P ₂ us	12,47
P ₂ ln	0,01
J ₁ os	0
Шахтные поля в пределах тектонических нарушений	
Виноградовский взбросо-надвиг	0
Журинский взбросо-надвиг	0,42
Кильчигизский взбросо-надвиг	0
Нарушения мелкой амплитуды	1,28
В целом территория нарушений	1,69
Шахтные поля в пределах свит в зонах их тектонической нарушенности	
P ₂ km	1,56
P ₂ us	0,13

В пределах шахтных полей располагаются 48,06 % ИЖС Ленинск-Кузнецкого района, при этом на долю ленинградской свиты (P₂ln) приходится 0,01 % жилых строений, ускатской свиты (P₂us) – 12,47 % и на казанково-маркинскую свиту (P₂km) – 35,58 %. В пределах осиновской свиты J₁os жилых строений не зафиксировано. Большое число жилых строений, находящихся в пределах шахтных полей, влечет за собой потенциально высокие радиационные риски, связанные с получением дополнительного облучения.

Особенно радоноопасными зонами являются участки естественной тектонической нарушенности в пределах шахтных полей. Доля жилых строений расположенных в пределах таких территорий составляет 1,69 %, из которых основная часть располагается в пределах нарушений малой амплитуды (1,28 %) и Журинского взбросо-надвига (0,42 %). Также отличается доля этих строений по разным свитам, нарушенным естественными и антропогенными дизъюнктивами, так на казанково-

маркинскую свиту (P_2km) приходится 1,56 % от всех строений Ленинск-Кузнецкого района, а на ускатскую свиту (P_{2us}) – 0,13 %.

Вследствие существенных различий между распространенностью потенциальных источников естественной и антропогенной радоноопасности геологической среды и размещением ИЖС в Ленинск-Кузнецком районе, возникает необходимость их сравнения (см. табл.5 и табл.6.) [30].

Таблица 5. Сравнение распространенности потенциальных естественных источников радоноопасности геологической среды и доли жилых строений в их пределах для территории Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный источник радоноопасности	% территории	% ИЖС
Состав пород (свиты)		
Казанково-маркинская свита (P_2km)	29,98	64,47
Ускальская свита (P_{2us})	63,63	35,56
Ленинская свита (P_2ln)	5,83	0,58
Осиновская свита (J_{1os})	0,61	0,00
Тектоника (крупные тектонические нарушения)		
Виноградовский взбросо-надвиг	2,67	2,82
Журинский взбросо-надвиг	3,38	8,71
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,05	0,00
Нарушения мелкой амплитуды	1,50	1,88
В целом территория нарушений	7,58	13,33
Тектонические нарушения в пределах свит		
Казанково-маркинская свита (P_2km)	3,65	9,10
Ускальская свита (P_{2us})	3,91	4,59

Распределение ИЖС не соответствует распространенности на территории факторов естественной потенциальной радоноопасности. Выделяется перевес в сторону увеличения числа жилых строений в казанково-маркинской свите (P_2km) при меньшем ее распространении, в том числе и зоне ее тектонической нарушенности. Тектоническая нарушенность ее связана в первую очередь с Журинским взбросо-надвигом и нарушениями более мелкой амплитуды [30].

Таблица 6. Сравнение распространенности потенциальных антропогенных источников радоноопасности геологической среды и доли жилых строений в их пределах для территории Ленинск-Кузнецкого района [30]

Потенциальный источник радоноопасности	% территории	% ИЖС
Шахтные поля в пределах свит		
Все	47,69	48,06
P ₂ km	11,34	35,58
P ₂ us	36,07	12,47
P ₂ ln	0,31	0,01
J ₁ os	0	0
Шахтные поля в пределах тектонических нарушений		
Виноградовский взбросо-надвиг	0	0
Журинский взбросо-надвиг	0,21	0,42
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,05	0
Нарушения мелкой амплитуды	0,81	1,28
В целом территория нарушений	1,06	1,69
Шахтные поля в пределах свит в зонах их тектонической нарушенности		
P ₂ km	0,42	1,56
P ₂ us	0,64	0,13

Распределение ИЖС с учетом антропогенных потенциальных факторов радоноопасности геологической среды, также, как и в случае с естественными, не соответствует их площадной распространенности. Число строений увеличивается на территории шахтных полей казанково-маркинской свиты, в том числе и в пределах одновременной естественной и техногенной нарушенности пород данной стратифицируемой толщи [30].

Данные источники естественной и антропогенной потенциальной радоноопасности геологической среды являются первостепенными для изучения с учетом распространенности ИЖС в их пределах (см. рис. 6.). Частые дома располагаются преимущественно на территориях шахтных полей, либо нарушений, которые часто являются их границами. Данное расположение имеет исторические предпосылки в виде формирования застройки вокруг градообразующих предприятий. При этом не соблюдаются и отсутствуют экологические нормативы.

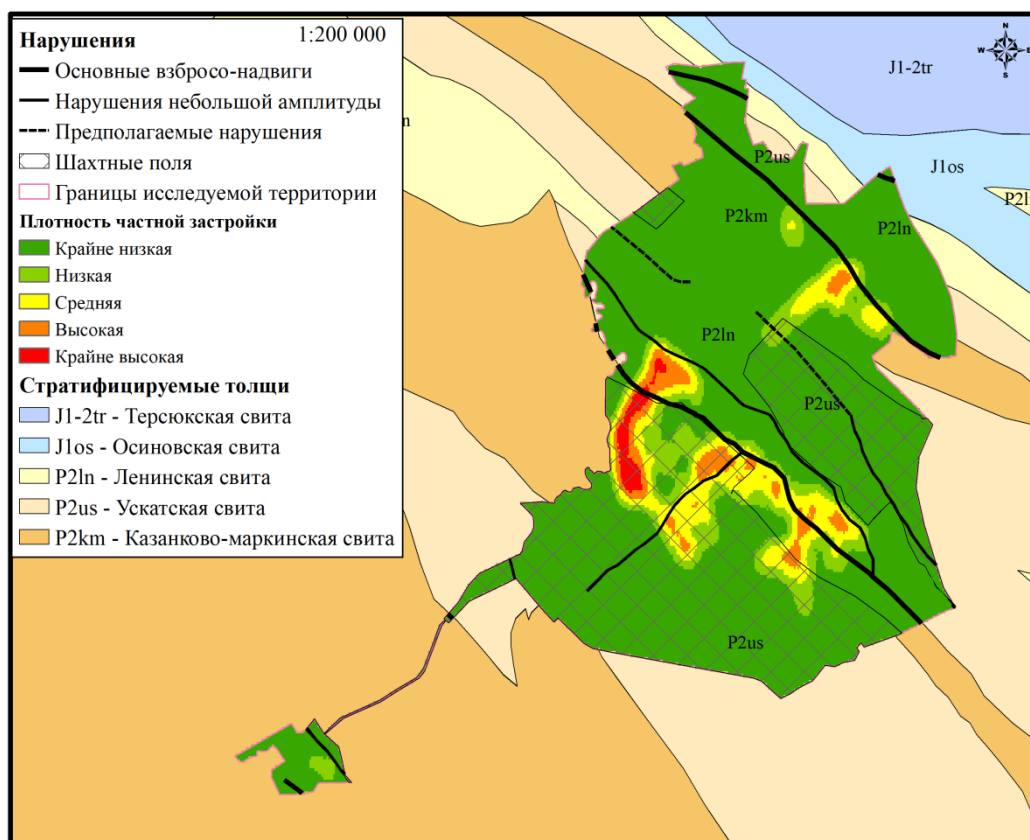


Рис. 6. Плотность ИЖС в пределах потенциальных источников радоноопасности геологической среды.

Выяснение доли строений, расположенных в той или иной части геологической среды с определенным набором источников, связанных с радоновой опасностью, может предоставить более точные данные для сравнения с эпидемиологической статистикой по новообразованиям дыхательной системы административных территорий. В целом данный подход позволит более достоверно выяснить вклад факторов геологической среды в общий канцерогенный риск населения угледобывающих районов Кузбасса [30].

2.4. Выводы по главе

Исследования продемонстрировали, что главную потенциальную радоноопасность в Ленинск-Кузнецком районе представляют шахтные поля. Они занимают 47,74 % от всей территории административного образования,

что в совокупности тектоническими нарушениями (7,58 %) формирует на более чем половине территории повышенный потенциальный радиационный риск, связанный с радоном.

Территориальное распределение жилых строений также подчеркивает важность оценки радоноопасности выработок угля, например, 48,06 % ИЖС располагается на территории шахтных полей в Ленинск-Кузнецком районе.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ НА ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА РАДОНА ИЗ ГРУНТА

3.1. Методика оценки ППР и формирование групп Case и Control

Как показали исследования, концентрация радона в почве и ППР являются хорошими индикаторами определения радиационной опасности территории с целью планирования будущей застройки и решений для уже построенных зданий [84].

Плотность потока радона (ППР) оценивалась с помощью поверенного прибора КАМЕРА-01 и методических рекомендаций к данному оборудованию [20]. В работе использовались сорбционные колонки СК-13 с активированным углем и накопительные камеры НК-32. Ловушки устанавливались в заранее подрыхленный грунт на 2-8 часов и обрабатывались в течение 12 часов после снятия, но не ранее 3 часов с целью установления равновесия с ДПР. Привязка точек осуществлялась с помощью GPS-навигатора, компаса и рулетки.

Метеорологические условия не имели существенных различий при измерении и соответствовали рекомендациям пособия к оборудованию. Измерения не производились в дни с обильными осадками и в течение 3 дней до и после осадков, с целью исключения влияния водонасыщенности верхних горизонтов грунтов. Средняя высота над уровнем моря в пределах исследуемой территории колеблется в пределах от 200 до 280 м. Измерение ППР проводилось в сентябре 2019 года. Среднемесячные климатические данные: средняя температура + 10,7 °С; давление - 1015 гПа, относительная влажность – 70 %. Пробы отбирались в диапазоне температур воздуха $14,58 \pm 5,16$ °С, давлений $1016 \pm 4,6$ гПа, влажности $59,64 \pm 13,06$ %. Температура была приемлемой для измерений по установленной для этого прибора методике с погрешностью не более 30 %.

Почвенные условия характеризовались однородностью во всех точках наблюдения. Почвы черноземы выщелоченные.

Всего было измерено 687 точек наблюдения, расстояние между точками составляло от 2 до 5 метров. Пространственное расположение мест измерения ППР представлено на рисунке 7.

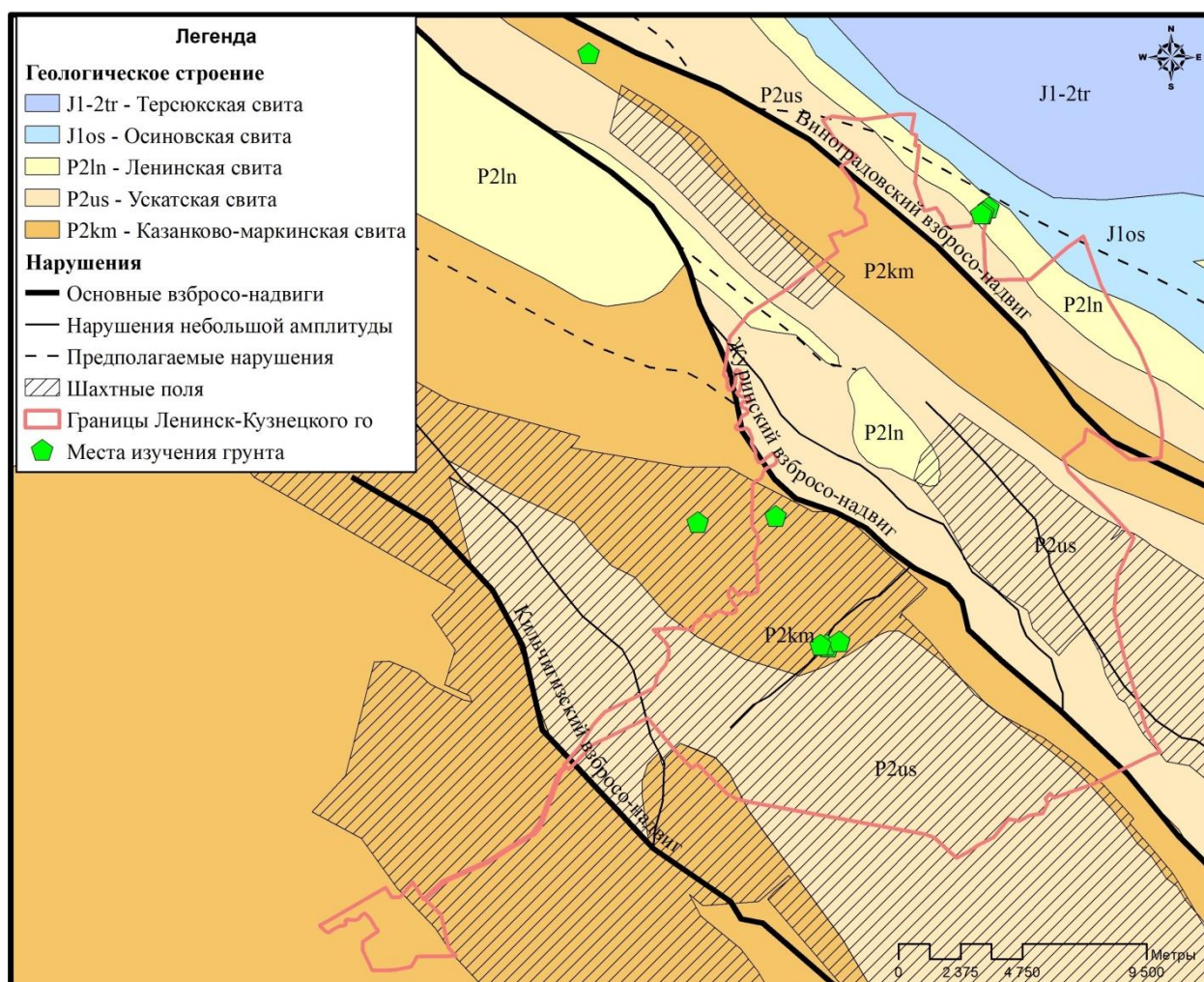


Рис. 7. – Места изучения ППР из грунта

Кроме того, мы провели дублирующие измерения плотности потока радона в точках измерения ППР. Согласно этим результатам, данные отличались от первичных измерений не более чем на 5–10 %.

Оценка радоновой опасности территории производилась с использованием нормативных документов [44], в которых градация участков осуществляется по трем группам:

1 класс (до 80 мБк/м²*с) – для защиты жилого строения достаточно обычной системы вентиляции;

2 класс (80-200 мБк/м²*с) – необходима умеренная защита жилого строения;

3 класс (>200 мБк/м²*с) – требуется усиленная защита жилого строения.

Были изучены территории казанково-маркинской свиты (P₂km) и ленинской свиты (P₂ln), а также отдельные участки шахтных полей в пределах P₂km.

В работе рассматривались разные варианты анализа радоновой опасности, с целью выявить наиболее значимые факторы геологической среды (см. табл. 7.). Ключевым являлся поиск различий между геологической средой шахтных полей и без них.

Группа Case была сформирована за счет территорий, вокруг ранее изученных жилых строений и сельскохозяйственных угодий, в пределах казанково-маркинской свиты (P₂km) с шахтным полем. Группа Control формировалась за счет территорий без шахтных полей вокруг строений с низким показателем ОАР в пределах ленинской свиты (P₂ln) и сельскохозяйственных полей [29].

Территории, на которых были произведены измерения ППР, находились на участках, не задействованных в настоящее время участках шахт.

Таблица 7. Примеры выборок по оценке ППР из грунта

Case		Control	
1	Жилые строения с высокой ОАР с шахтными полями в пределах казанково-маркинской свиты (P ₂ km)	1	Жилые строения с низкой ОАР без шахтных полей в пределах ленинской свиты (P ₂ ln)
2	Сельскохозяйственные земли с шахтными полями в пределах казанково-маркинской свиты (P ₂ km)	2	Сельскохозяйственные земли без шахтных полей в пределах казанково-маркинской свиты (P ₂ km)
3	1+2 Case группа	3	1+2 Control группа

Обработка результатов производилась в программах Statistica и MS Office Excel с помощью надстройки «пакет анализа». Сравнение показателей выборок производилось по критерию Манна-Уитни с уровнем $p \leq 0,05$ (применен по причине не нормального распределения после проверки тестом Колмогорова-Смирнова).

Пространственные характеристики ППР оценивались в программе ArcGIS. Интерполяция данных между точками наблюдений осуществлялась с помощью метода обратно взвешенных расстояний (ОВР).

3.2. Характеристика фоновой ППР

Фоновая (Control group) ППР определена для территорий казанково-маркинской свиты (P_2km), ленинской свиты (P_2ln) и в местах отсутствия выработанных пространств (P_2km+P_2ln). Результаты описательных статистик представлены в табл. 8.

Таблица 8. Характеристика ППР контрольной территории

Статистические параметры	P_2km	P_2ln	P_2km+P_2ln
Среднее значение, мБк/м ² *с	22,87±1,01	46,61±3,62	33,07±1,78
Стандартное отклонение, мБк/м ² *с	13,46	41,91	31,51
Медиана, мБк/м ² *с	20	27	22
Мода, мБк/м ² *с	10	18	20
Дисперсия, мБк/м ² *с	181,06	1756,35	992,71
Max, мБк/м ² *с	128	260	260
Min, мБк/м ² *с	10	9	9
Кэф. Вариации, %	59	90	95
Кол-во измерений ППР	178	134	312

Грунты P_2km характеризуются более низким средним показателем ППР 22,87±1,01 мБк/м²*с, по отношению к P_2ln - 46,61±3,62 мБк/м²*с. Значение медиан выборок также различно: 22 мБк/м²*с – P_2km и 27 мБк/м²*с - P_2ln . Среднее фоновое значение ППР для грунтов обоих свит составляет 33,07±1,78 мБк/м²*с. Коэффициенты вариации говорят о неоднородности выборок (P_2km – 59 % и P_2ln – 90 %), что указывает на наличие в пределах

исследуемых грунтов факторов, определяющих резкие увеличения показателей ППР. Данные показатели определяют особенности распределения ППР на исследуемых территориях (см. рис. 8.). Для P_2km это более существенные факторы, что приводит к более частым отклонениям показателей выше среднего и медианного значения.

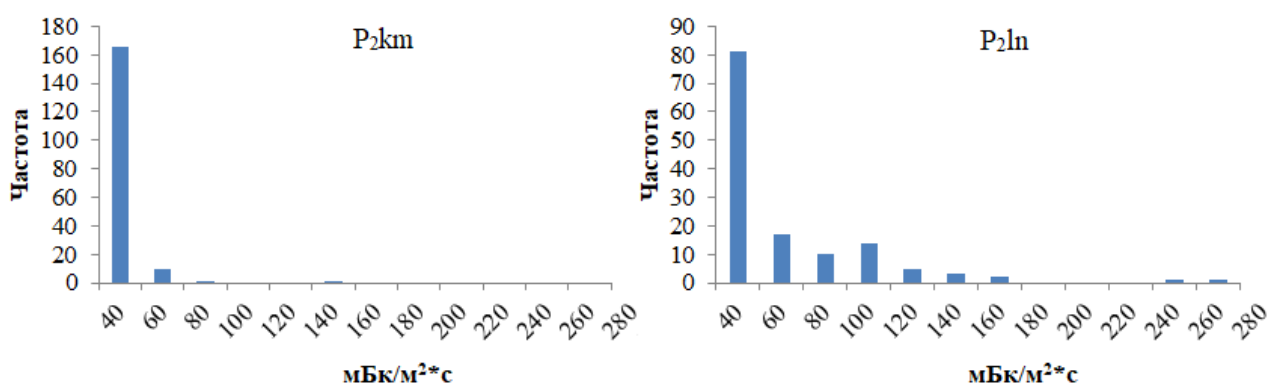


Рис. 8. Распределение P_2km и P_2ln

Для оценки значимости различий применялся непараметрический метод – U критерий Манна-Уитни, который показал достоверные отличия на уровне $p \leq 0,01$, что говорит о достоверно больших потоках радона из грунта в пределах P_2ln . Участки, расположенные или планируемые под ИЖС, в пределах данной свиты также необходимо исследовать на ППР, а жилые дома – на ОАР, поскольку в пределах ее территории были обнаружены значения ППР, относящиеся ко 2 и 3 классу опасности согласно НРБ (см. табл. 9).

Таблица 9. Распределение показателей ППР по свитам согласно классам радиационной опасности

Интервалы ППР, мБк/м³·с	P_2km	P_2ln	$P_2km + P_2ln$
0-80	177 (99,44 %)	108 (80,6 %)	285 (91,35 %)
81-200	1 (0,56 %)	24 (17,91 %)	25 (8,01 %)
>200	0 (0 %)	2 (1,49 %)	2 (0,64 %)

На территории P_2In в 26 точках измерения или 19,4 % превышают норму в $80 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$, что требует умеренных и усиленных мер по защите жилых строений от поступления радона из грунта (согласно НРБ-99 [44]). В пределах P_2km 99,44 % измеренных точек относятся к 1 группе радоновой опасности, что говорит об отсутствии необходимости в специальных противорадоновых мерах по защите домов. Большое количество проведенных на территории данных свит измерений дает основание принять данные показатели за фоновые значения для группы Control.

Пространственное распределение ППР в естественных ландшафтах имеет свои установленные закономерности, которые лежат в основе методических рекомендаций при радиационной оценке строительных площадок. Согласно этим правилам, предварительная оценка производится с большим шагом и сгущается в пределах контура жилых строений. Такой порядок выполнения радоновой съемки обоснован достаточно равномерным распределением показателя ППР в естественных ландшафтах. Его увеличение, относительно фонового для данного участка геологической среды, фиксируется в окрестностях разрывных нарушений, либо зонах выхода инфильтрационных вод с повышенным содержанием радиоактивных элементов в рыхлые поверхностные отложения. Как правило, с учетом этих закономерностей в общем случае возникает определенная характерная ситуация распределения ППР. На рис. 9 представлен один из участков исследования ППР в пределах P_2km .

В пределах изученной площади ППР варьирует от 10 до $128 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$, со средним значением $24,36 \pm 0,09 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$. Показатели имеют логнормальное распределение. Выявленная точка с превышением ($128 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$) имеет размер аномалии (граница проведена по линии интерполяции равной $80 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$) $\approx 2,5 \text{ м}$, форма аномалии близка к изометричной. Все остальное поле характеризуется нормальными значениями ППР (в интервале $10\text{-}74 \text{ мБк/м}^2\cdot\text{с}$) и является безопасным, не

требующим специальных мер по снижению проникновения радона в жилые строения.

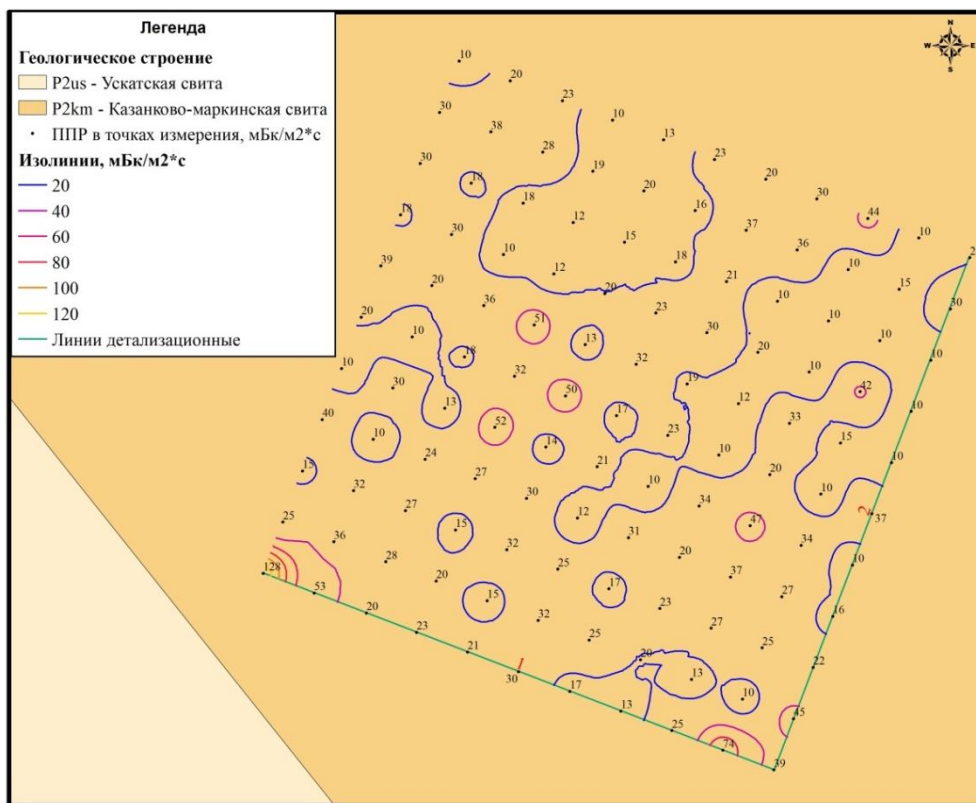
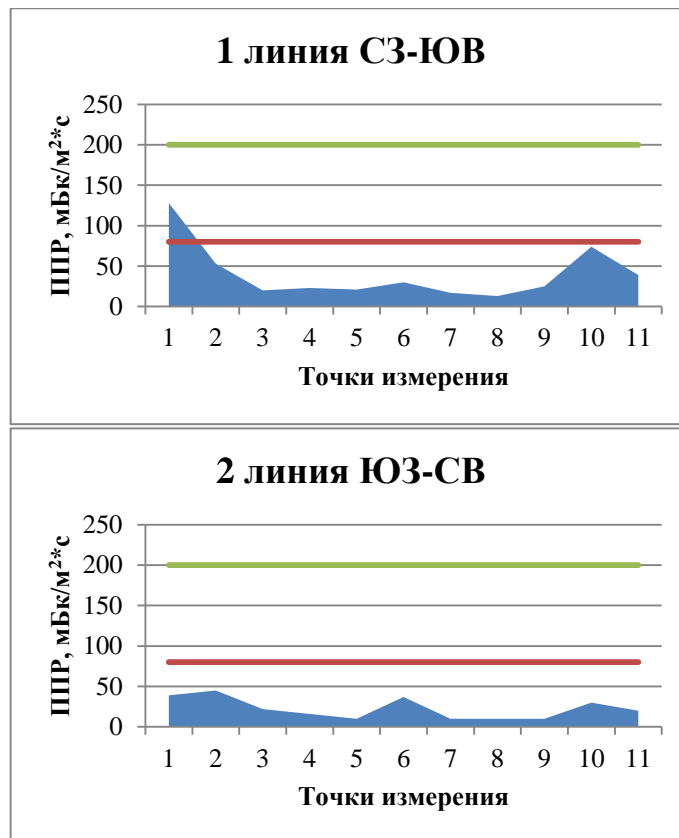


Рис. 9. Картограмма ППР в R₂km (интервал измерения - 5 м)

По линиям 1 и 2 построены профили ППР из грунта (рис. 10).

Интенсивность изменения показателей ППР, видимая на данных профилях, характерна для всех естественных однородных ландшафтов с несколькими пиковыми значениями в 128 и 74 мБк/м²*с.



Красная линия 80 мБк/м²*с, зеленая линия – 200 мБк/м²*с

Рис. 10. Профили ППР по линиям 1 и 2 в Р₂км (интервал измерения - 5 м)

На рис. 11 представлен один из участков исследования ППР в пределах Р₂ln. В пределах данного участка ППР варьирует от 9 до 260 мБк/м²*с, со средним значением $38,68 \pm 4,14$ мБк/м²*с. Показатели имеют логнормальное распределение. В целом поле характеризуется большим количеством аномалий, интенсивность и площадь которых больше чем в Р₂км. Аномалии принимали овальную и изометричную форму.

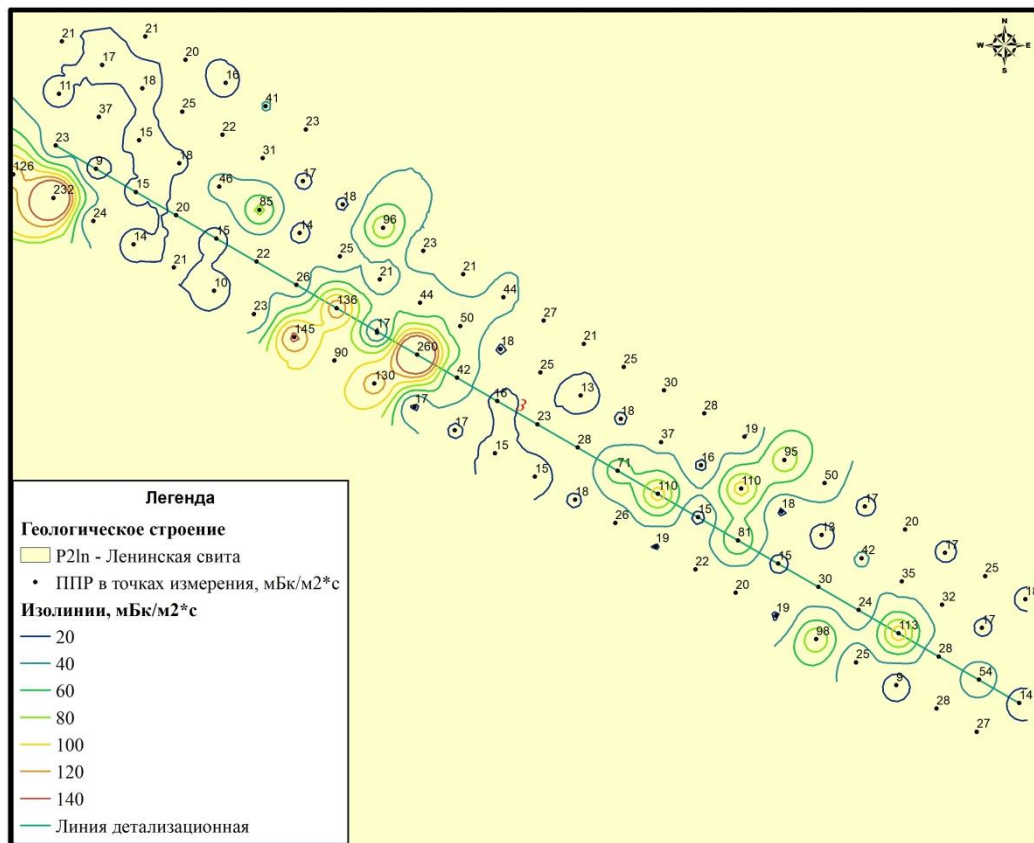


Рис. 11. Картограмма ППР в пределах R_2ln (интервал измерения - 5 м)

По линии 3 был построен профиль изменения ППР из грунта (рис. 12.).

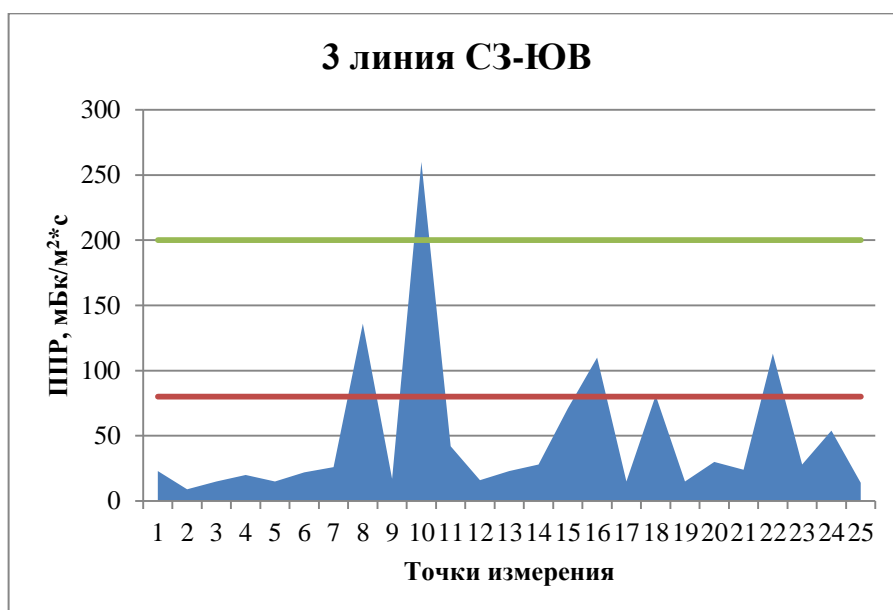


Рис. 12. Профиль ППР по линии 3 в R_2ln (интервал измерения - 5 м)

Интенсивность изменения ППР из грунта значительно варьируется. По разведочной линии изменение ППР на шаг измерений достигает 243 мБк/м²*с. Таким образом в пределах R₂In могут обнаруживаться точки с высокой (80-200 мБк/м²*с) и очень высокой (> 200 мБк/м²*с) ППР.

В целом по исследуемому полю обнаружены пикеты со значением фоновых концентраций, относящих данные точки в 3 группу опасности. Полученные данные по ППР из грунта хорошо согласуются с данными проведенных исследований в континентальной части России, где средние значения варьировались от 29±8 до 95±51 мБк/м²*с, возрастая в летнее время в Центральной, Восточной Сибири, а также на Дальнем Востоке [3]. Высокие значения потока радона, полученные в этом исследовании в осеннее время на Урале, Западной Сибири и других территориях, объяснялись влиянием локальных факторов: разломов и антропогенных источников [3], которые также присутствуют и на территории Ленинск-Кузнецкого района.

При строительстве жилых домов несоблюдение умеренных и, в отдельных случаях, усиленных мер по защите от поступления радона может привести к дополнительным радиационным нагрузкам на население. На территории R₂In рекомендуется обязательное проведение оценки ППР грунтов, в пределах контуров возводимых жилых строений, а также измерение ОАР в уже построенных домах.

3.3. Характеристика ППР на территории шахтных полей

Оценка территорий с шахтными полями угольных предприятий в пределах казанково-маркинской свиты (R₂km) показала высокие средние и максимальные показатели ППР (см. табл. 10.).

Среднее арифметическое ППР группы случая (Case) составляет 181,59±13,32 мБк/м²*с, а это выше показателей, полученных для гранитных интрузивных тел г. Белокурихи (Алтайский край) - 77 мБк/м²*с, пгт. Колывань (Новосибирская обл.) - 125 мБк/м²*с, г. Чжухай (Китай) - 73

мБк/м²*с, г. Эшасьер (Франция) - 52 мБк/м²*с [12], что дает основание рассматривать данную территорию как весьма радоноопасную для строительства жилых (и даже производственных) строений. Значение медианы – 119 мБк/м²*с, что является достаточно высоким показателем для такого типа грунтов. Модой для данной выборки является - 20 мБк/м²*с. Показатели ППР варьируют от 8 мБк/м²*с до 3310 мБк/м²*с. Коэффициент вариации составляет 142 %, что говорит о крайней неоднородности выборки.

Таблица 10. Описательная статистика выборки Р₂км с шахтными полями

Статистические параметры	Р ₂ км + шахтные поля
Среднее значение, мБк/м ² *с	181,59±13,32
Стандартное отклонение	258,00
Медиана, мБк/м ² *с	119
Мода, мБк/м ² *с	20
Дисперсия	66563,93
Мах, мБк/м ² *с	3310
Мин, мБк/м ² *с	8
Коеф.вариации, %	142
Кол-во измерений ППР	375

На рис. 13 представлено распределение показателей ППР в пределах Р₂км с шахтными полями.

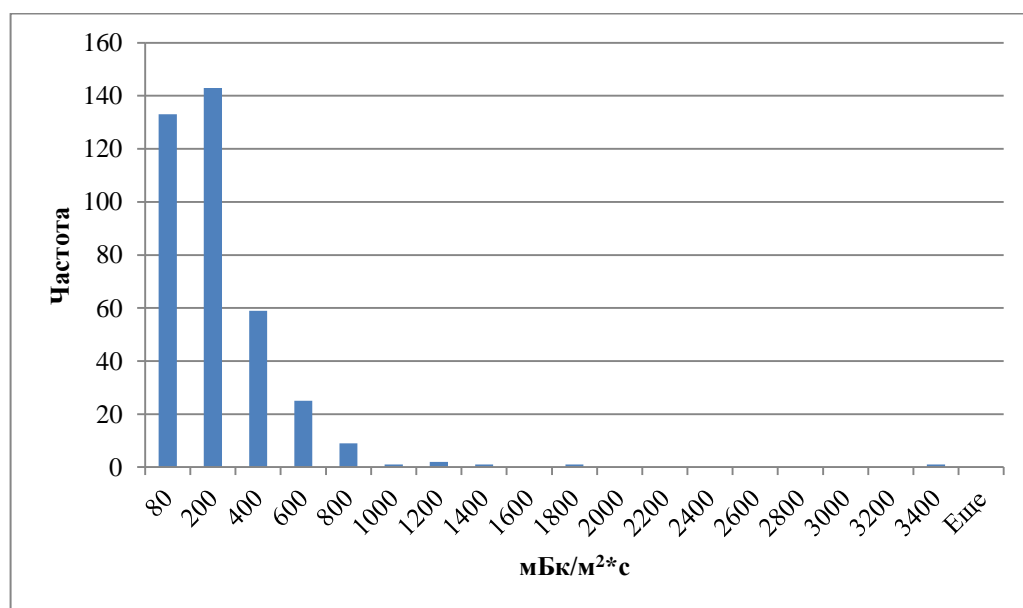


Рис. 13. Распределение ППР в Р₂км с шахтными полями

Распределение ППР по данным грунтам характеризуется весьма большим присутствием показателей ниже порогового ($80 \text{ мБк/м}^2 \cdot \text{с}$), что и показала мода выборки. При этом на их фоне появляется существенное количество измерений со значительным, даже аномальным, уровнем, которые определяют опасность данных грунтов.

Распределение показателей ППР в R_2km с шахтными полями и их оценка по НРБ-99 представлены в табл. 11.

Таблица 11. Распределение ППР R_2km с шахтными полями по НРБ

Группы	1	2	3
Интервалы ППР, $\text{мБк/м}^2 \cdot \text{с}$	0-80	81-200	>200
R_2km + шахтные поля	133 (35,47 %)	143 (38,13 %)	99 (26,40 %)

Данное распределение показывает существенную долю точек измерения, которые превышают безопасный уровень и требуют обязательных умеренных (38,13 %) и усиленных (26,4 %) мер по исключению попадания радона в помещения как уже в построенных домах, так и планируемых на этой территории.

На картосхеме пространственных особенностей ППР в грунтах R_2km с шахтными полями получились обратные закономерности, в которых аномалиями, относительно среднего, вероятнее выступают точки с низкими показателями (см. рис. 14.). Формируется своего рода инверсионный рисунок радонового поля [31].

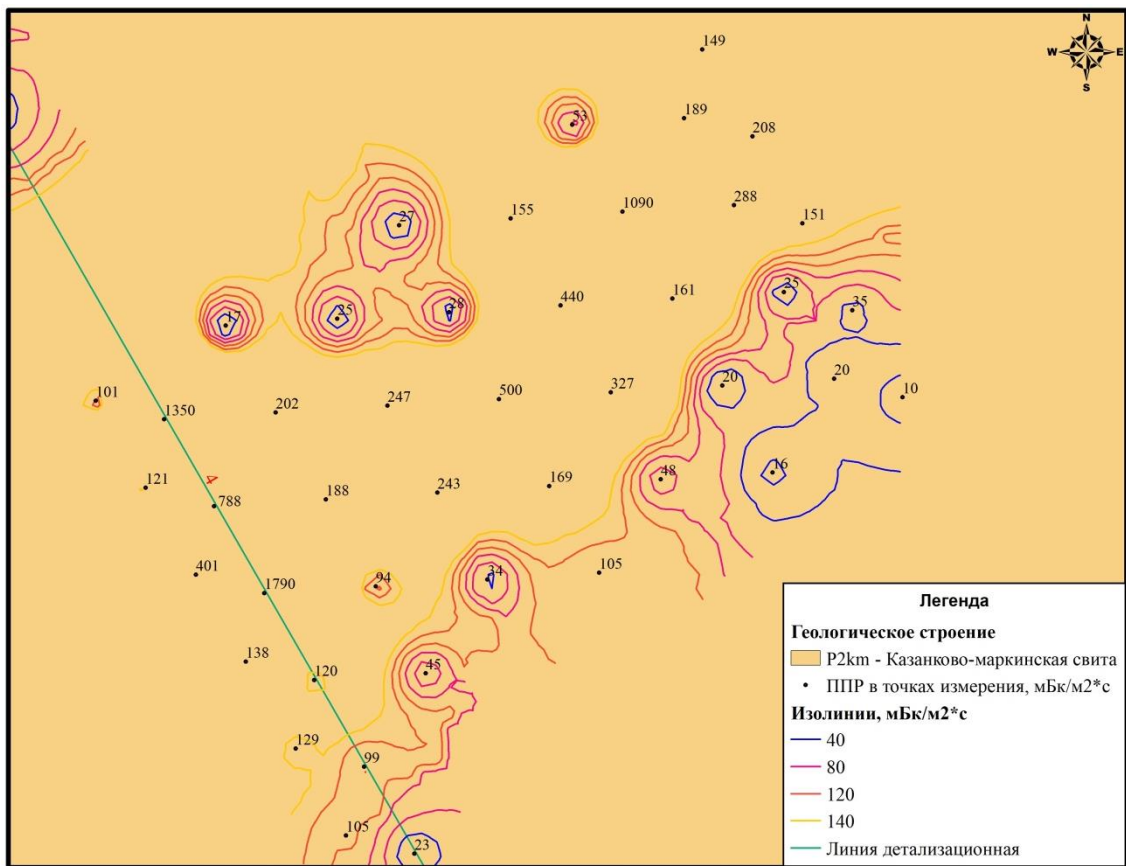
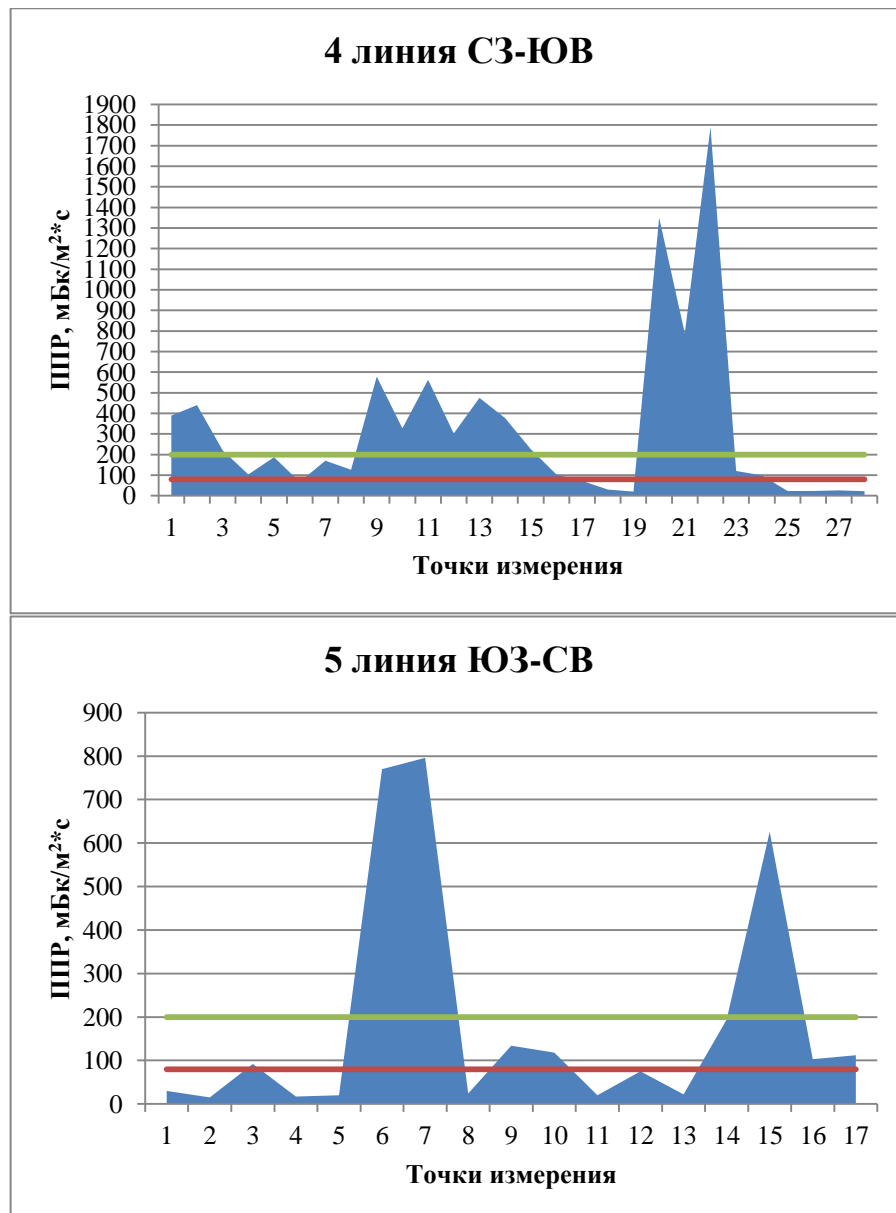


Рис. 14. Пространственные особенности ППР в пределах R₂km на территории шахтного поля (интервал измерения - 2 м)

Показатели равные фоновым в R₂km, в значительном количестве случаев, совпадают с насыпными глинистыми грунтами, которые были завезены после сноса жилых строений. Снос жилых строений произведен по причине превышения в них концентрации метана, углекислого газа. Радон и его ДПР часто приурочены к транспортным каналам этих газов [117].

По данному участку произведены измерения ППР с шагом в 2 метра по направлениям СЗ-ЮВ и ЮЗ-СВ (см. рис. 15.).



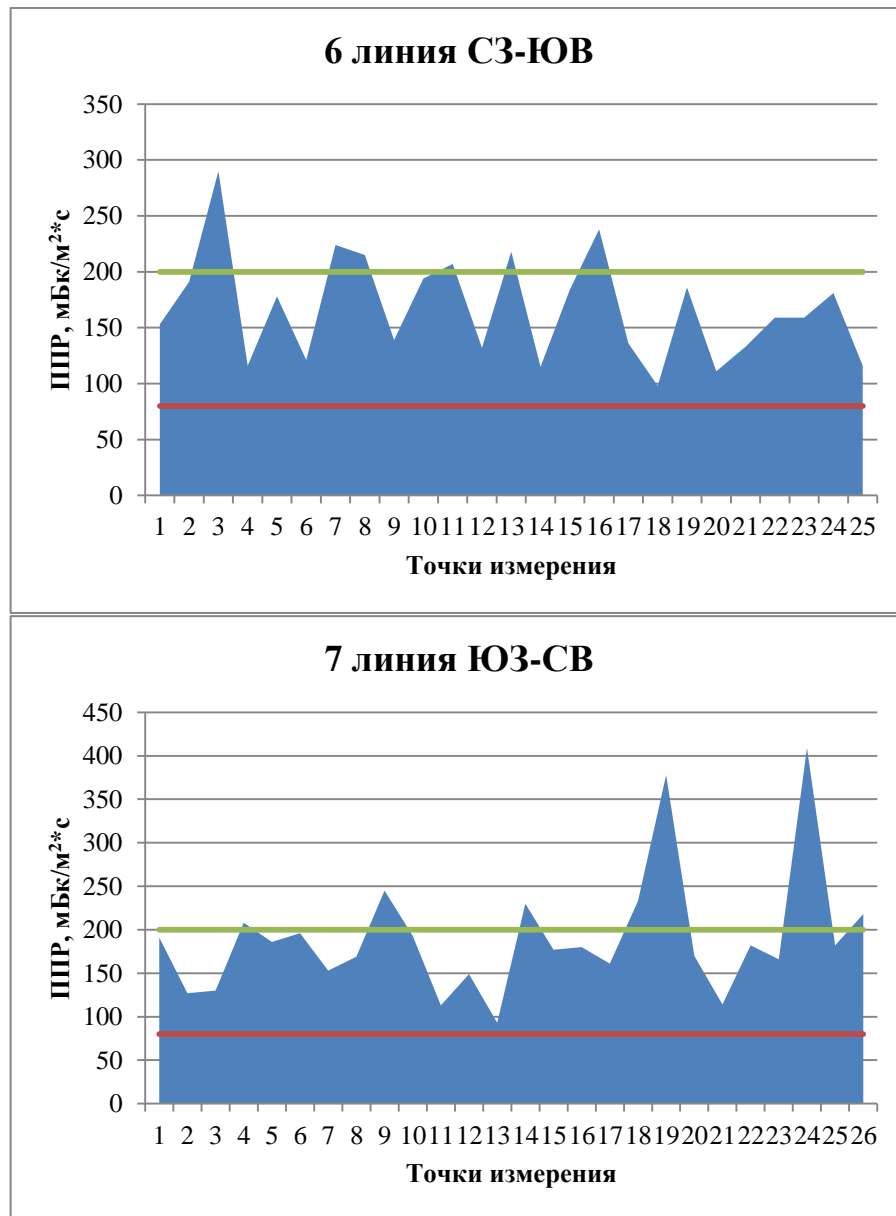
Красная линия 80 мБк/м²*с, зеленая линия – 200 мБк/м²*с

Рис. 15. Профили ППР в Р₂км с шахтным полем (интервал измерения - 2 м)

По линиям построенных профилей были зафиксированы единичные случаи нормальной ППР, в остальных случаях показатель был выше (800 мБк/м²*с) или значительно выше (1790 мБк/м²*с) верхней границы 3 класса опасности грунтов (200 мБк/м²*с). Аномалии имели, как правило, разнообразную форму.

Изучение параметров ППР в пределах сельскохозяйственных полей, расположенных также в границах Р₂км с шахтными полями, продемонстрировало, что показатель их также превышает фоновый уровень и

варьирует от 93 мБк/м²*с до 409 мБк/м²*с, со средним значением 178,58±8,6 мБк/м²*с. Построенные профили показали также превышение ППР в большинстве точек измерения (см. рис. 16.).



Красная линия 80 мБк/м²*с, зеленая линия – 200 мБк/м²*с

Рис. 16. Профили ППР в Р₂км с шахтным полем (интервал измерения - 5 м)

Во всех точках наблюдения были зафиксированы превышения относительно нормального уровня (80 мБк/м²*с) и фонового уровня (22,87±1,01 мБк/м²*с). Для более детального изучения сеть наблюдений была сгущена до интервала в 1 м (см. рис. 17.).

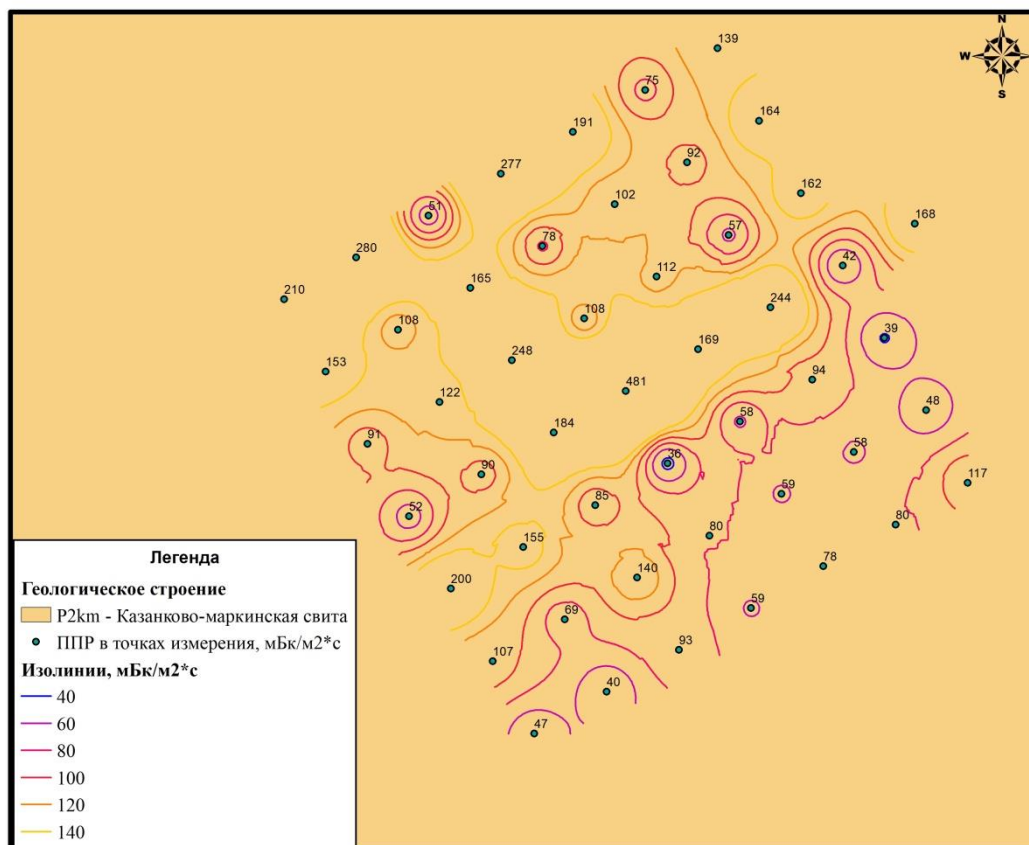


Рис. 17. Картосхема ППР в пределах R₂km на территории шахтного поля (интервал измерения - 1 м)

В пределах поля 6х6 метров показатель варьировал от 36 мБк/м²*с до 481 мБк/м²*с, со средним значением 123,14±11,52 мБк/м²*с. Распределение - логнормальное. Таким образом, в пределах R₂km с шахтными полями показатель ППР значительно варьирует даже на очень малом расстоянии, что, вероятнее всего, говорит о существовании и влиянии геодинамически активных нарушений в пределах данного поля.

Таким образом, изученные грунты в пределах R₂km с шахтными полями являются радоноопасными, а низкие показатели ППР характерны для глинистых грунтов в местах снесенных домов.

3.4. Оценка влияния шахтных полей на радоновую опасность геологической среды

Изучение влияния подземных выработок на ППР из грунтов была изучена в отношении территорий распространения казанково-маркинской свиты (P_2km). Использование ленинской свиты (P_2ln) в сравнениях объясняется необходимостью сравнения радоновой опасности естественных грунтов и антропогенно измененных.

Оценка влияния наличия шахтных полей на радоновую опасность территории показала значительное влияние этого фактора на геологическую среду (см. табл. 12.) [106].

Таблица 12. Сравнение статистических показателей ППР на территории шахтных полей и без них

Статистические параметры	$P_2km+ШП^*$	P_2km	P_2ln	P_2km+P_2ln
Среднее значение, мБк/м ² *с	181,59±13,32	22,87±1,01	46,61±3,62	33,07±1,78
Стандартное отклонение	258,00	13,46	41,91	31,51
Медиана, мБк/м ² *с	119	20	27	22
Мода, мБк/м ² *с	20	10	18	20
Мах, мБк/м ² *с	3310	128	260	260
Мин, мБк/м ² *с	8	10	9	9
Коэф.вариации, %	142	59	90	95
Кол-во измерений ППР	375	178	134	312

*-шахтные поля

Полученные значения ППР из грунта территорий, подработанных угольными шахтами, значительно превышают таковые на контрольной территории. При этом, стоит обратить внимание как на среднее значение, максимальное и медиану эманации радона. Мода имеет сравнимый показатель, относительно всех фоновых значений. Вариации показателя ППР в пределах шахтных полей существенно выше фоновых. Значительные максимальные показатели ППР из грунта не характерны для данных территорий, сложенных таким составом пород, и не содержащих ураноносные месторождения полезных ископаемых. Минимальные значения

сопоставимы для двух территорий по ППР, вероятнее всего, говорят о низком значении среднего кларкового содержания материнских для радона химических элементов в горных породах подработанных и не подработанных угольными предприятиями участков.

Для оценки значимости различий применялся непараметрический метод – U критерий Манна-Уитни, который показал достоверные отличия на уровне $p \leq 0,0001$.

Частота встречаемости точек наблюдения с высокими показателями ППР значительно выше в грунтах P_2km с шахтными полями (см. табл. 13.).

Таблица 13. Сравнение распределения показателей ППР на территории шахтных полей и без них

Интервалы ППР, мБк/м ² *с	$P_2km+ШП$	P_2km	P_2ln	$P_2km+ P_2ln$
0-80	133 (35,47 %)	177 (99,44 %)	108 (80,6 %)	285 (91,35 %)
81-200	143 (38,13 %)	1 (0,56 %)	24 (17,91 %)	25 (8,01 %)
201-400	59 (15,73 %)	0	2 (1,49 %)	2 (0,64 %)
401-600	25 (6,67 %)	0	0	0
601-800	9 (2,4 %)	0	0	0
>800	6 (1,6 %)	0	0	0
Всего замеров	375 (100 %)	178 (100 %)	134 (100 %)	312 (100 %)

Основная часть значений ППР на контрольной территории (P_2km , P_2ln и P_2km+P_2ln) не выходит за пределы 200 мБк/м²*с. При этом, на территории, подработанной угольными предприятиями (группа $P_2km+ШП$), значения показателя ППР в 26,4 % измерений выходят за пределы 200 мБк/м²*с, а в 64,53 % измерений – выше 80 мБк/м²*с. Во всех случаях, распределение имеет логнормальный вид. Существенное изменение показателей ППР в пределах шахтных полей, говорит о влиянии данного фактора не на локальном уровне одного нарушения, а в целом на всей площади шахтного поля, которое после отработки угольного пространства шахты имеет вновь образованную и развивающуюся систему нарушений, которые служат транспортными каналами для радона и его ДПР. Система данных нарушений

имеет разный потенциал для выхода радона, который необходимо исследовать дополнительно. Можно предположить ее связь с возрастом отработанного пространства угольной шахты, расположением целиков, глубиной отработки и составом перекрывающих отложений.

Сравнение грунтов подработанных и не подработанных угольными шахтами по нормам НРБ приведено в табл. 14.

Таблица 14. Сравнение показателей ППР по группам опасности согласно НРБ

Интервалы ППР, мБк/м ² *с	P _{2km}	P _{2ln}	P _{2km} + P _{2ln}	P _{2km} + шахтные поля
0-80	177 (99,44 %)	108 (80,6 %)	285 (91,35 %)	143 (38,13 %)
81-200	1 (0,56 %)	24 (17,91 %)	25 (8,01 %)	133 (35,47 %)
>200	0 (0 %)	2 (1,49 %)	2 (0,64 %)	99 (26,40 %)

Существенное количество точек наблюдения в пределах шахтного поля имеют 2 и 3 класс опасности, что значительно превышает фоновые показатели. Таким образом, изученная территория шахтных полей представляет из себя антропогенно измененный ландшафт, с трансформированной геологической средой для транспорта радона. Она требует существенного пересмотра противорадоновых мер в построенных и планируемых домостроениях.

Степень влияния всех факторов геологической среды, приводящих к высоким показателям ППР из грунта, достаточно сложно определить. Некоторую ясность в этом помогает установить пространственный анализ полученных значений эманаций радона. В пределах подработанных территорий были зафиксированы изометрические аномалии ППР из грунта, что может говорить о наличии трещин малой протяженности или областей проседания над выработкой. Форма аномалий устанавливалась путем сгущения сети наблюдений. При этом аномалии приобретали разные формы и часто отличались от линейно вытянутых конфигураций, которые обычно свойственны естественным транспортирующим каналам радона

(дизъюнктивным нарушениям). Часто зоне повышенной ППР из грунта сопутствовали участки проседания и провалов поверхностных грунтов [29].

Также на подработанных территориях фиксируются резкие изменения ППР из грунта, что говорит о значимости подводящих каналов для эманации радона и снижении влияния кларковых содержаний радиоактивных элементов в почве на выход радона. Участки с низкой ППР вероятно могут быть отнесены к зонам цельных массивов горных пород или зонам локального сжатия блоков земной коры, по аналогии с исследованиями [127, 143]. Зоны с высокой ППР, в таком случае, могут определять наличие участков тектонической нарушенности пород [29].

3.5. Выводы по главе

Таким образом, изменения в геологической среде, вызванные подземной добычей угля, существенно влияют на ППР из грунта. Почти две трети измерений относят территорию ко 2 и 3 классам радоноопасности по НРБ-99/09. В этой ситуации при строительстве жилых зданий следует применять усиленные противорадоновые меры в отношении изоляции жилища от грунта. Кроме того, на поверхности территорий подработанных пространств часто фиксируется инверсионный рисунок эманации радона, когда аномалиями выглядят низкие потоки. В тоже время, на территории шахтного поля обнаруживаются участки с низким потоком радона, что позволяет считать ее не полностью радоноопасной. Стоит отметить, что на территории, где происходят процессы проседания и проваливания грунта, требуется обязательный постоянный контроль ОАР в помещении.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ НА РАДОНООПАСНОСТЬ ЖИЛЫХ СТРОЕНИЙ

4.1. Методика оценки радоновой опасности помещений

В работе объектами оценки ОАР были частные жилые строения, в силу их большей потенциальной радоновой опасности, связанной с влиянием геологической среды.

Жилые дома на изучаемой территории построены в различные года от 1924 до 2013 гг., что исключает возможность однородного влияния инженерно-конструкционных особенностей строений на коллекторные, в отношении радона, свойства помещений. В исследовании участвовали деревянные и кирпичные дома с деревянными перекрытиями и подвалами под каждым из них. В ранее проведенных исследованиях было продемонстрировано, что материалы, используемые в отделке помещений, закономерно отличаются друг от друга в уровнях эксхалляции радона, где положительно выделяются керамическая и керамогранитная плитки и другие материалы, с высоким содержанием радиоактивных элементов [85]. Одновременно с этим отмечается, что они не способны давать значительные концентрации радона в помещении, при условии обычного проветривания [85], а могут являться лишь дополнительными факторами радоноопасности [81]. Процессы проветривания помещения также важны при оценке радоновой безопасности строений, но в условиях длительного холодного периода, характерного для континентального климата Кузнецкого прогиба, жилые строения длительное время эксплуатируются в практически полной изоляции от открытого воздуха. В силу этого возрастает среднегодовая радиационная нагрузка на население, связанная с климатическими особенностями территории проживания [77].

Проведение исследований осуществлялось в зимнее время с декабря 2018 г. по февраль 2020 г, поскольку в данное время года в жилых строениях

фиксируются пиковые значения содержания радона в помещениях. Суровые климатические условия вынуждают существенное количество времени проводить внутри помещений, что значительно увеличивает значимость оценки концентрации радона именно в зимнее время года. В летнее время года концентрация радона в частных жилых помещениях не имеет высоких значений ОАР и их пространственных различий.

Метеорологические условия не имели существенных различий при измерении и соответствовали рекомендациям пособия к оборудованию. Средняя высота над уровнем моря в пределах исследуемой территории колеблется в пределах от 200 до 280 м. Среднемесячные климатические данные: декабрь - средняя температура $-9,0$ °С, давление - 1024 гПа, относительная влажность – 88 %; Январь - средняя температура $-10,2$ °С, давление 1023 гПа, относительная влажность 87 %; Февраль - средняя температура $-6,7$ °С, давление - 1024 гПа, относительная влажность – 86 %. Температура была приемлемой для измерений по методике с погрешностью не более 30 %.

Почвенные условия характеризовались однородностью во всех точках наблюдения. Почвы черноземы выщелоченные.

Интерполяция данных между точками наблюдений осуществлялась с помощью метода обратно взвешенных расстояний (ОВР).

Всего было изучено 120 частных жилых строений в пределах подрабатываемых и не подрабатываемых территорий. Кроме того, мы провели дублирующие измерения ОАР в точках измерения. Согласно этим результатам, данные отличались от первичных измерений не более чем на 5–10 %. На рис. 18 обозначено их пространственное расположение, относительно потенциальных факторов радоноопасности геологической среды.

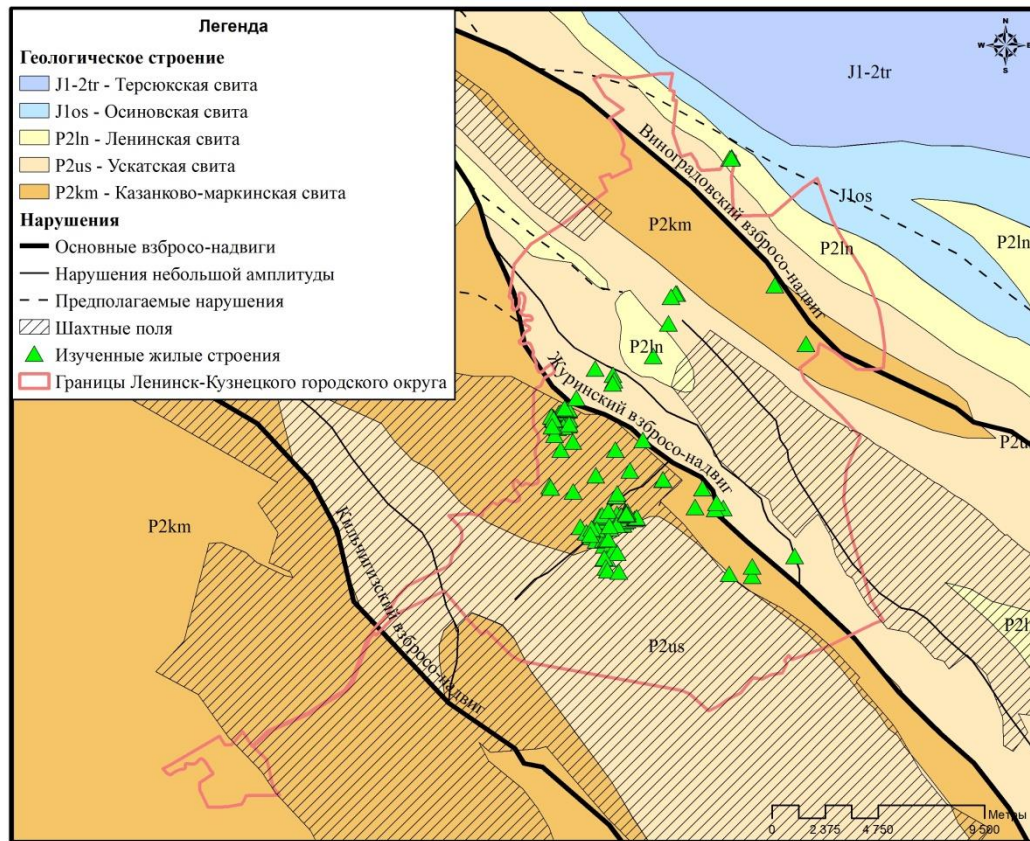


Рис. 18. Расположение изученных жилых строений

Исследование содержания радона в помещениях производилось прибором Камера-01 с применением пассивного метода сорбции с помощью сорбционных угольных колонок СК-13. Данный метод достаточно часто используется при оценке концентрации радона и имеет более низкие уровни случайных флуктуаций, возникающих, например, при единовременном проветривании в день проведения замеров [116]. Две ловушки устанавливались в помещении на высоту 0,7-1,1 м над уровнем пола на 6-7 дней для получения интегрального показателя объемной активности радона (ОАР), который исключает влияние кратковременных изменений ОАР. Каждая ловушка устанавливалась в комнатах, где человек находится более длительное время (обычно это спальная или кухонная комнаты). Истинным значением ОАР считался усредненный показатель между двумя ловушками с

целью исключения влияния микроциркуляционных процессов в отдельных комнатах жилых строений.

Обработка результатов производилась в программах Statistica и MS Office Excel с помощью надстройки «пакет анализа». Пространственное расположение исследуемых жилых строений на ОАР были обозначены с помощью данных спутниковых снимков Landsat.

Пересчет ОАР в ЭРОА производился по формуле:

$$\text{ЭРОА} = 0,5 * \text{ОАР},$$

где ОАР – объемная активность радона, Бк_лм³.

Изучение влияния антропогенных источников радоноопасности геологической среды (шахтных выработок) производилось путем деления всех изученных домов по территориальному принципу. В группу случая (Case) попали строения расположенные в пределах шахтных полей, остальные строения были отнесены в контрольную группу (Control). Наибольшее число всех строений группы case и control располагаются в пределах казанково-маркинской свиты (Р₂km), что дает возможность оценить радоноопасность большей части жилых домов Ленинск-Кузнецкого района.

Территории, на которых были произведены измерения содержания радона в помещении, находились на участках, не работающих в настоящее время шахт.

Сравнение показателей выборок производилось по критерию Манна-Уитни с уровнем $p \leq 0,05$ (был применен по причине не нормального распределения после проверки тестом Колмогорова-Смирнова).

Чтобы исследовать связь между измеренной плотностью потока радона около и под зданиями, было проведено десять измерений плотности потока радона для каждого жилища, и истинное значение считалось средним из этих измерений. Для корреляционного анализа использовались 12 зданий и их

территории. Коэффициент корреляции Спирмена для непараметрических данных использовался для расчета корреляции между ППР и ОАР.

4.2. Характеристика ЭРОА в жилых строениях

На основе изучения 120 жилых строений была вычислена описательная статистика, которая представлена в табл. 15.

Таблица 15. Описательная статистика ОАР и ЭРОА жилых домов

Статистические параметры	Жилые дома Ленинск-Кузнецкого	
	ОАР	ЭРОА
Среднее значение, Бк/м ³	318,89±34	159,45±17
Стандартное отклонение, Бк/м ³	372,46	186,23
Дисперсия	138727	34681,74
Медиана, Бк/м ³	242,75	121,38
Мода, Бк/м ³	171	85,5
Мах, Бк/м ³	3430	1715
Мин, Бк/м ³	31,5	15,75
Козф. вариации, %	116,8	116,8
Кол-во измерений ОАР, ед.	120	120

Показатели ЭРОА жилых строений Ленинск-Кузнецкого района имеют значительную вариацию от 15,75 Бк/м³ до 1715 Бк/м³. Среднее арифметическое значение ЭРОА – 159±17 Бк/м³, что значительно превышает среднероссийский показатель в 27 Бк/м³ [38] и средние показатели известной радоноопасной территории Белокурихи (80 Бк/м³) и Старобелокурихи (158 Бк/м³) [110]. Мода – 85,5 Бк/м³, а медиана – 121,38 Бк/м³. Данные показатели позволяют считать жилые одноэтажные строения Ленинск-Кузнецкого достаточно радоноопасными, что ранее не было отражено в региональных исследованиях. Пиковые значения соответствуют показателям г. Лермонтов, Ставропольского края (1200-1500 Бк/м³), известного своими урановыми рудами и радоновыми водами. Коэффициент вариации показателя ЭРОА – 116,8 %, что говорит о высокой неоднородности выборки исследуемых

домов, а, соответственно, и факторах, влияющих на концентрацию радона в помещении.

Все жилые дома были разделены на группы на основе пространственного положения домов относительно естественных и антропогенных источников радоновой опасности для сравнения показателей ОАР между ними (см.табл.16).

Таблица 16. Описательная статистика ОАР для жилых домов относительно их пространственного положения

Параметр	ОАР, Бк/м ³		
	Среднее	Min	Max
Дома за пределами шахт и в пределах естественных нарушений (n=7)	227,86±46,31	49,5	398,5
Дома за пределами шахт и за пределами основных естественных нарушений (n=16)	248,09±36,22	84,5	608,5
Все дома группы Control за пределами шахт (n=23)	241,94±28,94	49,5	608,5
Дома в пределах шахт и за пределами естественных нарушений (n=91)	344,19±42,14	31,5	3430
Дома в пределах шахт и в пределах естественных нарушений (n=6)	231,25±65,03	62,5	540,5
Все дома группы Case в пределах шахт (n=97)	337,20±41,11	31,5	3430

Согласно полученным данным строения, находящиеся в пределах шахтных полей и за пределами естественных нарушений, имеют наибольший показатель содержания радона. Таким образом, даже при отсутствии крупных естественных нарушений, которые могут быть реактивированы горными работами, в жилых домах шахтных полей фиксируется рост концентрации радона. Это может быть наиболее актуальным для мест, где шахтные выработки располагаются неглубоко.

По частоте встречаемости помещений с различными показателями ЭРОА построена столбчатая диаграмма (см. рис. 19.).

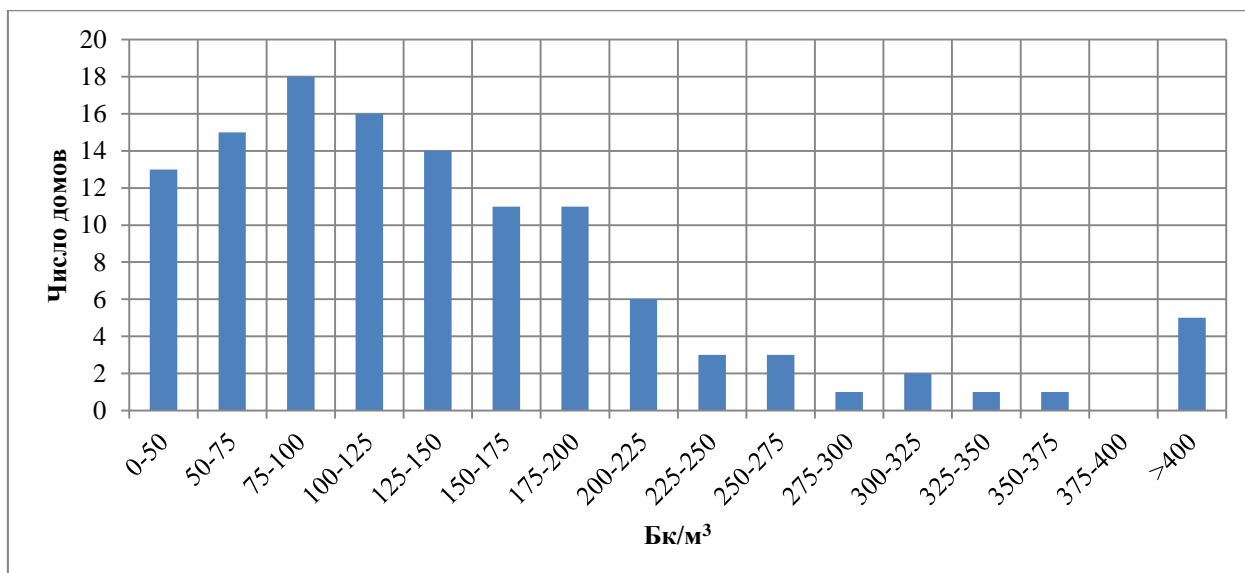


Рис. 19. Частота жилых строений с показателями ЭРОА

Для распределения характерно существенное преобладание жилых строений с концентрацией радона, в пределах установленных нормативов в 200 Бк/м³. Данная ситуация является нормальной для такого рода исследований. Для оценки опасности жилых строений было исследовано распределение жилых строений по группам согласно НРБ-99 (см. табл. 17.).

Таблица 17. Распределение ЭРОА жилых домов в Ленинск-Кузнецком районе согласно НРБ-99 и рекомендациям ОВОЗ

Интервалы ЭРОА по ОВОЗ, Бк/м ³	Жилые дома	Интервалы ЭРОА по НРБ-99, Бк/м ³	Жилые дома
0-100	46(38,33 %)	0-200	98(81,67 %)
101-200	52(43,33 %)	201-400	17(14,17 %)
>200	22(18,33 %)	>400	5(4,17 %)

Из таблицы следует, что значительное количество домов с показателем ЭРОА выше нормы по НРБ-99, а именно в интервале с 200 Бк/м³ и более находится 22 жилых строения или 18,34 % из всех изученных. При этом в 4,17 % жилых строений норма была превышена более чем в два раза. Согласно ОВОЗ, которые рекомендуют более низкие допустимые концентрации радона в помещениях, 74 здания или 61,66 % изученных относятся к домам с высокой радиационной опасностью. Количество

находящихся за границей нормы жилых строений превышает среднемировой, среднероссийский и региональный уровни [45, 46]. В работе [22] отмечается, что по выборочным исследованиям превышение ЭРОА в 200 Бк/м^3 в жилых строениях Кемеровской области фиксируется примерно в 10 % строений, что говорит о достаточно высокой радиоактивности геологической среды.

Поскольку в геологическом отношении вся территория относится к комплексам горных пород с низким содержанием U, Th, Ra, то эксхалации радона с поверхностей пластов недостаточно для формирования полученных значений ОАР, в этом случае значительные концентрации радона будут соответствовать тектоническим нарушениям или помещениям с радиоактивными материалами. При этом, формирование независимых от структурно-тектонических особенностей территории, линейно вытянутых площадных аномалий с высокими значениями в помещениях разного времени строительства, разных материалов, внутренней мебели и разной проветриваемости, выглядит крайне маловероятным. Еще одним доказательством этого служит наличие площадных аномалий радонового поля, а не случайное расположение пиков по территории [27].

4.3. Связь параметров ЭРОА в жилых строениях и радоноопасностью геологической среды

На основе территориального деления всех изученных жилых строений были составлены описательные статистики групп Case и Control (см. табл. 18.) [106].

ЭРОА в домах группы Case варьирует в пределах $15,75\text{-}1715 \text{ Бк/м}^3$, со средним значением $168,57 \pm 20,66 \text{ Бк/м}^3$. В группе Control показатель ЭРОА варьирует от $24,75 \text{ Бк/м}^3$ до $304,25 \text{ Бк/м}^3$, со средним значением $120,97 \pm 14,79 \text{ Бк/м}^3$. Очевидно, на территории шахтных полей жилые строения имеют более высокие среднюю арифметическую, медианную, максимальную

показатели ЭРОА. Значение границы 90 перцентиля для шахтных полей 272,5 Бк/м³, а для группы контроля 119 Бк/м³.

Таблица 18. Описательная статистика ЭРОА жилых домов

Статистические параметры	Жилые дома Ленинск-Кузнецкого	
	ШП (Case)	Без ШП (Control)
Среднее значение, Бк/м ³	168,57±20,66	120,97±14,79
Стандартное отклонение, Бк/м ³	203,47	70,95
Медиана, Бк/м ³	127,25	101
Мода, Бк/м ³	85,5	-
Мах, Бк/м ³	1715	304,25
Мин, Бк/м ³	15,75	24,75
Кэф. вариации, %	120,70	58,65
90 pc	272,5	119
10 pc	47,25	84,75
Кол-во измерений	97	23

Для Case и Control групп были построены диаграммы распределения жилых строений по показателям ЭРОА (см. рис. 20.).

Распределение имеет схожий вид для обеих групп, при этом, на территории шахтных полей большее количество строений имеет превышение показателя ЭРОА относительно норм радиационной безопасности. Распределение в обоих случаях имело логнормальный вид. К аналогичным результатам приходили в Польше [148] и Германии [101] на территориях шахтных выработок, когда обнаруживались высокие средние и пиковые значения ЭРОА в жилых домах .

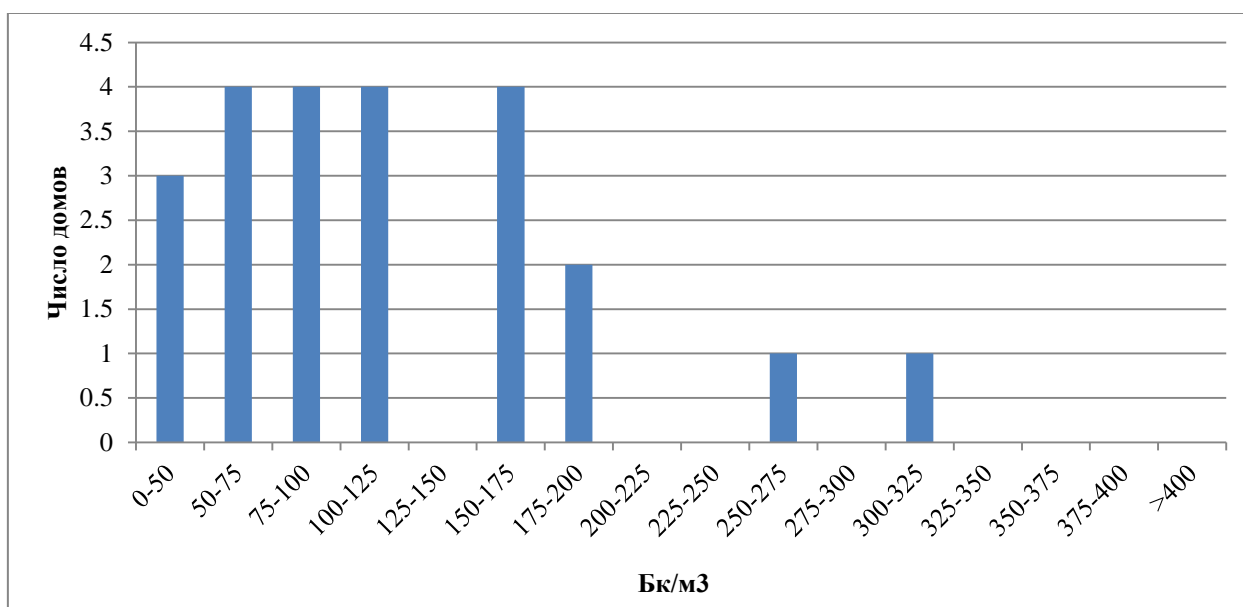
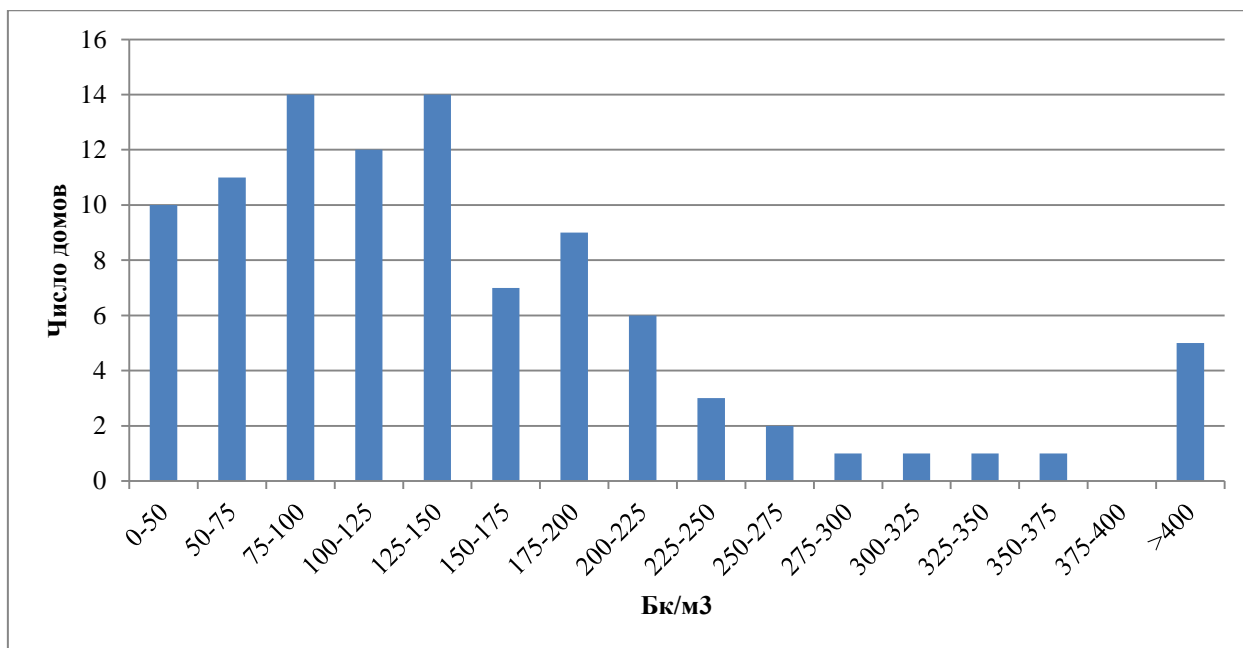


Рис. 20. Количество жилых строений в определенных интервалах ЭРОА на территории шахтных полей (вверху) и без шахтных полей (внизу)

На шахтных полях возрастает доля жилых строений с пиковыми значениями выше 300 Бк/м^3 (см. рис. 21.). График, отражающий распределение жилых строений по показателям ЭРОА на территории шахтных полей, характеризуется более равномерным распределением, прижатым к оси абсцисс, по сравнению с графиком группы контроля. При этом в интервале от 0 до 325 Бк/м^3 график Case выборки располагается ниже

графика Control, что говорит о более низкой встречаемости строений с такими показателями и увеличении домов с более высокими показателями.

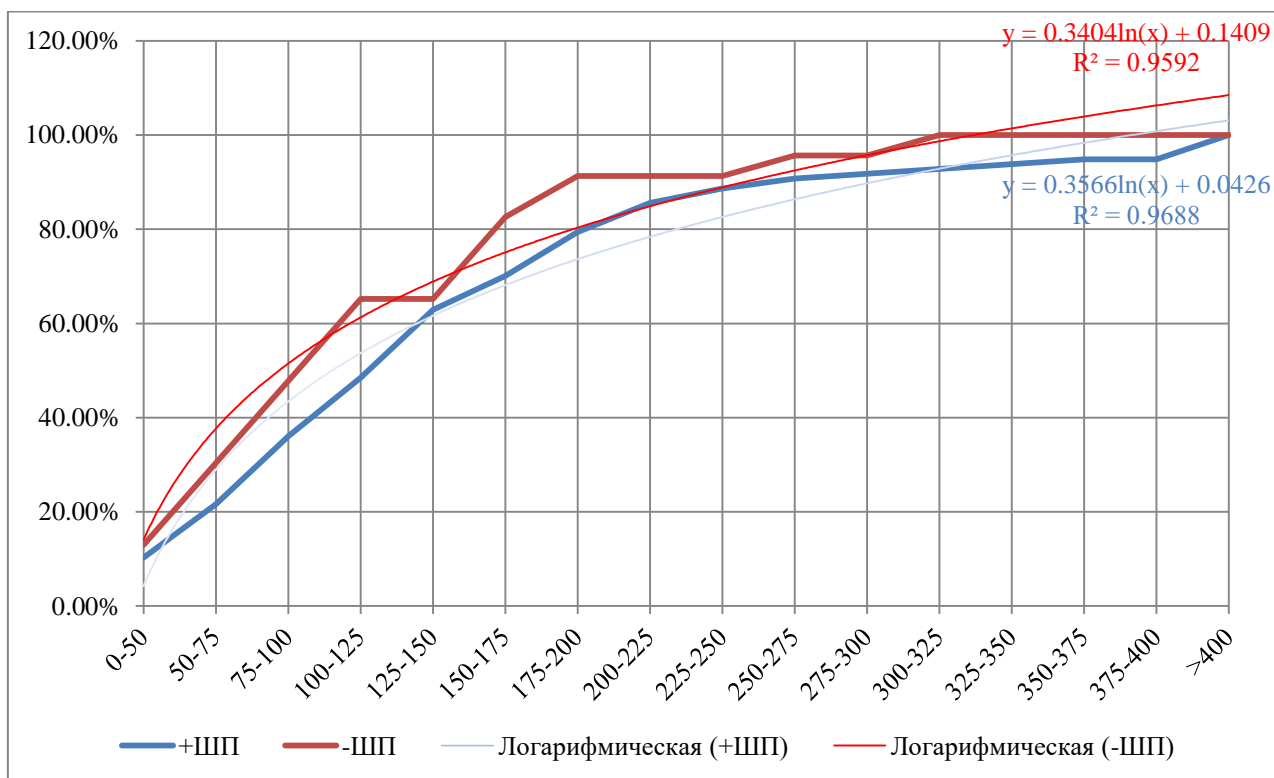


Рис. 21. Графики распределения жилых строений на территории шахтных полей и за их пределами

Данное распределение позволяет сказать о различии радиационной опасности жилых строений на территории шахтных полей и за их пределами (см. табл. 19.).

Таблица 19. Распределение ЭРОА жилых домов согласно нормам НРБ-99

Интервалы ОАР по НРБ-99, Бк/м³	На территории шахтных полей, %	За пределами шахтных полей, %
0-200	79,38	91,30
201-400	15,47	8,70
>400	5,15	0

Для территорий шахтных полей характерно превышение показателя ЭРОА для 20,62 % жилых строений, при этом, в 5,15 % случаев оно фиксируется более чем в 2 раза. Для территории контроля в 8,7 % случаев

определяется превышение ЭРОА. В обеих группах доля жилых строений с высоким ЭРОА превышает мировые, среднероссийские и региональные показатели [45, 46]. Это еще раз актуализирует необходимость проведения региональных исследований в вопросах обнаружения и оценки потенциальных естественных и антропогенных источников радоноопасности геологической среды.

В исследовании Klingel R. и Kemski J. [101] были отмечены различия в ЭРОА жилых строений на шахтных выработках и за их пределами в Германии, при этом более выраженную связь демонстрировали подвальные помещения по сравнению с жилыми комнатами первых этажей, т.е. конструктивные особенности жилых зданий могут существенно сгладить влияние геологической среды, что объясняет появление в группе Case значительного количества строений с низкими показателями ЭРОА. В Польше были получены более выраженные отличия в исследовании Wysocka M. и коллег [79, 148–150]. В нашем исследовании мы постарались исключить конструктивные особенности строений, таким образом, в исследования попали достаточно одинаковые дома. Но различия в ЭРОА в жилой части строения остались также не столь выраженными по сравнению с ППР. Непараметрический метод – U критерий Манна-Уитни показал не достоверные отличия на уровне $p \leq 0,05$. В дальнейших исследованиях стоит предполагать, что воздействие шахтных выработок может быть не ограничено шахтным полем. Кроме того, не оцененным остается общее изменение напряженно-деформационного состояния геологической среды по причине значительных выработанных пространств и влияние этой трансформации на эксхалацию и эманацию радона на поверхность.

Существенное количество исследованных жилых строений являются радиационно опасными, на отдельных территориях прослеживается четкая взаимосвязь показателей ЭРОА жилых строений и ППР из грунта. Степень влияния всех факторов, приводящих к высоким показателям ОАР в жилых помещениях, достаточно сложно определить, но можно выделить ключевые

для каждой территории. При этом пространственный анализ, при наличии линейно вытянутых площадных аномалий высоких значений ОАР, позволяет оценить структурно-тектонические условия геологической среды и степень их влияния на строения. Первично-выявленные точечные аномалии ОАР, при дальнейшем изучении окружающих строений, приобретали вытянутый площадной характер или, зачастую, овальную форму. При этом жилые дома с высокими значениями формируют некоторые области аномалий. Один из участков детального изучения связей ППР грунта и ЭРОА жилых строений представлен на рисунке 22.

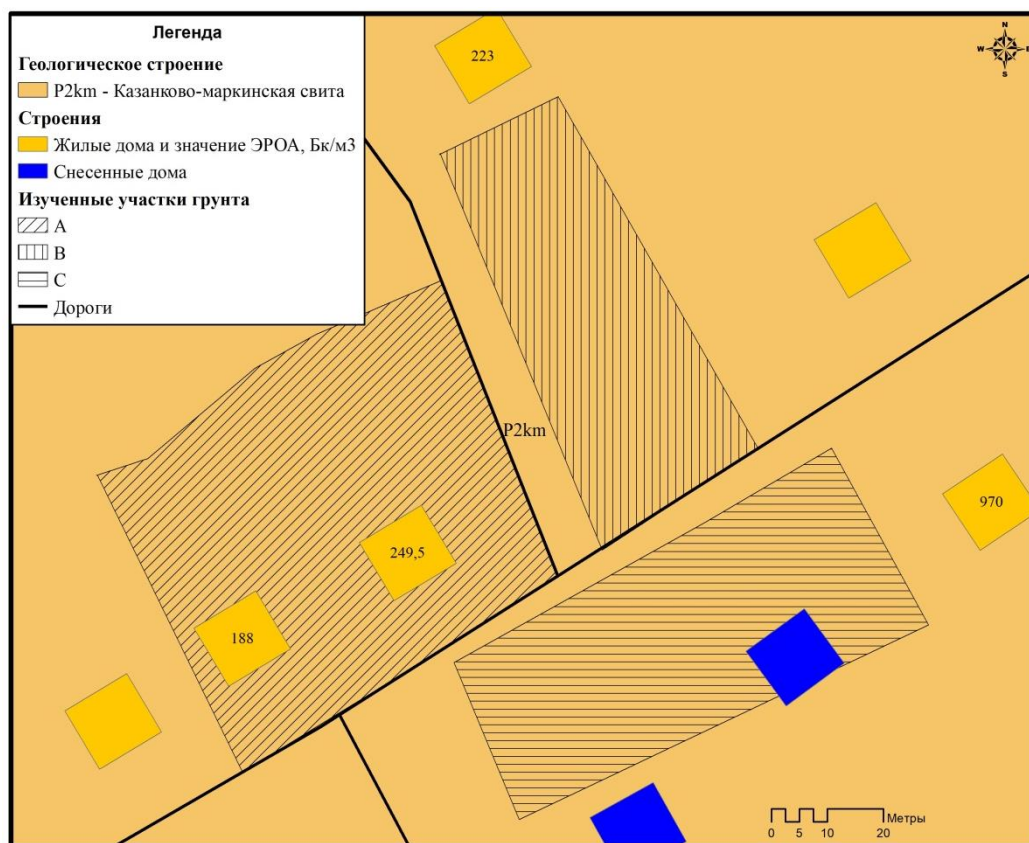


Рис. 22. Участок улицы Моховская, Ленинск-Кузнецкий

В пределах изученного участка располагается 4 изученных и два снесенных жилых строения. Дома были признаны не пригодными для жизни, по причине высоких концентраций углекислого газа и метана, радон в этих строениях не измеряли. Как ранее было отражено в работах по взаимосвязи потоков радона, метана и углекислого газа [117], нельзя исключать

значительного количества радона и в этих ликвидированных строениях. В изученных домах показатель ЭРОА варьирует от 188 до 970 Бк/м³. Показатели ППР из грунта также изменяется в пределах от 10 до 1790 мБк/м²*с. На территории участка «А» ППР варьирует от 81 мБк/м²*с до 631 мБк/м²*с, со средним значением 301,5±32,76 мБк/м²*с, а показатель ЭРОА в жилых строениях равен 218,75 Бк/м³. По участку «В» ППР изменяется в пределах 14-668 мБк/м²*с со средним 187,65±21,16 мБк/м²*с, а в жилых строениях концентрация радона - 223 Бк/м³. По участку «С» показатель ППР варьирует от 10 мБк/м²*с до 1790 мБк/м²*с, со средним значением 206,17±32,02 мБк/м²*с. Стоит отметить снижение показателя ППР в местах привезенного глинистого грунта, который использовался для засыпания территории ликвидированных домов. В пределах и окрестностях участка «С» находятся снесенные здания и жилое строение с показателем ЭРОА 970 Бк/м³. В подвальном помещении данного строения показатель ЭРОА равен 9900 Бк/м³. Таким образом, в пределах данного участка улицы Моховской Ленинск-Кузнецкого района наблюдается закономерность между высокими показателями ППР и ЭРОА жилых строений.

Наличие обратной зависимости между средними показателями ППР за пределами контура жилого строения и ЭРОА связано с высокой изменчивостью эманаций радона в пределах шахтных полей. В этом случае области высоких значений могут попадать в пределы контура жилого строения и создавать высокие потоки радона, при этом не фиксироваться при предварительном исследовании. Примером данной закономерности являются строения по улице Буденого и окрестные грунты (см. рис. 23.).

В пределах данного участка изученные жилые строения имеют ЭРОА в пределах 166,5 Бк/м³ до 1715 Бк/м³. В окрестностях жилых строений получены значения ППР со средним значением 192,64±53,53 мБк/м²*с, при этом в границах контура ЖС с показателем ЭРОА 1715 Бк/м³, ППР изменяется в пределах от 238 мБк/м²*с до 3310 мБк/м²*с, со средним

значением $954,33 \pm 437,81$ мБк/м²*с. На предварительном исследовании за пределами контура строения ППР не превышал 80 мБк/м²*с.

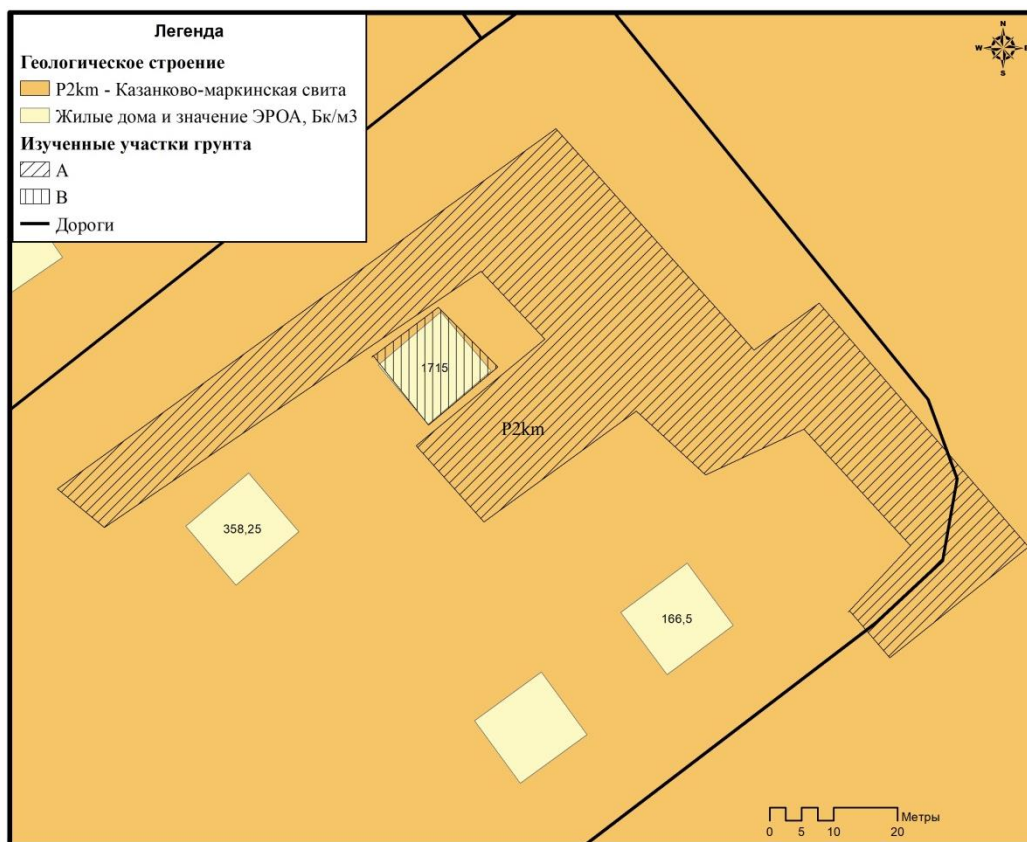


Рис. 23. Участок улицы Буденного, Ленинск-Кузнецкий

Таким образом, распределение ППР по грунту крайне неравномерно, при этом формируя значительные аномалии по отношению к фону, в пределах небольшого участка ландшафта, что не характерно для естественных грунтов P₂km, в которых может фиксироваться аномалия, но не с таким превышением к фоновому значению. Иначе говоря, естественные нарушения не обладают таким потенциалом для выноса радона на поверхность по сравнению с антропогенно сформированными.

Следствием таких резких изменений ППР из грунта является частая фиксация различий показателей ОАР в соседних строениях, что может говорить о затухании транспортировки радона в помещения за пределами тектонических нарушений или провалов в грунте, вызванных горнодобывающей деятельностью. При наличии тектонических нарушений

или подземных полостей (горных выработок) площадь сбора и выделения радона значительно возрастает за счет дополнительной трещиноватости. В таком случае, в условиях не полного промерзания грунта под жилыми домами большее количество газа будет попадать в помещения [105].

При отсутствии нарушений площадь деятельной поверхности, с которой радон эксхалирует и эманурует, равна площади дома и низкие концентрации материнских продуктов по отношению к радону не будут приводить к высокой ОАР. Отрицательные аномалии содержания радона также формируют области и по аналогии с исследованиями [127, 143], направленными на изучение уровня эманации радона из зоны дизъюнктивных нарушений различных типов, данные участки могут быть отнесены к цельным массивам горных пород или зонам сжатия (в том числе, к осевым зонам мульды проседания над отработанным пространством). Для грунтов, не расположенных на подработанных пространствах, также прослеживается связь ОАР и средних значений ППР (см. рис. 24.).

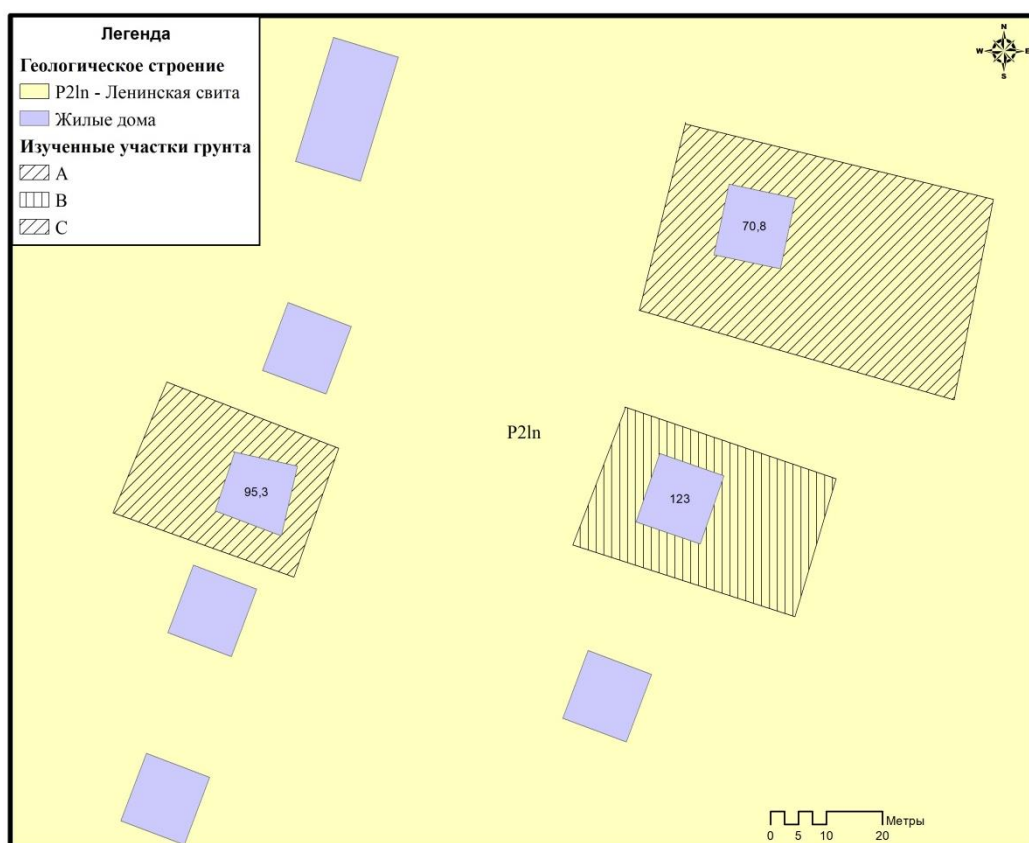


Рис. 24. Участок улицы Пригородная, Ленинск-Кузнецкий

Изученные строения в пределах данного участка имеют значения 70,8 Бк/м³, 123 Бк/м³ и 95,3 Бк/м³. ППР грунтов, изученных в окрестностях данных жилых строений варьирует в пределах 35-156 мБк/м²*с, со средним значением 74,1 мБк/м²*с. В отдельных точках фиксировались превышения ППР до 2 группы опасности, что при малом их количестве не создает опасности жилым строениям.

На рис. 25 изображен график зависимости между ППР из грунта и ЭРОА жилых строений для 12 строений [106].

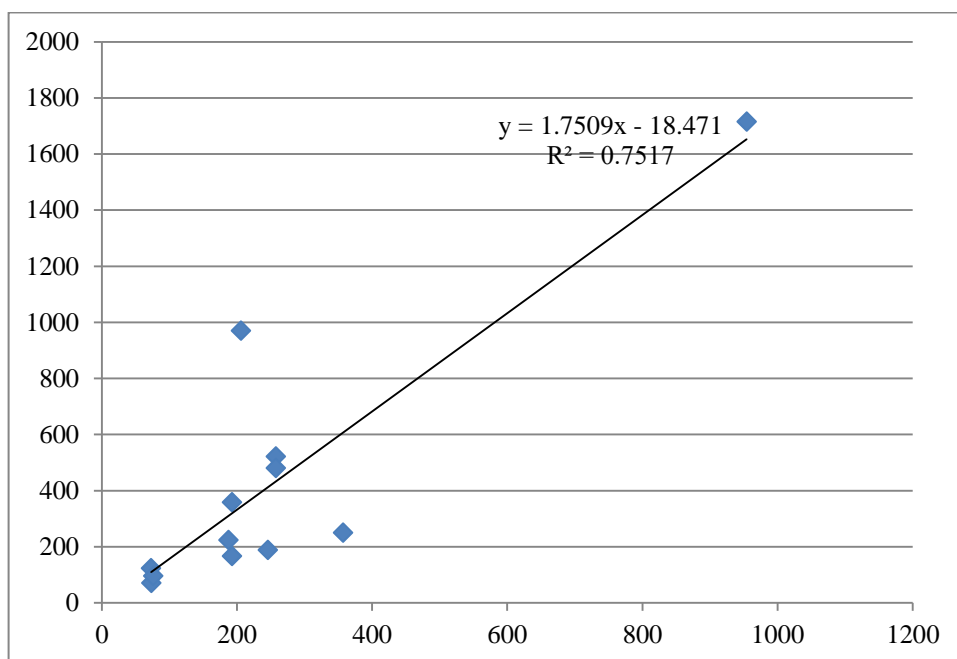


Рис. 25. Связь показателей ППР из грунта и ЭРОА жилых строений.

В исследовании была получена сильная положительная корреляционная связь ($r = 0,79$, $p < 0,001$) между показателями ППР из грунта и ЭРОА жилых строений. Данная связь объясняет превалирующее значение ППР в уровне ОАР в изученных строениях над шахтной выработкой так и за ее пределами.

4.4. Выводы по главе

В силу значительного количества строений (48,06 %), расположенных в пределах шахтных полей, из которых 20,62 % жилых домов являются потенциально радоноопасными и в 5,15 % случаев крайне опасными, население Ленинск-Кузнецкого района ежегодно получает дополнительную радиационную нагрузку, что может приводить к увеличению рисков развития рака легкого. Стоит отметить меньшую разницу между домами групп контроля и случая, чем в аналогичных группах для ППР. Естественная геологическая среда также является достаточно опасной, так как в 8,7 % случаев фиксируется превышение показателя ЭРОА внутри жилого дома. Полученные данные могут быть экстраполированы на другие районы Кузнецкого угольного бассейна, что выявляет необходимость создания региональных карт радоновой опасности с учетом установленных закономерностей.

Для изученных строений получена высокая положительная корреляционная связь между ЭРОА жилых строений и ППР из грунта, что позволит, при необходимости, предварительно оценить радоноопасность домов через изучение эманации радона из почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенным антропогенным источником радоновой опасности геологической среды являются зоны нарушения пород кровли шахтных выработок, возникшие после добычи угля подземным способом. Для монопрофильного Кузбасса данная проблема затрагивает достаточно существенные территории поселений, специализирующихся на данном секторе экономики. Потенциальные естественные факторы радоновой опасности на территории Ленинск-Кузнецкого района, главным образом, связаны с тектоническим строением, отличающимся блоковой структурой, которая формируется по системе крупных взбросо-надвигов. Основными источниками радоновой опасности, в этом случае, выступают естественные тектонические нарушения.

Потенциальная радоноопасность жилых строений определяется, главным образом, их территориальным положением в объектах геологической среды. Главную потенциальную радоноопасность в Ленинск-Кузнецком районе представляют шахтные поля. Они занимают 47,74 % от всей территории административного образования, что в совокупности с тектоническими нарушениями (7,58 %) формирует на более чем половине территории повышенный потенциальный радиационный риск, связанный с радоном.

Пространственное распределение домов также подчеркивает важность оценки радоноопасности территории над выработками угля, например, 48,06 % ИЖС располагается на территории шахтных полей в Ленинск-Кузнецком районе.

Таким образом, изменения в геологической среде, вызванные подземной добычей угля, существенно влияют на ППР из грунта, которая имеет более высокие средние и максимальные значения, по отношению к фоновым показателям. Большая часть грунтов подработанных пространств относится ко 2 и 3 классу радоноопасности по НРБ-99/2009 и требует

средних и усиленных мер по радиационной защите строения. На территории фиксируются процессы проседания и проваливания грунта, что требует обязательного постоянного контроля ОАР в помещении. На поверхности территорий подработанных пространств фиксируется инверсионный рисунок emanации радона, когда минимальный поток фиксируется в единичных замерах. В тоже время, на территории шахтного поля, обнаруживаются участки с низким потоком радона, что позволяет считать ее не полностью радоноопасной.

Жилые строения подработанных пространств характеризуются более высокими показателями ЭРОА, чем дома за их пределами. Пятая часть жилых строений имеет показатель выше допустимой, что создает условия для существенного роста бытового канцерогенного риска. При этом доля жилых строений за шахтными полями также имеет высокий показатель ЭРОА, что может объясняться их расположением в зоне естественной тектонической нарушенности.

В исследовании на основе корреляционного анализа выявлено, что в жилых домах преобладает геогенный радон.

Полученные данные могут быть экстраполированы на другие районы Кузнецкого угольного бассейна, что выявляет необходимость создания региональных карт радоновой опасности с учетом установленных закономерностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С. И. [и др.]. Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии // Известия Томского политехнического университета. 2011. (319). С. 109–115.
2. Астахов Н. Е., Бартанова С. В., Тубанов Ц. А. Радоновые аномалии некоторых зон разломов Бурятии как фактор радиационного риска // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. 2015. № 5 (17). С. 21–25.
3. Березина Е. В. Приземные концентрации и потоки радона-222 на территории России, и оценки биогенных эмиссий углекислого газа, метана и сухого осаждения озона: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2014. 27 с.
4. Влацкий Ф. Д. Исследования содержания радона в жилых помещениях Первомайского района Ориенбургской области // Вестник Ориенбургского государственного университета. 2005. № 10 (2). С. 68–73.
5. Гулабянц Н. А., Заболотский Б. Ю. Мощность «активного» слоя грунта при диффузионном переносе радона в грунтовом основании здания // АНРИ. 2001. № 4. С. 38–40.
6. Гулабянц Н. А., Заболотский Б. Ю. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки // АНРИ. 2004. № 4. С. 46–50.
7. Демин В. Ф., Жуковский М. В., Киселев С. М. Методика оценки риска от воздействия на здоровье человека радона и дочерних продуктов его распада // Гигиена и санитария. 2014. (5). С. 64–69.
8. Дехандшуттер Б. [и др.]. Радоновые аномалии как показатель активности Западно-Саянского разлома в северной части Телецкого озера (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2002. № 2 (43). С. 128–141.
9. Ершов В. В. Металлоносность углей Кузнецкого бассейна : дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2000. 225 с.

10. Жингель И. П. Линейная и пересекающаяся складчатости Кузнецкого бассейна в динамическом аспекте // Геология и геофизика. 1983. (6). С. 61–66.

11. Злобина А. Н. [и др.]. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов. 2019. № 3 (330). С. 111–125.

12. Злобина А. Н. Граниты с повышенным радиационным фоном и некоторые радиоэкологические проблемы в районах их распространения: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2019. 122 с.

13. Зуевич Ф. И. [и др.]. Взаимная корреляция солнечной активности и потока радона с поверхности грунтов // Экологические системы и приборы. 2008. № 10. С. 55–58.

14. Карта прогнозной радоноопасности // Архивная версия официального портала Администрации Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. URL: http://old.gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ecology/maps/scheme_radon.html (дата обращения: 15.04.2020).

15. Качурин Н. М., Поздеев А. А., Стась Г. В. Выделения радона в атмосферу горных выработок угольных шахт // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2012. (1). С. 46–56.

16. Качурин Н. М., Поздеев А. А., Стась Г. В. Радон в атмосфере угольных шахт // Известия Высших Учебных Заведений. Горный Журнал. 2013. № 4. С. 58–64.

17. Кемеровская область. Карты и данные. // NextGIS [Электронный ресурс]. URL: <https://data.nextgis.com/ru/region/RU-KEM/> (дата обращения: 10.11.2019).

18. Клещенко А. В. Геоморфологические и газогеохимические индикаторы современных движений земной коры (на примере Восточного Донбасса): автореф. дис. ... канд. географ. наук. Краснодар, 2010. 22 с.

19. Климшин А. В. Закономерности переноса радона в приповерхностном слое грунтов и в подземных горных выработках : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, 2012. 19 с.

20. Комплекс измерительный для мониторинга радона «Камера-01». Руководство по эксплуатации. М.: НТЦ «Нитон», 2003. 24 с.

21. Кононенко Д. В., Кормановская Т. А. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории // Радиационная гигиена. 2015. № 4 (8). С. 15–22.

22. Коршунов Г. И., Мироненкова Н. А., Кабанов Е. И. Радоновая опасность для населения и персонала угольных шахт Кузбасса // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень. 2015. № 7. С. 201–208.

23. Куролап С. А. Медицинская география на современном этапе развития // Вестник Воронежского государственного университета. 2017. № 1. С. 13–20.

24. Лавренов П. Ф. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-IX (Крапивинский). Объяснительная записка. / П. Ф. Лавренов, Б. А. Снежко, А. Ф. Щигрев, Н. В. Дмитриева, Н. Е. Филиппова, [и др.]. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. 156 с.

25. Лавренов П. Ф. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-XV (Ленинск-Кузнецкий). Объяснительная записка. / П. Ф. Лавренов, Б. А. Снежко, А. Ф. Щигрев, А. В. Щелеметева, Н. Е. Филиппова, М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018. 115 с.

26. Легощин К. В., Лешуков Т. В. Структура геоинформационной системы оценки последствий длительного воздействия радона на население в угледобывающем регионе / Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения Сборник трудов Всероссийской

научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2018. С. 149–151.

27. Легощин К. В., Лешуков Т. В. Радоновая опасность в жилых помещениях на территориях развития угледобывающей промышленности / Фундаментальные и прикладные аспекты устойчивого развития ресурсных регионов: сборник научных статей. 2020. С. 225–230.

28. Лешуков Т. В. Эманация радона на территориях, подработанных угольными предприятиями / IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. 2018. С. 308- 310.

29. Лешуков Т. В. [и др.]. Особенности эманации радона из грунтов на территориях, подработанных угольными шахтами (на примере Ленинск-Кузнецкого района) // Проблемы Региональной Экологии. 2019. № 6. С. 140–143.

30. Лешуков Т. В. [и др.]. Радоноопасность геологической среды в угледобывающих районах: пространственное исследование с применением геоинформационных систем // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 126–131.

31. Лешуков Т. В., Легощин К. В., Ларионов А. В. Пространственная изменчивость плотности потока радона на территориях подземной добычи угля // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 93–97.

32. Ляшенко В. И. Радиационная и социальная защита населения в регионах уранодобывающих и перерабатывающих производств Украины // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 2. С. 55–62.

33. Макаров В. И. [и др.]. Влияние структурно-геологических особенностей на распределение концентраций подпочвенного радона и радона в подвалах жилых зданий (на примере района Чертаново г. Москвы) // Геоэкол. Инж. геол. Гидрогеол. Геокриол. 2003. № 2. С. 139–152.

34. Максимовский В. А., Решетов В. В., Харламов М. Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10000000. Под ред. Смыслова А.А. / В. А. Максимовский, В. В. Решетов, М. Г. Харламов, М.,Пб.: СПбГГИ, 1995. 1 с.

35. Мананков А. В., Сафонова Е. В. Причинно-следственные связи геодинамики и гидрогеохимии с эманациями радона на территории города Томска / Роговские чтения. Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения профессора Геннадия Маркеловича Рогова. 2015. С. 121–125.

36. Маренный А. М. [и др.]. Обследование города Краснокаменск на содержание радона в помещениях // Радиационная гигиена. 2013. № 3 (6). С. 47–52.

37. Маренный А. М. [и др.]. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде / А. М. Маренный, А. А. Цапалов, П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, М.: Перо, 2016. 394 с.

38. Маренный М. А. [и др.]. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России // Радиационная гигиена. 2015. № 1 (8). С. 23–29.

39. Матвеев А. В. [и др.]. Влияние зон разрывных нарушений на концентрацию радона в почвенном воздухе на территории Беларуси // Геохім. та рудоутв. 2014. № 34. С. 69–77.

40. Микляев П. С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности на платформенных территориях : автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2015. 46 с.

41. Мирсаидов И. У. [и др.]. Исследования содержания радона в атмосферном воздухе и в жилых помещениях города Душанбе республики Таджикистан // Доклады академии наук республики Таджикистан. 2017. № 7–8 (60). С. 362–365.

42. Мохамед Т. С. Влияние природных факторов на измеряемые характеристики поля радона : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2009. 22 с.

43. Никифоров Д. В. Геоэкологические основы организации регионального мониторинга радона для обеспечения безопасности населения : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2013. 23 с.

44. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Министерство юстиции России, 2009.

45. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области в 2015 году: Государственный доклад. Кемерово: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Кемеровской области, 2016. 297 с.

46. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области в 2018 году: Государственный доклад. Кемерово: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Кемеровской области, 2019. 294 с.

47. Овсяченко А. Н. [и др.]. Палеогеологические и тектонические исследования сеймоопасных территорий юга Кузбасса // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 6. С. 35–45.

48. Панина Л. В., Зайцев В. А. Неотектоника и геодинамика Кузнецкой впадины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 6. С. 13–20.

49. Пинчук К. А. Исследование распределения и мониторинг радона в Северомуйском железнодорожном тоннеле на трассе Байкало-Амурской магистрали: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2012. 22 с.

50. Подымов И. С., Подымова Т. М. Мониторинг состояния гидрогеодеформационного поля по плотности потока радона из грунта // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 1. С. 56–62.

51. Пучков А. В., Киселев Г. П. Оценка количественных показателей объемной активности радона-222 на территории Архангельской промышленной агломерации // Экология человека. 2011. № 9. С. 19–23.

52. Салдан И. П. [и др.]. Гигиеническая оценка радиационного риска эманаций радона на территории Алтайского края // Гигиена и санитария. 2014. № 2. С. 44–47.

53. Сафонова Е. В. Каолининовая кора выветривания и эманации радона как геоэкологические факторы для градостроительства (на примере г. Томска): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2008. 22 с.

54. Семинский А. К. Радон в обводненных разломных зонах Байкальского рифта: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 2018. 170 с.

55. Серёгина О. В. Оценка пылегазовых выбросов в атмосферу угольными шахтами и совершенствование отраслевой методики инвентаризации источников загрязнения: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Тула, 2011. 20 с.

56. Середкина О. М. ГИС-технологии в изучении распределения радона на территории города Иркутска: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 2012. 24 с.

57. Сидорова Г. П., Крылов Д. А. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 369–376.

58. Сидорова Г. П., Крылов Д. А., Овчаренко Н. В. Радиационная обстановка в районах расположения угольных ТЭС России // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. № 5 (23). С. 36–44.

59. Спивак А. А. [и др.]. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора - атмосфера // Физика Земли. 2009. № 2. С. 34–48.

60. Стась Г. В., Арди М. Н. Геологические условия, определяющие формирование радиационной обстановки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2015. № 1. С. 93–100.

61. Сугако Е. А. Совершенствование методики оценки радиоактивного облучения населения, проживающего на территории Подмосковского угольного бассейна: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Тула, 2007. 20 с.

62. Сухоруков М. В., Спивак А. А. Пространственно-временные особенности поля радона в связи с тектоническими структурами // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 94–99.

63. Тертычная С. В. Формирование атмосферного поля радона и его патогенное воздействие на человека на примере территории г. Пензы и Пензинской области : автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2008. 22 с.

64. Титов А. В. [и др.]. Радиационная обстановка на объекте бывшего предприятия ЛПО «Алмаз» // Гигиена и санитария. 2017. № 9 (96). С. 822–826.

65. Токарева А. Ю., Алимова Г. С., Уткина И. А. Плотность потока радона в поверхностном слое почв Ярковского, Вагайского, Тобольского районов Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 11 (2). С. 400–406.

66. Уйба В. В. [и др.]. Проблемы безопасности населения на территориях с природными и техногенными факторами радиации на примере района влияния Приаргунского горно-химического комбината // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2009. № 1 (1). С. 101–105.

67. Уткин В. И. Радоновая проблема в экологии // Сорос.образ. ж. 2000. № 3 (6). С. 73–80.

68. Черкас О. В. Морфоструктурное районирование Кузнецкой впадины как основа при создании прикладных карт: дис. ... канд. геогр. наук. Новосибирск, 2015. 120 с.

69. Честное С. В. Оценка и прогноз влияния радиационной обстановки на инженерно-геологические условия строительства (на примере г. Волгограда) : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Волгоград, 2004. 24 с.

70. Шандала Н. К. [и др.]. Радиационно-гигиенический мониторинг в районе расположения Приаргунского производственного горно-химического объединения // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. № 4 (9). С. 824–827.

71. Шандала Н. К. [и др.]. Радиоэкологическая обстановка в районе расположения Приаргунского производственного горно-химического объединения // Гигиена и санитария. 2014. № 4. С. 14–18.

72. Шахтные поля // Недра-эксперт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nedraexpert.ru/> (дата обращения: 10.10.2018).

73. Ярошевич О. И. [и др.]. Пилотный мониторинг радона в воздухе зданий в Витебской области и оценка доз облучения населения, обусловленного радоном // Здоровье и окружающая среда. 2010. № 15. С. 231–239.

74. Ajrouche R. [и др.]. Quantitative health risk assessment of indoor radon: a systematic review // Radiation Protection Dosimetry. 2017. № 1–2 (177). С. 69–77.

75. Åkerblom G., Andersson P., Clevenso B. Soil gas radon - a source for indoor radon daughters // Radiation Protection Dosimetry. 1984. (7). С. 49–54.

76. Appleton J. D., Miles J. C. H. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk // Journal of Environmental Radioactivity. 2010. № 10 (101). С. 799–803.

77. Baeza A. [и др.]. Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study // Science of The Total Environment. 2018. (610–611). С. 258–266.

78. Baker S. R. Geography and radiology: perfect together. Cham: Springer International Publishing, 2014. С. 83–85.

79. Ball T. K., Wysocka M. Radon in coalfields in the United Kingdom and Poland // Archives of Mining Sciences. 2011. (56). С. 249–264.

80. Barnet I. [и др.]. Cross-border radon index map 1:100 000 Lausitz – Jizera – Karkonosze – Region (northern part of the Bohemian Massif) // Journal of Environmental Radioactivity. 2010. № 10 (101). С. 809–812.

81. Barros-Dios J. M. [и др.]. Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain // Environmental Research. 2007. № 2 (103). С. 185–190.

82. Bersimbaev R. I., Bulgakova O. The health effects of radon and uranium on the population of Kazakhstan // *Genes and Environment*. 2015. № 1 (37). [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1186/s41021-015-0019-3>.
83. Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010. № 10 (101). С. 826–834.
84. Chen J., Ford K. L. A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. (166). С. 152–156.
85. Chen J., Rahman N. M., Atiya I. A. Radon exhalation from building materials for decorative use // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010. № 4 (101). С. 317–322.
86. Cinelli G. [и др.]. Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy // *Environmental Geochemistry and Health*. 2015. № 2 (37). С. 305–319.
87. Damkjaer A., Korsbech U. A search for correlation between local geology and indoor radon concentration // *Radiation Protection Dosimetry*. 1988. № 1–4 (24). С. 51–54.
88. Darby S. [и др.]. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // *BMJ (Clinical research ed.)*. 2005. № 7485 (330). С. 223.
89. Demoury C. [и др.]. A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. (126). С. 216–225.
90. Dubois G. [и др.]. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010. № 10 (101). С. 786–798.
91. Dueñas C. [и др.]. Radon concentrations in surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere // *Journal of Environmental Radioactivity*. 1996. № 1 (31). С. 87–102.

92. Eidemüller M. [и др.]. Lung cancer mortality (1950–1999) among Eldorado uranium workers: A comparison of models of carcinogenesis and empirical excess risk models // PLoS ONE. 2012. № 8 (7). С. 1–10.
93. Friedmann H. [и др.]. Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. (166). С. 382–389.
94. Friedmann H., Gröller J. An approach to improve the Austrian radon potential map by Bayesian statistics // Journal of Environmental Radioactivity. 2010. № 10 (101). С. 804–808.
95. Gawełek E., Drozdowska B., Fuchs A. Radon as a risk factor of lung cancer // Przegląd Epidemiologiczny. 2017. № 1 (71). С. 90–98.
96. Goswami S. Environmental impact assessment of coal mining: Indian scenario // European Researcher. 2014. № 9–2(83). С. 1651–1661.
97. Gundersen L. C. S. The correlation between bedrock geology and indoor radon: where it works and where it doesn't-some examples from the eastern United States / The 1993 International Radon Conference. 1993. № 12. С. 1–8.
98. Hystad P. [и др.]. Geographic variation in radon and associated lung cancer risk in Canada // Canadian Journal of Public Health. 2014. № 1 (105). С. 4–10.
99. Kamra L. Seasonal emanation of radon at Ghuttu, northwest Himalaya: Differentiation of atmospheric temperature and pressure influences // Applied Radiation and Isotopes. 2015. (105). С. 170–175.
100. Kim B. J. [и др.]. Activity measurement of ^{222}Rn gas for a key comparison // Applied Radiation and Isotopes. 2018. (134). С. 363–365.
101. Klingel R., Kemski J. Influence of underground mining on the geogenic radon potential // Radon in the Living Environment. 1999. С. 773–786.
102. Kobeissi M. A. [и др.]. Assessment of Indoor and outdoor radon levels in South Lebanon // International Journal of Disaster Risk Science. 2014. № 3 (5). С. 214–226.

103. Kropat G. [и др.]. Major influencing factors of indoor radon concentrations in Switzerland // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. (129). С. 7–22.
104. Lawrence C. E. [и др.]. Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. № 1 (100). С. 1–8.
105. Leshukov T. [и др.]. Radon hazard assessment in region with intense coal mining industry / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. (543). С. 012026.
106. Leshukov T. [и др.]. The Assessment of Radon Emissions as Results of the Soil Technogenic Disturbance // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. № 24 (17). С. 9268.
107. Liu H. [и др.]. Mapping radon hazard areas using ^{238}U measurements and geological units: a study in a high background radiation city of China // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2016. № 3 (309). С. 1209–1215.
108. Lu W., Cao Y.-J., Tien J. Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. (27). С. 839–846.
109. Lubin J. H., Boice J. D. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies // *Journal of the National Cancer Institute*. 1997. № 1 (89). С. 49–57.
110. Marenny A. M. [и др.]. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia // *Radiation Measurements*. 1996. № 1 (26). С. 43–48.
111. Martin P. [и др.]. Use of airborne γ -ray spectrometry for environmental assessment of the rehabilitated Nabarlek Uranium Mine, Australia // *Environmental Monitoring and Assessment*. № 1–3 (115). С. 531–554.
112. Medical geology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/medical-geology/komatina/978-0-444-51615-2> (дата обращения: 10.04.2019).

113. Miles J., Ball K. Mapping radon-prone areas using house radon data and geological boundaries // *Environment International*. 1996. (22). С. 779–782.
114. Moussa M. M., El Arabi A.-G. M. Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safaga road, Eastern Desert, Egypt // *Radiation Measurements*. 2003. № 3 (37). С. 211–216.
115. Noh J. [и др.]. Residential radon and environmental burden of disease among non-smokers // *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 2016. № 1 (28). С. 8.
116. Onishchenko A., Zhukovsky M., Bastrikov V. Calibration system for measuring the radon flux density // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. № 4 (164). С. 582–586.
117. Palchik V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: Field measurements and prediction // *Environmental Geology*. 2005. (48). С. 68–80.
118. Pasculli A. [и др.]. A modelling methodology for the analysis of radon potential based on environmental geology and geographically weighted regression // *Environmental Modelling & Software*. 2014. (54). С. 165–181.
119. Petersell V. [и др.]. Radon in the soil air of Estonia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. (166). С. 235–241.
120. Porstendörfer J., Butterweck G., Reineking A. Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters. // *Health physics*. 1994. № 3 (67). С. 283–287.
121. Rikhvanov L. P. [и др.]. The causes of high natural radioactivity in the soils and radioecological problems in areas with highly radioactive soils Томск: ЦТТ, 2016.С. 771–776.
122. Rout R. P. [и др.]. Investigation of ^{220}Rn emanation and exhalation from soil samples of Larsemann Hills region, Antarctica // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. (214–215). С. 7.

123. Ryzhakova N. K. A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. (135). С. 63–66.
124. Sarra A. [и др.]. Quantile regression and Bayesian cluster detection to identify radon prone areas // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. (164). С. 354–364.
125. Scheib C. [и др.]. Geological controls on radon potential in England // *Proceedings of the Geologists' Association*. 2013. № 6 (124). С. 910–928.
126. Schery S. D., Gaeddert D. H. Measurements of the effect of cyclic atmospheric pressure variation on the flux of ^{222}Rn from the soil // *Geophysical Research Letters*. 1982. № 8 (9). С. 835–838.
127. Seminsky K. Z., Bobrov A. A. Radon activity of faults (Western Baikal and Southern Angara areas) // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. № 8 (50). С. 682–692.
128. Seminsky K. Z., Bobrov A. A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zone: spatial characteristics // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. № 6 (50). С. 795–813.
129. Sherman S. I., Dem'yanovich V. M., Lysak S. V. Active faults, seismicity and recent fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system // *Tectonophysics*. 2004. № 3 (380). С. 261–272.
130. Shuyun Z. [и др.]. Restriction function of lithology and its composite structure to deformation and failure of mining coal seam floor // *Natural Hazards*. 2013. (68).
131. Shweikani R., Giaddui T. G., Durrani S. A. The effect of soil parameters on the radon concentration values in the environment // *Radiation Measurements*. 1995. № 1–4 (25). С. 581–584.
132. Singh L. M. [и др.]. Study of natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation doses in coal and flyash samples from thermal power plants, India // *Physics Procedia*. 2015. (80). С. 120–124.

133. Skubacz K., Michalik B., Wysocka M. Occupational radiation risk caused by NORM in coal mining industry // *Radioprotection*. 2011. № 6 (46). С. 669–674.
134. Smetanová I. [и др.]. The effect of meteorological parameters on radon concentration in borehole air and water // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2010. № 1 (283). С. 101–109.
135. Smethurst M. A. [и др.]. Large-scale radon hazard evaluation in the Oslofjord region of Norway utilizing indoor radon concentrations, airborne gamma ray spectrometry and geological mapping // *Science of The Total Environment*. 2008. № 1 (407). С. 379–393.
136. Steinitz G. [и др.]. Radon emanation along border faults of the rift in the Dead Sea area // *Israel Journal of Earth Sciences*. 1992. (41). С. 0–20.
137. Sundal A. V. [и др.]. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway // *Science of The Total Environment*. 2004. № 1 (328). С. 41–53.
138. Szabó K. Z. [и др.]. Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. (129). С. 107–120.
139. Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Kłós M. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health // *Science of The Total Environment*. 2017. (584–585). С. 911–920.
140. Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Solecki A. T. Variations of radon concentration in the atmosphere. Gamma dose rate // *Atmospheric Environment*. 2018. (174). С. 54–65.
141. Tsunomori F. [и др.]. Radon concentration distributions in shallow and deep groundwater around the Tachikawa fault zone // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. (172). С. 106–112.
142. Tsvetkova T. [и др.]. Measurement of radon in the East Europe under the ground // *Radiation Measurements*. № 1 (40). С. 98–105.

143. Utkin V. I., Yurkov A. K. Radon as a tracer of tectonic movements // Russian Geology and Geophysics. 2010. № 2 (51). С. 220–227.
144. Wang N. [и др.]. The level and distribution of ^{220}Rn concentration in soil-gas in Guangdong Province, China // Radiation protection dosimetry. 2012. (152).
145. Watson R. J. [и др.]. The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. (166). С. 341–354.
146. Wei Z. [и др.]. Dynamic evolution characteristics of mining-induced fractures in overlying strata detected by radon // Nuclear Science and Techniques. 2011. № 6 (22). С. 334–337.
147. Wilkening M. Radon in the environment / M. Wilkening, NM: Elsevier Science, 1990. 136 с.
148. Wysocka M. Radon problems in mining and post-mining areas in Upper Silesia region, Poland // Nukleonika. 2016. (61). С. 307–313.
149. Wysocka M. [и др.]. Radon migration in the area around the coal mine during closing process // International Journal of Coal Geology. 2019. (212). С. 103253.
150. Wysocka M., Chalupnik S. Correlation of radon concentration level with mining and geological conditions in Upper Silesia region // Journal of Mining Science. 2003. № 39 (2). С. 199–206.
151. Xue S., Dickson B., Wu J. Application of ^{222}Rn technique to locate subsurface coal heatings in Australian coal mines // International Journal of Coal Geology. 2008. (74). С. 139–144.
152. Xue S., Winkelmann N. Detection of underground spontaneous combustion of coal with surface-based radon technique at Dartbrook Mine 2005. С. 4.
153. Yakovleva V., Karataev V. Radon flux density at the earth's surface as a possible indicator of the stress and strain state of the geological environment // Journal of Volcanology and Seismology. 2007. (1). С. 67–70.

154. Zhang W. [и др.]. Numerical simulation on dynamic development features of mining-induced fractures in overlying strata during shallow coal seam mining // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2013. (18). С. 5531–5543.

155. Zhang W. [и др.]. On-site radon detection of mining-induced fractures from overlying strata to the surface: a case study of the Baoshan coal mine in China // *Energies*. 2014. № 12 (7). С. 8483–8507.

156. Zhuo W. [и др.]. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008. № 7 (99). С. 1143–1148.

157. Zhuo W., IIDA T., Furukawa M. Modeling radon flux density from the Earth's surface // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2006. (43). С. 479–482.

158. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective под ред. World Health Organization, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2009. 94 с.